

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

IGOR DE OLIVEIRA BOCARDI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIDOR DE VELOCIDADE DE
ESCOAMENTOS UTILIZANDO Sonda Térmica NTC**

**Ilha Solteira/SP
2022**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO
DE RECURSOS HÍDRICOS**

IGOR DE OLIVEIRA BOCARDI

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIDOR DE VELOCIDADE
DE ESCOAMENTOS UTILIZANDO SONDA TÉRMICA NTC**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Prof. Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B664d Bocardi, Igor de Oliveira.
Desenvolvimento de sistema de medidor de velocidade de escoamentos
utilizando sonda térmica NTC / Igor de Oliveira Bocardi. -- Ilha Solteira: [s.n.],
2022

99 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Gestão e Regulação de
Recursos Hídricos, 2022

Orientador: Jefferson Nascimento de Oliveira
Inclui bibliografia

1. Medidor de velocidade de escoamentos. 2. Hidrometria. 3. Transmissão
de calor por convecção.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Serviço
Serviço Técnico de Biblioteca, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTOS UTILIZANDO SONDA TÉRMICA NTC

AUTOR: IGOR DE OLIVEIRA BOCARDI

ORIENTADOR: JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, área: Instrumentos de Política de Recursos Hídricos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. HUMBERTO CARLOS RUGGERI JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Goiás

Prof. Dr. HUGO MORAIS DE ALCÂNTARA (Participação Virtual)
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido / Universidade Federal de Campina Grande

Ilha Solteira, 13 de abril de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu forças e motivação para realizar mais esta conquista.

Aos meus pais e irmão que nunca mediram esforços para realização dos meus sonhos e contribuíram diretamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao professor Milton Dall’Aglio Sobrinho que me concedeu a oportunidade de trabalhar neste projeto, além de todo apoio, confiança, empenho e paciência durante o seu desenvolvimento.

À amiga Tássia Cestari Fernandes que foi essencial no meu desenvolvimento acadêmico, pela influência à área de Recursos Hídricos, e também pelas conversas, apoio e conselhos.

Aos meus amigos por toda força, companheirismo e ajuda para conclusão desta importante etapa.

Aos amigos de Mestrado, pelo aprendizado, companheirismo e momentos compartilhados durante essa caminhada.

Aos professores do ProfÁgua pela paciência e dedicação aos ensinamentos.

Ao professor Jefferson Nascimento de Oliveira pelo empenho à evolução do ProfÁgua e compreensão nos momentos difíceis.

À Secretaria do ProfÁgua pelos serviços prestados durante todo o Mestrado.

Em memória ao colega de turma Alam Aparecido de Mattos Tombini.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

RESUMO

O Brasil apresenta deficiência nos dados hidrométricos das suas diversas bacias hidrográficas, devido às dificuldades de controle instrumental de outorga em pequenas vazões, em virtude da falta de recurso financeiro para obtenção de equipamentos sofisticados de hidrometria e da carência de corpos técnicos especializados para fiscalização dos usuários. Neste contexto, a abordagem deste trabalho foi pensada para amparar os ODS 6, 9 e 11 da Agenda 2030, que tem o intuito de garantir o direito humano de acesso à água potável, saneamento e de tornar os municípios, comunidades e assentamento humanos mais seguros, resistentes e sustentáveis, fomentando a construção de projetos inovadores. O objetivo foi desenvolver o sistema de um equipamento de baixo custo, com a finalidade de contribuir para o gerenciamento dos recursos hídricos aplicando os conceitos da transferência de calor por convecção e advecção de onda de calor utilizando sensores térmicos para leitura da temperatura. A velocidade é calculada basicamente pela diferença de temperatura realizada na troca de calor pelo elemento aquecido e o fluxo d'água. Na primeira parte da pesquisa foram realizados diversos ensaios para identificar as condições de trabalho e as possíveis dificuldades a serem enfrentadas para medir a velocidade de escoamentos usando sensores térmicos. Na segunda etapa, foi definido o aparato experimental com um sistema de bombeamento para testar as sondas construídas. Foram identificados os fatores que afetam os resultados das medições, mediante o que retratam as revisões bibliográficas e os resultados dos ensaios executados nas sondas, e foi possível demonstrar que há a possibilidade de calibrar o modelo de medidor de velocidade por variação do coeficiente de transferência calor por convecção, entretanto há a necessidade de alta potência do resistor para aquecimento do fluxo d'água e a precisão dos resultados requer um tratamento mais eficiente dos dados, tendo em vista a necessidade de cada usuário. Os resultados dos ensaios na sonda de advecção de onda de calor demonstraram que é possível usar injeção água previamente aquecida como traçador, porém seria necessário um condicionamento de sinais mais eficiente para produzir resultados práticos.

Palavras-chave: medidor de velocidade de escoamentos; hidrometria; transmissão de calor por convecção.

ABSTRACT

Brazil has a deficiency in the hydrometric data of its various hydrographic basins, due to the difficulties of instrumental control of granting in small flows, due to the lack of financial resources to obtain sophisticated hydrometry equipment and the lack of specialized technical bodies to inspect users. . In this context, the approach of this work was designed to support the SDGs 6, 9 and 11 of the 2030 Agenda, which aims to guarantee the human right of access to drinking water, sanitation and to make municipalities, communities and human settlements safer. , resistant and sustainable, encouraging the construction of innovative projects. The objective was to develop a low-cost equipment system, with the purpose of contributing to the management of water resources by applying the concepts of convection heat transfer and heat wave advection using thermal sensors for temperature reading. The velocity is basically calculated by the temperature difference realized in the heat exchange by the heated element and the water flow. In the first part of the research, several tests were carried out to identify the working conditions and the possible difficulties to be faced to measure the flow velocity using thermal sensors. In the second stage, the experimental apparatus was defined with a pumping system to test the constructed probes. The factors that affect the measurement results were identified, through which the bibliographic reviews and the results of the tests performed on the probes portrayed, and it was possible to demonstrate that there is the possibility of calibrating the speed meter model by variation of the heat transfer coefficient by convection, however, there is a need for a high power resistor to heat the water flow and the accuracy of the results requires a more efficient treatment of the data, considering the needs of each user. The results of the tests on the heat wave advection probe showed that it is possible to use previously heated water injection as a tracer, but a more efficient signal conditioning would be necessary to produce practical results.

Key words: flow velocity meter; hydrometry; convection heat transmission.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Kit Arduino Básico.....	19
Figura 2 - Molinete Hidrométrico	22
Figura 3 - Kit Operacional do Molinete Hidrométrico.....	22
Figura 4 - Micromolinete Hidrométrico	23
Figura 5 - Kit Operacional do Micromolinete Hidrométrico	23
Figura 6 – Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP).....	25
Figura 7 - Sensores NTC.....	28
Figura 8 – Sonda com fonte concentrada de calor e sensor de temperatura justapostos	31
Figura 9 – Sonda com fonte de calor concentrada com dois componentes em encapsulamento metálico.....	32
Figura 10 – Sonda com fonte de calor concentrada com resistência ao longo do tubo do medidor	33
Figura 11 – Esquema elétrico dos circuitos de controle do aquecimento.....	34
Figura 12 – Condicionamento de sinal de temperatura.....	35
Figura 13 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com aquecimento no próprio escoamento e fonte de calor concentrada	37
Figura 14 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com aquecimento no próprio escoamento e fonte de calor distribuída.....	38
Figura 15 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com injeção de água aquecida externamente ao escoamento	38
Figura 16 – Tensão em função do tempo durante ensaio com traçador	40
Figura 17 – Funcionamento da correlação cruzada na determinação da velocidade.....	42
Figura 18 - Interface do software TracerDAQ.....	44
Figura 19 – Delineamento experimental e fluxo de eventos.....	46
Figura 20 - Montagem do sistema de Ponte de Wheastone	48
Figura 21 - Sistema de Ponte de Wheastone.....	49
Figura 22 - Posicionamento das sondas térmicas para realização do teste do pré- protótipo	50
Figura 23 - Testagem do pré-protótipo.....	51
Figura 24 - Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo	52
Figura 25 - Erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo.....	54
Figura 26 - Posicionamento das sondas térmicas para realização do teste do pré- protótipo	55
Figura 27 – Esquema do protótipo utilizado no teste primeiro protótipo.....	56
Figura 28 - Testagem do primeiro protótipo	57
Figura 29 - Leitura da resistência das sondas térmicas NTC do primeiro protótipo efetuada com o software TracerDAQ	58
Figura 30 - Leitura da resistência das sondas térmicas NTC do primeiro protótipo efetuada com o software TracerDAQ	59
Figura 31 - Construção do segundo protótipo	60

Figura 32 - Testagem do segundo protótipo em fluxo contínuo de água em posição vertical	61
Figura 33 - Testagem do segundo protótipo em fluxo contínuo de água	62
Figura 34 – Ensaio da sonda com fonte de calor distribuída.....	63
Figura 35 – Gráfico comparativo das séries de testes da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido	64
Figura 36 – Testagem da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido.....	66
Figura 37 – Injeção de água previamente aquecida utilizando seringa hipodérmica	67
Figura 38 – Resultados da testagem da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido usando o software TracerDAQ	68
Figura 39 – Aparato experimental	71
Figura 40 - Controle do fluxo d'água	72
Figura 41 - Bombas hidráulicas utilizadas no controle do fluxo d'água	73
Figura 42 - Testagem da sonda convectiva	74
Figura 43 - Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do sensor térmico NTC da sonda convectiva testada em fluxo controlado	76
Figura 44 - Curva de relação da variação da temperatura pela velocidade do fluxo do primeiro teste da sonda convectiva	77
Figura 45 – Gráfico comparativo das curvas de relação da variação da temperatura pela velocidade do fluxo do segundo e do terceiro teste da sonda convectiva	79
Figura 46 – Ajuste do gráfico da curva exponencial das leituras de Tensão x Temperatura da sonda	84
Figura 47 – Curva de calibração da velocidade em relação à variação da temperatura e pontos anômalos	86
Figura 48 – Ajuste da curva de calibração da velocidade em relação à variação da temperatura	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo.....	52
Tabela 2 - Dados da Gráfico de erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo	53
Tabela 3 – Condições laboratoriais das séries de testes da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido	65
Tabela 4 - Dados da calibração do sensor térmico NTC da sonda convectiva testada em fluxo controlado	75
Tabela 5 – Valores médios das leituras de tensão para cada temperatura efetuadas nos ensaios da sonda com encapsulamento metálico	83
Tabela 6 – Dados de aquecimento da sonda com encapsulamento metálico em função da velocidade média.....	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	16
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1	O PAPEL DOS EQUIPAMENTOS INOVADORES NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS	17
3.2	MÉTODOS E EQUIPAMENTOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E VAZÃO	19
3.2.1	<i>Flutuador</i>	<i>20</i>
3.2.2	<i>Vertedouro.....</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Mecânicos.....</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Hidroacústicos</i>	<i>24</i>
3.3	MÉTODOS DE MEDIÇÃO POR ANEMOMETRIA.....	26
3.4	DIFICULDADES NO MONITORAMENTO E CONTROLE DE OUTORGA	29
4	METODOLOGIA.....	31
4.1	SONDA CONVECTIVA E CONDICIONAMENTO DO SINAL	31
4.2	SONDA DE ADVECÇÃO DE CALOR E CONDICIONAMENTO DO SINAL	36
4.2.1	<i>Medição da Velocidade.....</i>	<i>39</i>
4.2.2	<i>Determinação Automática dos Tempos de Percurso</i>	<i>41</i>
4.3	CONDIÇÕES LABORATORIAIS E PROCESSAMENTO DE DADOS.....	43
5	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E RESULTADOS	45
5.1	PRÉ-PROTÓTIPO	46
5.1.1	<i>Montagem da Ponte de Wheastone</i>	<i>46</i>
5.1.2	<i>Testagem do Pré-Protótipo em Recipiente com Água Parada.....</i>	<i>49</i>
5.1.3	<i>Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do Pré-Protótipo.....</i>	<i>51</i>
5.1.4	<i>Verificação do Erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do Pré-Protótipo</i>	<i>53</i>
5.2	PRIMEIRO PROTÓTIPO	54
5.2.1	<i>Construção do Primeiro Protótipo.....</i>	<i>54</i>
5.2.2	<i>Testagem do Primeiro Protótipo em Fluxo Contínuo de Água</i>	<i>55</i>
5.2.3	<i>Resultados dos Testes no Primeiro Protótipo</i>	<i>57</i>
5.3	SEGUNDO PROTÓTIPO	59
5.3.1	<i>Construção do Segundo Protótipo</i>	<i>59</i>
5.3.2	<i>Testagem do Segundo Protótipo em Fluxo Contínuo de Água</i>	<i>60</i>
5.3.3	<i>Resultados dos Testes no Segundo Protótipo</i>	<i>62</i>
5.4	SONDA ADVECTIVA COM FONTE DE CALOR DISTRIBUÍDA.....	62

5.5	SONDA DE ADVECÇÃO COM INJEÇÃO DE TRAÇADOR TÉRMICO	65
5.5.1	<i>Testagem da Sonda de Advecção com Traçador Térmico.....</i>	<i>65</i>
5.5.2	<i>Resultados dos Testes na Sonda de Advecção com Injeção de Água Quente</i>	<i>67</i>
5.6	SONDA CONVECTIVA	70
5.6.1	<i>Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC da Sonda Convectiva</i>	<i>70</i>
5.6.2	<i>Testagem da Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água.....</i>	<i>70</i>
5.6.3	<i>Resultados dos Testes na Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água....</i>	<i>75</i>
5.6.4	<i>Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC da Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água.....</i>	<i>75</i>
5.6.5	<i>Resultados da Testagem da Sonda Convectiva em Fluxo de Água Controlado .</i> <i>.....</i>	<i>76</i>
5.7	SONDA CONVECTIVA ENCAPSULADA EM CORPO METÁLICO	80
5.7.1	<i>Relação entre a Tensão lida pelo Sistema de Aquisição e a Temperatura da Sonda</i>	<i>80</i>
5.7.2	<i>Ajuste da Relação entre Tensão e Temperatura</i>	<i>82</i>
5.7.3	<i>Análise dos Dados de Aquecimento da Sonda com Encapsulamento Metálico em Função da Velocidade Média</i>	<i>84</i>
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a disponibilidade de água potável mundial seja 2,5% de toda a água do planeta, porém grande parte desta água potável se encontra em locais inacessíveis para o seu uso como em geleiras e calotas polares. O ciclo hidrológico é responsável pela geração de água doce na Terra, por meio das precipitações que acontecem na atmosfera. Uma parte dessa água doce evapora, enquanto outra escoar para rios, lagos e reservatórios ou infiltram no solo e abastecem os mananciais subterrâneos (FAO, 2002).

Conforme Cruz e Tucci (2008), a disponibilidade hídrica não está ligada somente ao uso consuntivo da água, além disso, é condicionada a alguns fatores como as variabilidades do tempo, do espaço e das condições pré-existentes que afetam o hidrograma de um rio. Com a finalidade de atender a todos os usos da água ao longo do tempo e manter a integridade ambiental, esses fatores possuem restrições quanto à quantidade e à qualidade da água.

Para emissão da outorga de direito, a maioria dos órgãos gestores de recursos hídricos estaduais brasileiros e a ANA impõem obrigações para medição das vazões captadas ou lançadas pelos usuários. Dependendo do porte do usuário, da bacia hidrográfica onde se localiza ou do ato estabelecido na outorga, o usuário deve encaminhar os dados de medição para cumprir as exigências de cada legislação (PIAU, 2016).

Diversas bacias hidrográficas brasileiras apresentam deficiência dos dados hidrométricos, em virtude das dificuldades de controle instrumental de outorga em pequenas vazões, da falta de corpo técnico especializado e da indisponibilidade recursos financeiros para obtenção de equipamentos sofisticados de hidrometria.

Cientistas, entusiastas e voluntários, inspirados pelo movimento “Faça você mesmo” ou “Do it Yourself” (DIY), passaram a desenvolver atividades científicas em centros independentes de pesquisas e influenciar o desenvolvimento de experimentos, inovações e novas tecnologias (SARPONG *et al.*, 2020).

A disponibilidade de equipamentos tecnológicos com baixo custo no mercado atual permitiu que pessoas comuns da sociedade tivessem fácil acesso às

ferramentas eletrônicas, possibilitando solucionar por si próprias os problemas do cotidiano e incentivando o desenvolvimento de projetos inovadores.

Baseando-se neste conceito, esta pesquisa dispõe da finalidade de melhorar o processo de aquisição de dados hidrométricos, construindo um protótipo de sistema de medidor de velocidade de escoamentos utilizando sonda térmica NTC, para que possa servir de ferramenta de controle de vazões, disponibilidade hídrica, poluição, prevenção de enchentes e que permitiria acompanhar o processo de mudanças dos regimes hídricos com uma abordagem participativa da comunidade no monitoramento de rios, córregos, riachos, arroios, igarapés e entre outros ambientes.

Uma das ferramentas essenciais para gerenciamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas é o conhecimento das condições do fluxo, levando em conta a situação atual de degradação das águas e a necessidade crescente de fontes de abastecimento (COSTA *et al.*, 2007).

De acordo Almeida *et al.*, (2010), a medição de vazão é calculada de forma indireta, por meio da velocidade média do escoamento. O método a ser empregado na medição depende da grandeza do corpo hídrico, da precisão requerida nos resultados e dos recursos disponíveis.

Os equipamentos convencionais de medição de velocidade de fluidos apresentam dificuldades de realizar medições em escoamentos de baixa vazões e em meios adversos, como os ambientes afetados por voçorocas e escoamentos contendo uma elevada quantidade de materiais sólidos suspensos. Os sensores que aplicam o método de advecção de onda de calor permitiriam executar as medições nestes ambientes, pois sua calibração seria minimamente afetada pelas condições do meio.

Os sensores baseados no conceito da anemometria térmica são menores e mais baratos do que qualquer equipamento que mede velocidade de fluidos, além de causarem interferências mínimas para a estrutura de estudo (MOORE, 2003).

A partir dos estudos de Petropoulos *et al.* (2009), os medidores baseados em traçadores aquecidos que utilizam princípios da calorimetria e da anemometria

são uma alternativa para solucionar os problemas com medições de baixas vazões, por conta da sua alta sensibilidade.

Conforme Silveira e Tucci (1998), a usabilidade dos métodos que determinam a vazão de um escoamento é condicionada ao custo de implantação do equipamento, ao conhecimento técnico necessário para realização do processo e o tempo de execução da medição.

Este trabalho consiste no desenvolvimento experimental do sistema de um protótipo de baixo custo usando sensor térmico NTC com a proposta de realizar medições de velocidade em escoamentos, principalmente em baixas vazões.

2 OBJETIVO

Nesta dissertação, o objetivo principal é a construção de um protótipo de sistema de baixo custo como alternativa para os equipamentos de medição de velocidade convencionais, contribuindo para o monitoramento de escoamentos na medição de velocidade. Visando avaliar o método de funcionamento proposto, os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Promover a medição de velocidade de escoamentos de baixas vazões em laboratório utilizando a técnica de transmissão de calor por convecção;
- b) Estudar a possibilidade de utilização da técnica de advecção de onda de calor como auxílio à calibração das sondas;
- c) Desenvolver o sistema de um equipamento de custo reduzido comparado aos equipamentos de medição convencionais.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 O PAPEL DOS EQUIPAMENTOS INOVADORES NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Em uma bacia hidrográfica, a disponibilidade hídrica é considerada a parte da vazão disponível para o consumo da sociedade e para o seu desenvolvimento, desde que não prejudique o meio ambiente aquático. O restante da parcela da vazão que escoar pelos rios é denominado vazão remanescente (CRUZ; TUCCI, 2008).

Ainda segundo Cruz e Tucci (2008), o gerenciamento de recursos hídricos tem o objetivo de assegurar a disponibilidade a todos os usos da água ao longo do tempo e manter a integridade ambiental, porém estas condições não estão somente ligadas ao uso consuntivo da água, além disso, é condicionado a alguns fatores como as variabilidades do tempo, do espaço e das condições pré-existentes que afetam o hidrograma de um rio.

Tundisi (2008) afirma que os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, juntamente com uma base consolidada de dados, podem ser uma das ferramentas mais importantes no combate à escassez e à preservação da qualidade da água.

A problemática do uso dos instrumentos tecnológicos aperfeiçoados ao longo dos anos para determinar as condições de uma bacia hidrográfica é o seu alto custo, o que prejudica o acesso dos usuários a equipamentos que poderiam ser utilizados em diversas aplicações como na agricultura, no meio ambiental, pedagógico e entre outros (SANCHES *et al.*, 2017).

Segundo Costa *et al.* (2007), é de suma relevância o desenvolvimento de métodos de obtenção de dados mais simples e menos onerosos, de forma que forneçam informações confiáveis e que possam contribuir para o conhecimento dos regimes hídricos locais do país.

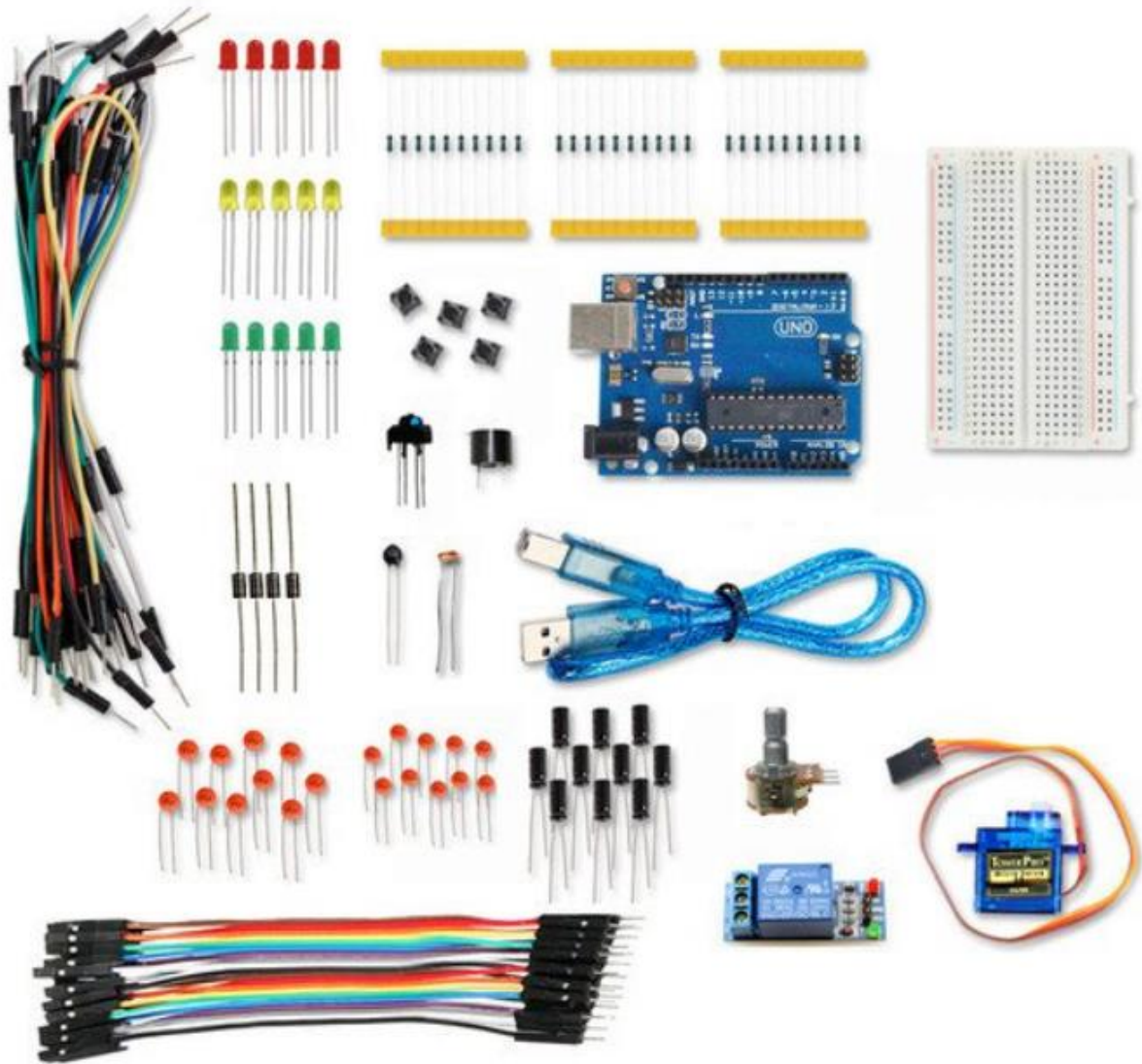
Perante a inacessibilidade aos instrumentos de tecnologia de ponta, diversos pesquisadores se propuseram a desenvolver equipamentos inovadores utilizando sistemas com sensores de baixo custo, haja vista a evolução do mercado eletrônico e a disponibilidade de componentes, sistemas eletrônicos de controle, automação e

processamento de dados nas plataformas de vendas da internet. Como exemplo podem ser citados o pluviômetro de Sanches *et al.* (2017), o sensor de umidade de Pereira *et al.* (2021) e os modelos de Ruggeri (2002), Milanese (2002) e Martins Jr. (2005).

Esta evolução contribui para o conceito do “Faça você mesmo” ou “Do it Yourself” (DIY), pois possibilita o desenvolvimento de projetos inovadores de forma barata e automatizada, com componentes de qualidade como os microcontroladores Arduino que são facilmente encontrados com custo acessível em sites de componentes eletrônicos.

Microcontroladores como o Arduino, possuem um conceito de hardware livre que permite personalizar o dispositivo, de acordo com a necessidade de cada usuário, por meio de uma programação simples e baixo custo funcional (SANCHES *et al.*, 2017). A Figura 1 apresenta os componentes inclusos num Kit Arduíno Básico vendido na internet.

Figura 1 - Kit Arduino Básico



Fonte: Eletrogate (2020).

3.2 MÉTODOS E EQUIPAMENTOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADE E VAZÃO

Bonifácio e Freire (2013) afirmam que o estudo de vazão de um rio se faz necessário, pois influencia na qualidade da água e nos organismos que vivem neste meio, além de ser uma ferramenta importante na prevenção e mitigação de enchentes. Alguns fatores são importantes para definir o método ou equipamento a se utilizar na medição como:

- a) A disponibilidade de equipamentos;

- b) Ao prazo disponível para realização da medição;
- c) Às características físicas do curso d'água em estudo.

Os diversos métodos e equipamentos de medição de velocidade de escoamentos possuem suas vantagens e desvantagens, de acordo com as condições gerais e necessidades em relação aos resultados. A seguir são apresentados alguns métodos de medições e suas características.

3.2.1 Flutuador

O método do flutuador é um modo de se estimar a velocidade, a partir do tempo de deslocamento de um objeto flutuante num determinado trecho de comprimento conhecido do rio. Destaca-se pelo baixo custo e pela simplicidade, sendo muito utilizado em situações onde não se dispõe de equipamentos sofisticados de medição. Esse método possui a desvantagem de não ser tão preciso quando comparados aos equipamentos tradicionais de medição (ALMEIDA *et al.*, 2010).

Caracteriza-se também por não ser automatizável, ou seja, exige mão de obra no local da medição, não proporciona registros contínuos e a repetição periódica das medições implica em custos de mão de obra e de deslocamento da equipe que podem tornar-se proibitivos; portanto, não é viável para monitoramento contínuo.

3.2.2 Vertedouro

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995), o método do vertedor ou vertedouro consiste na instalação de um dispositivo que contém uma abertura, para que o fluxo de água passe. Desta forma, a vazão é calculada a partir da carga hidráulica no vertedor.

Os vertedouros triangulares apresentam maior precisão em vazões menores que 30 litros por segundo, contudo para vazões acima de 300 litros por segundo é indicado os vertedouros retangulares. Como vantagens da utilização deste método pode-se citar a sua facilidade de instalação, a precisão dos resultados e por se tratar de um método econômico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995). Acrescenta-se como vantagem deste método a possibilidade de automação das leituras, permitindo o monitoramento contínuo de vazão.

Segundo Garcez (1988), problemas como erosão, assoreamento a montante do dispositivo e inundações consequentes da elevação do nível da água são as maiores dificuldades enfrentadas pela medição de vazão com vertedouros.

3.2.3 Mecânicos

Segundo Carvalho (2008), os molinetes são equipamentos mecânicos que determinam a velocidade do fluxo relacionando a quantidade de voltas que a hélice do equipamento rotaciona, sob influência da translação do fluxo de água num determinado intervalo de tempo. Este processo gera a “equação do molinete” que é exclusiva de cada equipamento e é fornecida e calibrada pelo fabricante. Essa calibração pode ser realizada por laboratórios especializados e deve ser refeita periodicamente, por conta do desgaste da hélice e do rolamento interno que pode afetar a precisão da medição.

As medições utilizando molinetes são restritas em velocidades de corrente inferiores a 0,2 metros por segundo e altura de nível d’água superior a 0,30 metros (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995).

Os molinetes mecânicos não permitem o monitoramento contínuo, em geral são usados para medições em dados instantes de tempo, por isso são usados para conferir e aferir as chamadas curvas-chave, que relacionam a vazão ao nível da água. As Figuras 2 e 3 apresentam o molinete hidrométrico.

Figura 2 - Molinete Hidrométrico



Fonte: Hidromec (2019).

Figura 3 - Kit Operacional do Molinete Hidrométrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os micromolinetes possuem o mesmo conceito de funcionamento do molinete, porém é utilizado para rios de baixas velocidades médias. As Figuras 4 e 5 apresentam as características do micromolinete hidrométrico.

Figura 4 - Micromolinete Hidrométrico



Fonte: Hidromec (2019).

Figura 5 - Kit Operacional do Micromolinete Hidrométrico



Fonte: Medir Comércio e Serviços de Aparelhos de Medição Eireli (2019).

3.2.4 Hidroacústicos

Como descrito no trabalho de Simpson (2002), as evoluções na tecnologia e na eletrônica contribuíram para o desenvolvimento de uma nova geração de instrumentos de medição no campo da hidrometria. Como exemplo dessa nova geração, os instrumentos hidroacústicos causaram efeitos notáveis em como as medições de fluxo são realizadas.

A implantação de perfiladores acústicos de correntes por efeito Doppler (ADCP) foi uma das inovações mais importantes das últimas décadas, a qual permitiu medir perfis de velocidade da água usando ondas sonoras através da variação na frequência de uma fonte de sinais acústicos, de modo que refletem os materiais suspensos e relacionam as relativas velocidades da fonte e do observador movendo-se longitudinalmente junto com a água. O ADCP basicamente divide a seção da coluna d'água em fatias que são chamadas de células de profundidade e calcula a velocidade das partículas por meio do Desvio Doppler, posteriormente usa a média ponderada das velocidades medidas em cada célula para atribuir a velocidade e a direção do fluxo ao centro das células de profundidade no eixo vertical do rio.

De certa forma, a velocidade no centro das células de profundidade pode ser comparada às medições de velocidades pontuais de equipamentos mecânicos convencionais posicionados ao longo da seção vertical do rio. Entretanto, essa comparação não é perfeita, pois os medidores convencionais calculam a velocidade em pontos individuais da coluna d'água, enquanto o ADCP mede as velocidades e atribui para o centro das células de profundidade individualmente através da média ponderada das velocidades medidas. A Figura 6 retrata os diferentes tipos de Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP).

Figura 6 – Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)



Fonte: Dan Rowe (2020).

Conforme os estudos de Hirsch e Costa (2004), os equipamentos mecânicos convencionais de medição são inadequados ou apresentam incertezas em certos ambientes, como em fluxos afetados por marés, fluxos altamente instáveis e fluxos de inundações. Diferentemente destes medidores, o ADCP realiza uma medição contínua da velocidade da água e, enquanto estes medidores assumem uma distribuição de velocidade vertical, ele mede para todo o leito próximo e perto da superfície apresentando resultados mais precisos do fluxo. Além disso, também executa medições em três dimensões do campo de fluxo do rio, o que contribui para um reconhecimento com maior precisão e detalhamento da estrutura do fluxo e dos perfis de velocidade.

O método de efeito Doppler não consiste somente em ADCPs grandes, atualmente existem ADCPs portáteis e sondas de pequeno tamanho para utilização em medição a vau, com medições locais de velocidade, tanto com o efeito Doppler como por campo eletromagnético, que permitem a medição em baixas velocidades.

3.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO POR ANEMOMETRIA

O método de medir a velocidade de um escoamento por transferência de calor é uma aplicação da anemometria que consiste numa técnica de medição comprovada em laboratório, que emprega o uso de sondas de fio ou filme quente que são aquecidas por uma corrente e realizam transferência de calor com o meio do fluxo.

Conforme Dalola (2012), os equipamentos de medição de vazão que aplicam o conceito de transferência de calor podem alcançar alta sensibilidade e, combinados a circuitos integrados, permitem a interação com sistemas inteligentes e apresentam baixo custo de consumo e produção.

A relação da velocidade com o coeficiente de transferência de calor dissipado é dependente das propriedades do fluido, como densidade, viscosidade, calor específico, condução térmica, etc. As características do escoamento também exercem influência na medição, como a temperatura, velocidade e pressão (EGUTI, 2005).

Segundo os estudos de Comte-Bellot (1976), Maciel e Dall'Aglio Sobrinho (1994) e Bruun (1995) é comum a utilização destes dispositivos para obtenção de informações sobre fluxos, principalmente em gases e fluidos com níveis de turbulência baixo e moderado. As sondas de fio quente possuem um sensor bem pequeno que fica exposto ao meio e são usadas convencionalmente para medições em gases. As sondas de filme quente são utilizadas em fluidos, devido serem mais robustas e com isso possuírem uma resistência mecânica maior. Quando aquecidos por uma corrente e resfriados pela exposição ao movimento do fluido, ocorrem variações na resistência elétrica e, por meio da calibração da sonda, permite a obtenção de velocidade.

Em geral, anemômetros de fio e filme quente são capazes de detectar a variação da temperatura do fluido e são usados para medir a velocidade média do escoamento e suas flutuações. Este tipo de equipamento tem sua utilização limitada a fluidos isentos de contaminação, com baixos gradientes de temperatura em escoamentos laminares. (EGUTI, 2005).

Outros fatores também afetam o seu funcionamento, como as variedades das características de composição da água e a formação de biofilmes na sonda, pois causam variação na calibração em relação ao tempo.

A formação de biofilmes se deve pelo contato da superfície com bactérias contidas no meio, formando um material plantônico. O seu desenvolvimento leva à colonização da superfície, o que pode conduzir à bioincrustação ou biodeterioração da superfície (LAMON, 2020).

Devido à alta sensibilidade à variação de temperatura, os sensores térmicos NTC contemplando um dos braços de uma Ponte de Wheastone apresentam resistência mecânica e possuem estabilidade, sendo alternativas atrativas para medições de baixas velocidades médias de água (MACIEL; DALL'AGLIO SOBRINHO, 1994).

Os sensores térmicos NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient) são componentes que relacionam a resistência elétrica, conforme a variação da temperatura. No caso do sensor térmico NTC, a resistência elétrica do sensor diminui quando a temperatura aumenta. Esses sensores possuem diversas aplicações, por conta do seu baixo custo, pela facilidade de manuseio e por permitir o uso em circuitos simples, podendo acionar comparadores de tensões (WENDLING, 2010). Na Figura 7 pode-se observar alguns sensores do tipo NTC.

Figura 7 - Sensores NTC



Fonte: Wendling (2010).

O trabalho de Maciel e Dall’Aglio Sobrinho (1994) afirma que os sensores NTC são calibrados a partir da relação de várias temperaturas com a resistência das sondas, obtendo-se a Curva de Calibração que permite equacionar as leituras dos sensores com a temperatura da água.

Esta técnica reúne as vantagens da anemometria por transferência de calor e possibilita o uso em águas de qualquer natureza, porém as curvas de calibração variam com a temperatura da água e, a partir do aquecimento usando um resistor não linear sob corrente constante, este processo apresenta dificuldades no aquecimento feito de modo online, devido à grande capacidade térmica da água, necessitando de uma potência relativamente alta para o aquecimento.

Uma técnica alternativa é a advecção de traçadores, pois seriam imunes às variações de temperatura e à composição do meio aquático, bem como ao crescimento de filmes aderidos à sonda.

O método de advecção para medir velocidade pode ser feito com diversos traçadores, como calor, corantes, ácidos, bolhas de hidrogênio e também o sal, que foi utilizado nos trabalhos de Ruggeri (2002), Milanese (2002) e Martins Jr. (2005). Esta técnica possui variados fins, pois também se aplica em medições de baixas velocidades, como por exemplo, na determinação de velocidade da seiva de uma

árvore, por meio da inserção de sensores no xilema das árvores, a fim de mensurar a evapotranspiração.

3.4 DIFICULDADES NO MONITORAMENTO E CONTROLE DE OUTORGA

Segundo Carolo (2007), para obtenção da outorga pelo órgão gestor de recursos hídricos, é necessário avaliar a compatibilidade entre as demandas hídricas existentes e a disponibilidade hídrica do corpo d'água, tendo em vista as finalidades do uso e o impacto nos recursos hídricos.

Para exercerem de fato o controle dos usos outorgados, é imprescindível que os dados informados pelos outorgados aos órgãos gestores sejam confiáveis, sendo necessária a definição da adequabilidade na instalação, operação e manutenção dos equipamentos e sistemas de medição de vazão. Apesar das exigências dos órgãos gestores, na maioria dos casos não há uma legislação específica e as obrigatoriedades são flexibilizadas pelos órgãos gestores. Quando exigidas, como na fiscalização da ANA, o cumprimento das condições estabelecidas fica a critério da interpretação de um fiscal, tendo em vista que não há uma norma definida pela instituição (PIAU, 2016).

Ainda os estudos de Piau (2016), somente CE, MG e DF regulamentam de forma breve quais os tipos de medidores devem ser instalados pelos usuários, porém sem aprofundamento da questão. Como exceção, pode-se citar o Estado do Ceará que possui um medidor volumétrico pré-estabelecido pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), porém se for da vontade do usuário instalar outro tipo de medidor, também não há norma que estabeleça qual o equipamento adequado a se instalar.

Entretanto o tema é mais complexo, uma vez que diversas variáveis podem influenciar nos resultados e no método de medição mais adequado para cada usuário, podendo citar como exemplos:

- i. À forma da adução da água, podendo ser uma superfície livre ou tubulação fechada;

- ii. Ao tipo de água, como água bruta ou tratada;
- iii. Ao preço do equipamento, dependendo da precisão, tecnologia e diâmetro da tubulação;
- iv. À possibilidade de automação das leituras e monitoramento contínuo;
- v. À precisão de medida, ou seja, o grau de refinamento da medição e seu resultado;
- vi. À forma de instalação do equipamento e o conhecimento técnico necessário para operação de medição.

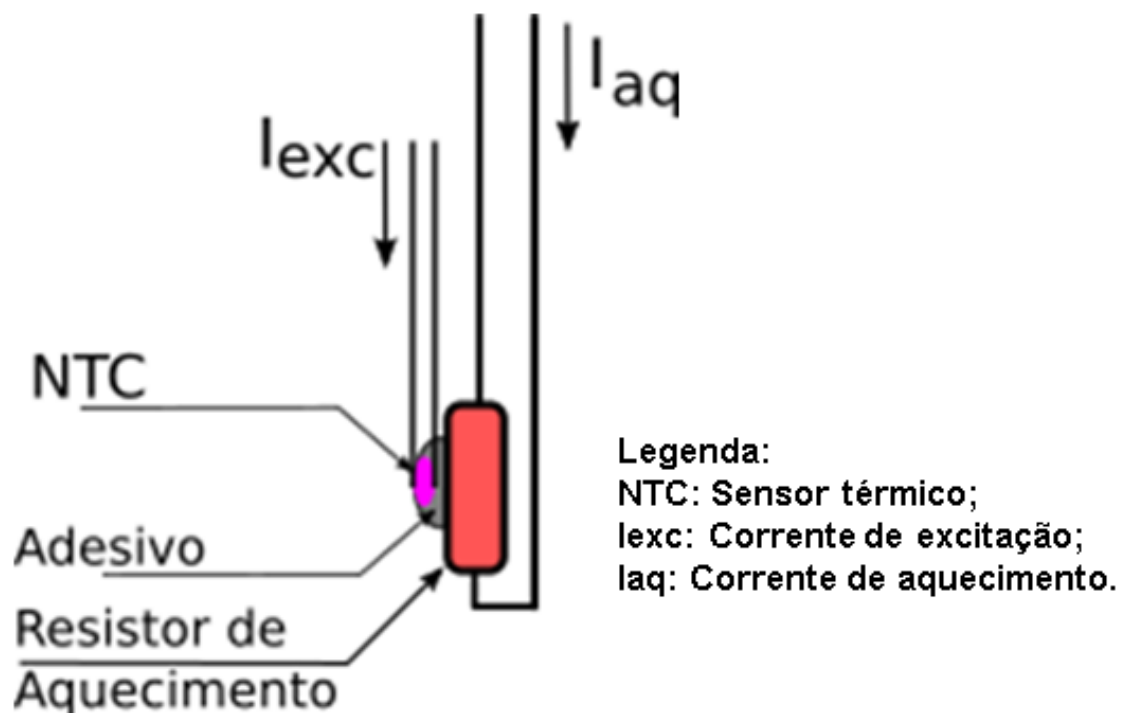
As consequências são inúmeras da captação de água maior do que a informada ao órgão gestor ou sem controle do uso, podendo comprometer a disponibilidade da água aos usuários a jusante e as condições dos recursos hídricos.

4 METODOLOGIA

4.1 SONDA CONVECTIVA E CONDICIONAMENTO DO SINAL

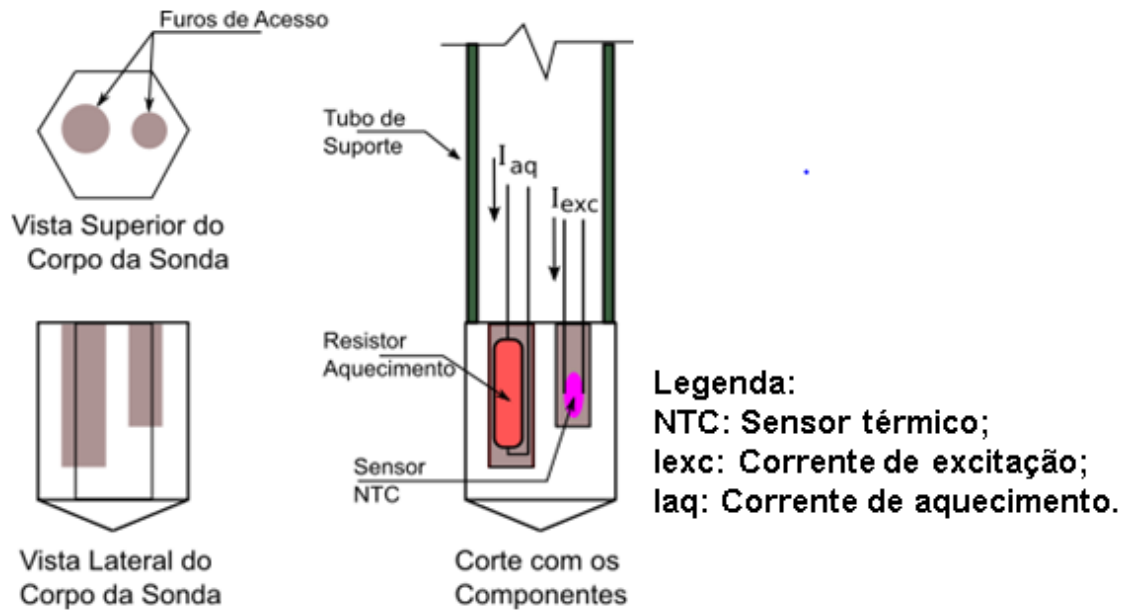
A sonda convectiva baseia-se na variação do coeficiente de transferência de calor por convecção com a velocidade do fluido. A sonda é construída por um resistor atuando como fonte de calor e um termistor NTC atuando como sensor da temperatura atingida. Foram testadas duas configurações da sonda convectiva, ambas com fonte de calor concentrada, construída com resistores comerciais. Na primeira configuração, conforme esquema da Figura 8, o sensor de temperatura foi fixado ao resistor por meio de cola epóxi, que garantiu o contato térmico. Na segunda configuração construtiva testada, mostrada no esquema da Figura 9, o resistor e o sensor de temperatura foram instalados num corpo metálico para proteção mecânica, uniformização da temperatura e aumento da superfície de contato com o fluido.

Figura 8 – Sonda com fonte concentrada de calor e sensor de temperatura justapostos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 9 – Sonda com fonte de calor concentrada com dois componentes em encapsulamento metálico

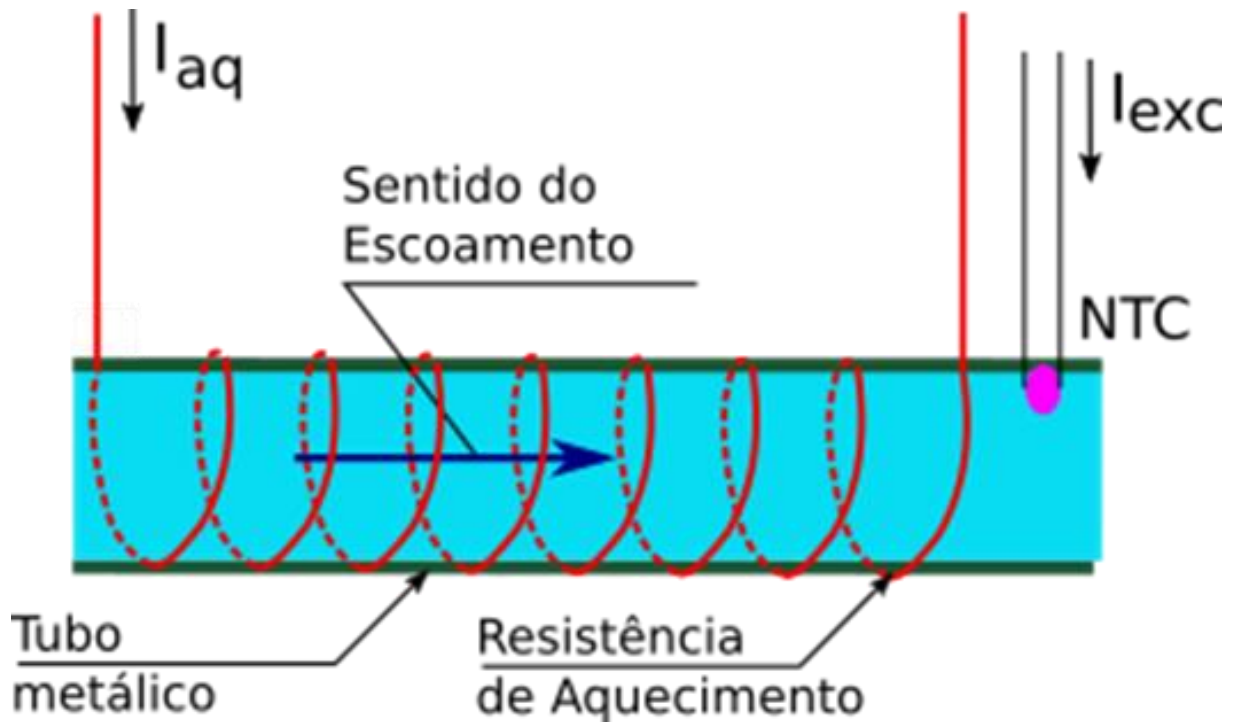


Fonte: Adaptado de Cortez e Dall'Aglio Sobrinho (1996).

Na sonda encapsulada mostrada no esquema da Figura 9, o contato entre a fonte de calor e o sensor de temperatura é garantido pela montagem num invólucro metálico adequado, por meio de furos de acesso, preenchidos com adesivo de alta condutividade térmica usado normalmente em encapsulamento de componentes eletrônicos.

Além disso, pode-se imaginar outras configurações com fonte de calor distribuída, com uma resistência elétrica enrolada externamente a um tubo metálico, pelo interior do qual passaria o fluxo a ser medido, conforme idealizado na Figura 10.

Figura 10 – Sonda com fonte de calor concentrada com resistência ao longo do tubo do medidor



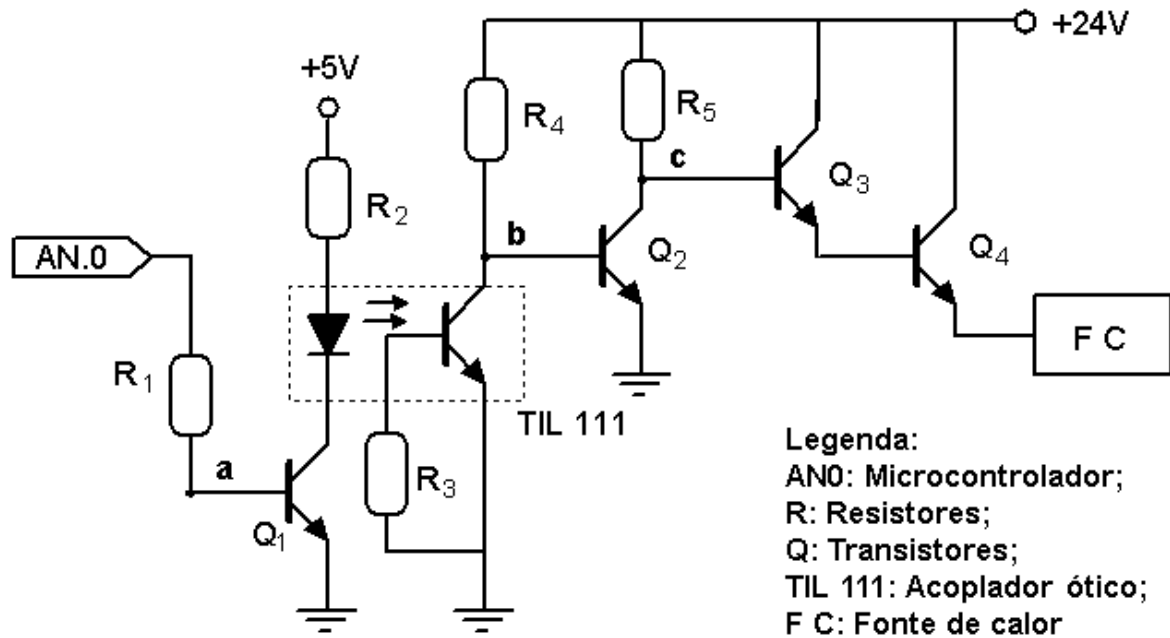
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A resistência seria construída com fio de “NiCr” enrolado em espiral na parede externa do tubo, isolada eletricamente por uma camada de verniz. Desta forma, o fio de aquecimento ficaria protegido com uma camada de revestimento plástico, não mostrada na Figura 10, que também proporcionaria isolamento térmico. Assim, todo o calor gerado seria dissipado pela água na seção de medição. A seção de medição é interna ao tubo. O termistor atuando como sensor de temperatura pode ser montado para medir a temperatura da parede do tubo ou diretamente em contato com a água. Esta configuração não foi testada neste trabalho por limitações materiais. A configuração distribuída foi adotada em um protótipo, mas não pode ser ensaiada, devido às limitações materiais de acesso ao laboratório. Os esquemas das sondas convectivas empregadas são apresentados a seguir:

O aquecimento é proporcionado por uma fonte de tensão constante comandada pelo microcontrolador dedicado que alimenta o resistor com a corrente de aquecimento “ I_{aq} ”. Será utilizado neste trabalho o circuito de aquecimento similar ao proposto na Figura 11. A leitura das temperaturas é efetuada, por meio de

condicionamento do sinal gerado a partir da alimentação do NTC com uma corrente de excitação " I_{exc} ".

Figura 11 – Esquema elétrico dos circuitos de controle do aquecimento



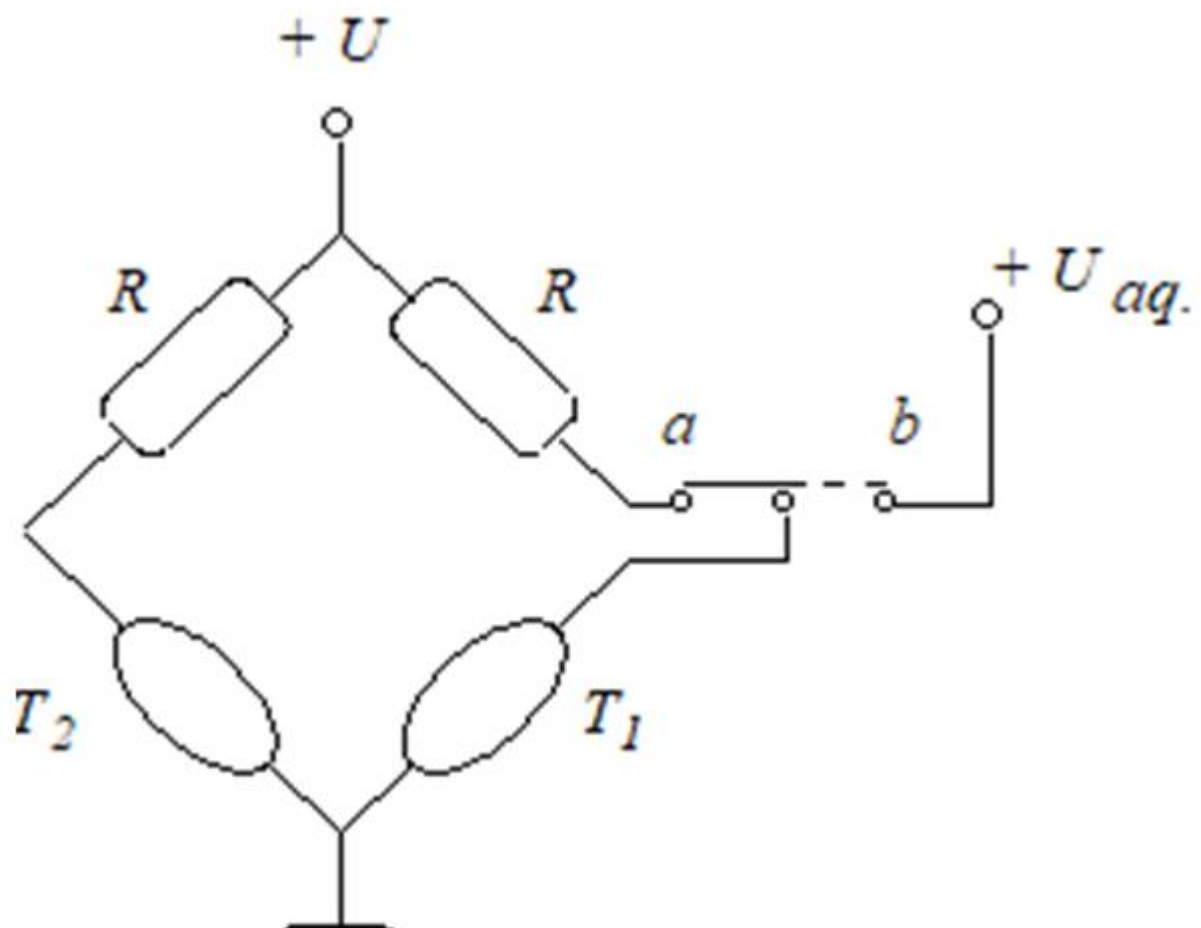
Fonte: Dall'Aglio Sobrinho e Roma (1989).

O circuito de controle do aquecimento mostrado na Figura 11 funciona, por meio do emprego de acopladores óticos para isolar o sinal de comando fornecido pelo microcontrolador da seção de potência. O sinal de controle enviado pelo microcontrolador é representado na Figura 11 pelo rótulo AN0. A corrente é amplificada pelo transistor Q_1 até um valor conveniente ao chaveamento do acoplador ótico TIL111, ou qualquer equivalente. Um acoplador ótico é composto de um LED (diodo emissor de luz) e de um fototransistor. Quando o diodo está aceso, o transistor entra em condução. Portanto, quando AN0 assume um valor alto, o transistor Q_1 conduz corrente, colocando o fototransistor em condução, significando que o ponto b fica com potencial nulo. Na ausência do sinal de comando em AN0, Q_1 não conduz corrente. Com isso o fototransistor também entra em corte, elevando o potencial no ponto b. É possível então variar a tensão no ponto b, por meio de mudança no estado do anunciador com completo isolamento elétrico entre os dois circuitos.

A partir do ponto b, e ainda usando o conceito de transistor funcionando como chave, verifica-se que Q_2 funciona como uma chave inversora do sinal, pois quando U_b é alto, U_c permanece no potencial terra e vice-versa. Os dois transistores restantes, Q_3 e Q_4 , estão em configuração Darlington. Por estar todo integrado, esta configuração permite que o circuito ganhe grande potencial de corrente. Em termos práticos, isto implica que quando o potencial em c é alto, há passagem de corrente para o circuito de potência da fonte de corrente. Ao final do período de aquecimento, o AN0 é levado ao nível lógico 0, o que, por meio dos sucessivos chaveamentos, interrompe a passagem de corrente de aquecimento.

Na Figura 12 pode-se observar o condicionamento do sinal do sensor NTC da sonda, por meio de uma ponte de Wheatstone.

Figura 12 – Condicionamento de sinal de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O sistema é alimentado por uma fonte elétrica de tensão controlada U_c e realiza as leituras de resistência do sensor NTC através do registro da tensão de desbalanceamento da ponte, " U_{ab} ". A tensão é dada em função das resistências pela Equação 1.

$$U_{ab} = U_c \left(\frac{R_2}{R+R_2} - \frac{R_T}{R+R_T} \right) \quad (1)$$

A ponte permite que as resistências do sensor sejam calculadas, a partir da leitura de tensão permitindo o uso do sistema de aquisição de dados nas observações. Outros esquemas de condicionamento poderão ser adotados conforme o desenvolvimento do equipamento. Nas fases iniciais as leituras serão manuais e será usado um multímetro, que permitirá ler diretamente o valor das resistências.

4.2 SONDA DE ADVECÇÃO DE CALOR E CONDICIONAMENTO DO SINAL

Foram estudados neste trabalho três tipos de sondas para atuar com base na advecção da onda de calor. Os três tipos construtivos básicos são apresentados esquematicamente nas Figuras 13, 14 e 15.

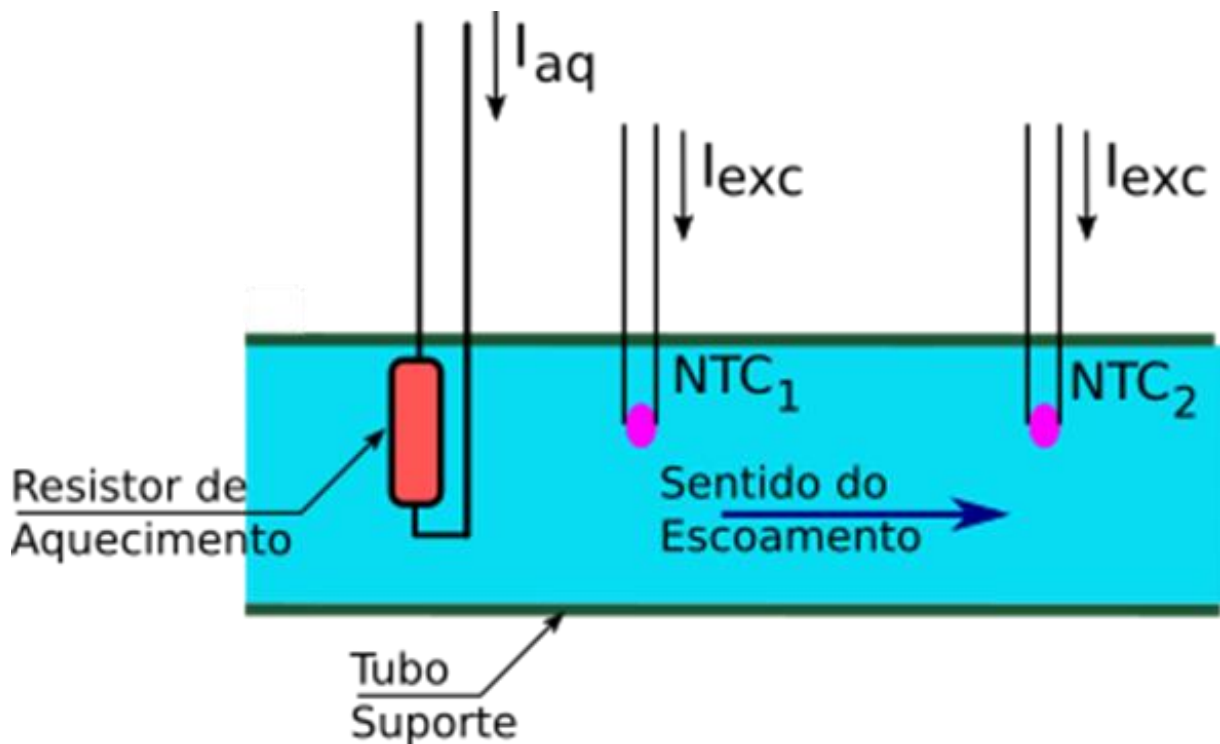
O primeiro tipo pode ser definido como sonda com aquecimento em linha, em que a onda de calor é produzida por meio de um resistor de aquecimento instalado no escoamento a ser medido. O segundo tipo ensaiado possui aquecimento em linha, porém a onda de calor foi gerada por uma resistência de aquecimento. O terceiro tipo testado utiliza a injeção de um pulso de água aquecida para gerar a onda de calor que será transportada (advecção) pelo fluxo a ser medido.

Os medidores com aquecimento em linha geram o pulso de calor pelo aquecimento da própria água do escoamento a ser medido, por meio da utilização de resistores como fonte de calor. A Figura 13 mostra um esquema construtivo da sonda advectiva com geração local da onda de calor por meio de uma fonte concentrada (resistor de aquecimento). A Figura 14 mostra que o mesmo princípio

pode ser usado com uma fonte de calor distribuída. A concepção de fonte distribuída foi concebida para permitir a transferência de maiores quantidades de calor para a água, devido à maior área de contato proporcionada.

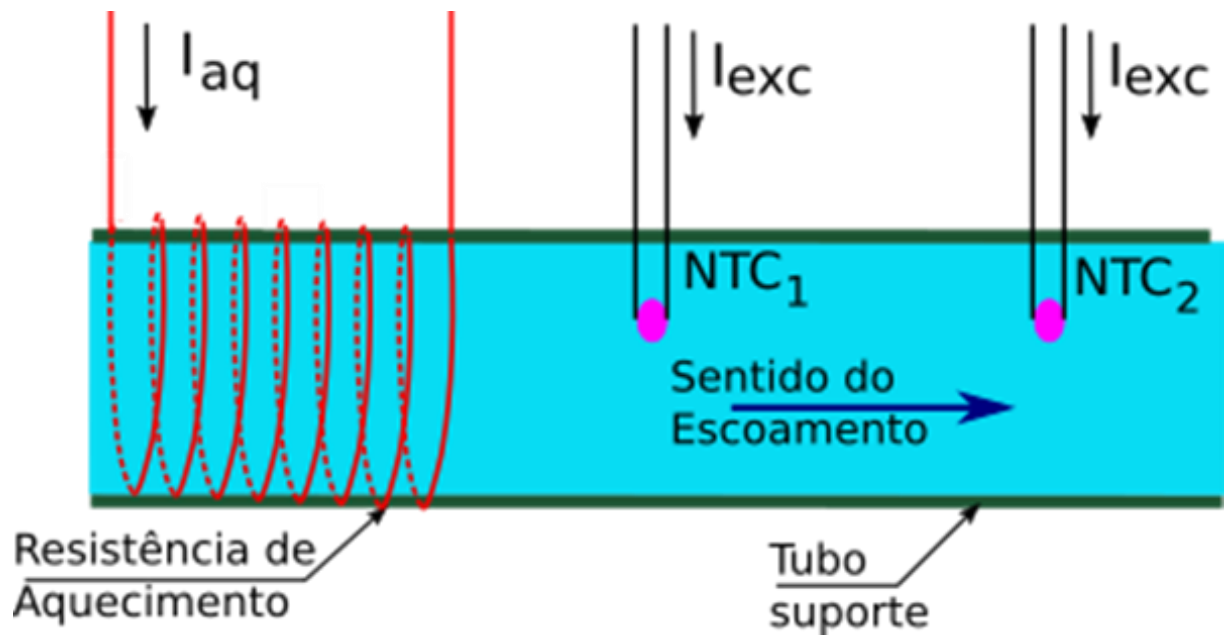
O funcionamento da medição com a injeção de água aquecida é mostrado esquematicamente na Figura 15. O processo de medição inicia-se com o aquecimento da água a ser empregada como traçador pelo acionamento da resistência elétrica. Após a água atingir a temperatura desejada é introduzido o pulso de água fria na câmara de aquecimento. A injeção do pulso desloca a água quente pela saída até a seção de medição de velocidade. Simultaneamente são registradas as temperaturas de forma contínua nos dois sensores.

Figura 13 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com aquecimento no próprio escoamento e fonte de calor concentrada



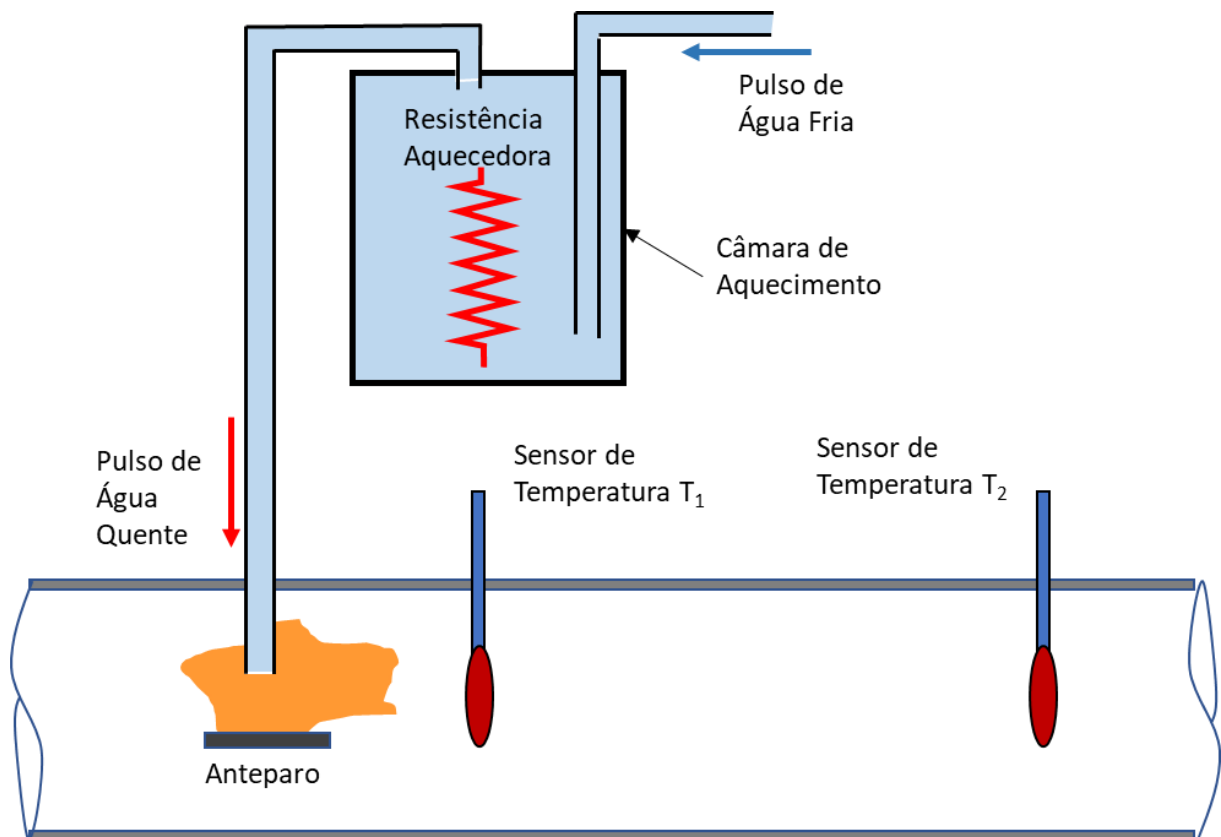
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 14 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com aquecimento no próprio escoamento e fonte de calor distribuída



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 15 – Esquema contrutivo da sonda de advectiva com injeção de água aquecida externamente ao escoamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

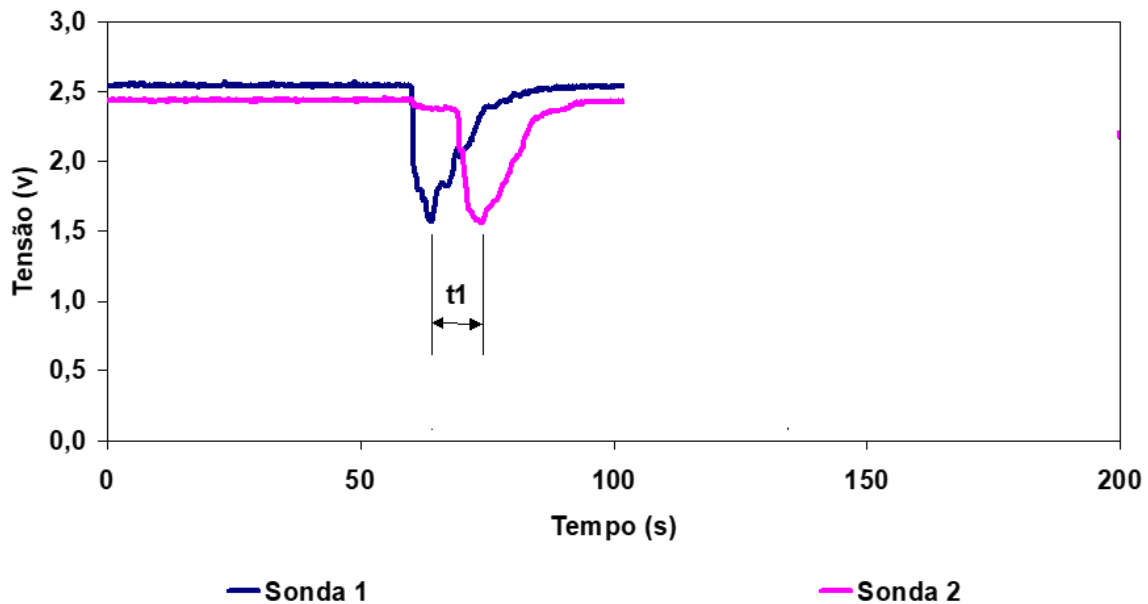
4.2.1 Medição da Velocidade

Com o uso de água quente como traçador com lançamento instantâneo, são determinadas as velocidades por meio da advecção da onda de traçador, conforme metodologia utilizada por Ruggeri (2002), Milanese (2002) e Martins Jr. (2005) com traçadores salinos em água.

O sistema de aquisição de dados coleta os valores de tensão em função do tempo gerando arquivos compatíveis com planilhas eletrônicas, que podem ser transformados em resistência, por meio da Equação 1 e posteriormente em temperatura com a equação de calibração “Resistência x Temperatura” de cada termistor.

Utilizando um programa de planilha eletrônica, os dados serão trabalhados a partir das curvas de tensão em função do tempo, conforme exemplo na Figura 16.

Figura 16 – Tensão em função do tempo durante ensaio com traçador



Fonte: Adaptado de Martins Jr. (2005).

Na Figura 16 pode-se observar o gráfico de tensão em função do tempo mostrando os picos que ocorrem quando a onda com maior temperatura passa pela sonda. Com uma distância pré-fixada entre as sondas e conhecendo o tempo que a onda leva para percorrer essa distância, obtém-se a velocidade do fluxo.

O tempo de percurso é determinado manualmente, por meio da análise do gráfico das leituras em função do tempo feita pelo operador. Para isso, deve-se posicionar o cursor nos picos de tempo do gráfico e verificar as coordenadas dos pontos correspondentes. Além de ser um método trabalhoso, os resultados podem ser subjetivos quando a onda de traçador não é bem definida.

Para superar essas dificuldades será adaptado um programa de correlação dos sinais das duas sondas, desenvolvido por Martins Jr. (2005). O programa apresenta como vantagens a diminuição do trabalho necessário e a eliminação da componente subjetiva da identificação visual do tempo de pico dos gráficos.

4.2.2 Determinação Automática dos Tempos de Percurso

Para determinar a velocidade em escoamento é comum o uso da correlação de dois elementos defasados no tempo, sendo possível a utilização de diversos princípios para geração destes elementos que se movem com o fluxo. Variadas substâncias podem atuar como traçadores numa série de realizações industriais, as quais podem estar inseridas no escoamento ou induzidas por meio de fontes externas, como as variações de temperatura, pressão, capacitâncias, entre outras (MYLROI; CALVERT, 1984).

A função da correlação dos elementos $R_{xy}(\tau)$ é retratada na Equação 2:

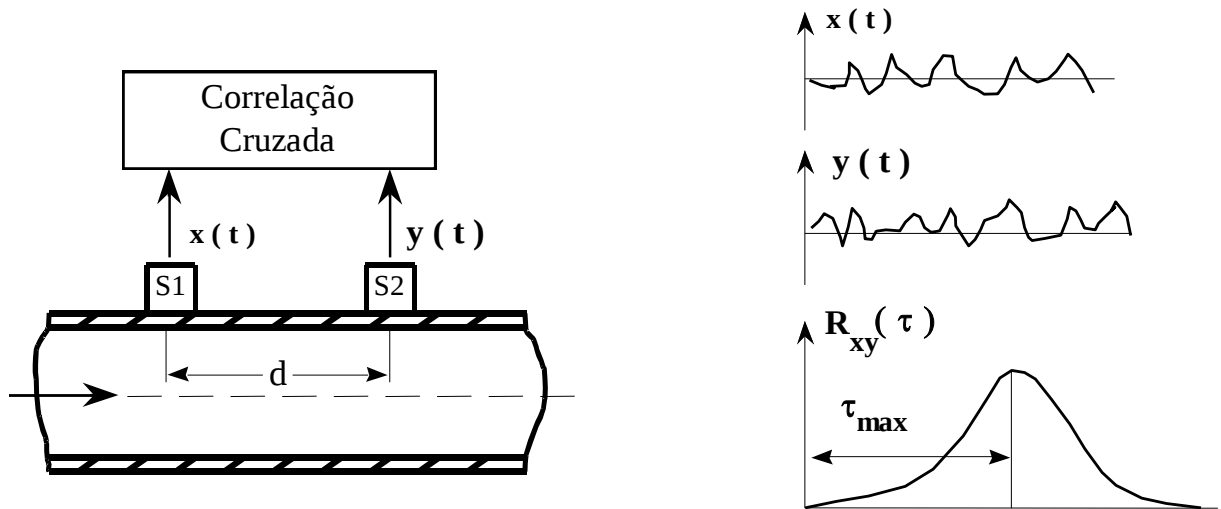
$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T x(t - \tau)y(t)dt \quad (2)$$

Onde:

- t : tempo de percurso entre as sondas;
- T : temperatura;
- τ : defasagem;
- x e y : sensores térmicos.

A função de correlação dos elementos $R_{xy}(\tau)$ apresenta um valor máximo dado por $R_{xy}(\tau_{\max})$, quando a defasagem τ é igual ao tempo de percurso entre as sondas (t), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Funcionamento da correlação cruzada na determinação da velocidade



Fonte: Adaptado de Mylroi e Calvert (1984).

A velocidade do fluxo pode ser estimada por meio da Equação 3, sendo “d” a distância entre os dois sensores.

$$v = \frac{d}{\tau_{max}} \quad (3)$$

A correlação entre as leituras a ser utilizada neste trabalho seguirá a proposta de Mylroi e Calvert (1984) , que utilizou uma função de correlação dada pela subtração dos valores das leituras efetuadas em tempos diferentes. Desta forma, considera-se ideal a correlação que corresponde ao valor mínimo entre a somatória dos valores absolutos dessas diferenças.

A velocidade do fluxo é determinada pela função de correlação cruzada dada pela Equação 4:

$$CorrAB^{(k)} = \frac{1}{(n-k)} \sum_{i=0}^{n-k} |A_i - B_{i+k}| \quad (4)$$

Sendo A e B vetores que contêm os dados de leituras das sondas de montante e jusante, respectivamente; n é o número de leituras utilizadas no cálculo e k a defasagem no tempo utilizada.

Pode-se dizer que, diferentemente do método tradicional que realiza a multiplicação dos sinais, essas funções executam numericamente a convolução com atraso “k” da diferença de leituras entre a sonda. Portanto, o atraso “k” deve ser adotado, de modo que minimize o valor da correlação. Para isso, “ k_{min} ” representa o número de leituras que minimiza a correlação entre A e B (CorrAB) para a determinação da velocidade. Esta função é dada na Equação 5:

$$k_{min} = k(\min(Corr^{(k)})) \quad (5)$$

Uma vez determinado o número de leituras de atraso, o tempo correspondente é função da frequência de aquisição dos dados como apresenta a Equação 6, onde “ f_{aq} ” representa a frequência de aquisição das leituras pelo tempo.

$$t = \frac{k_{min}}{f_{aq}} \quad (6)$$

4.3 CONDIÇÕES LABORATORIAIS E PROCESSAMENTO DE DADOS

O movimento “Do it Yourself” (DIY) é enraizado ao longo da sua história à comunidade científica amadora, entusiastas e hobistas, porém, conforme os estudos de Maxigas (2012) e Sarpong *et al.* (2020), há uma crescente quantidade de pesquisadores e cientistas profissionais que utilizam os denominados “hacklabs” ou “makerspaces”, ou seja, locais privados fora dos centros científicos para desenvolver seus projetos.

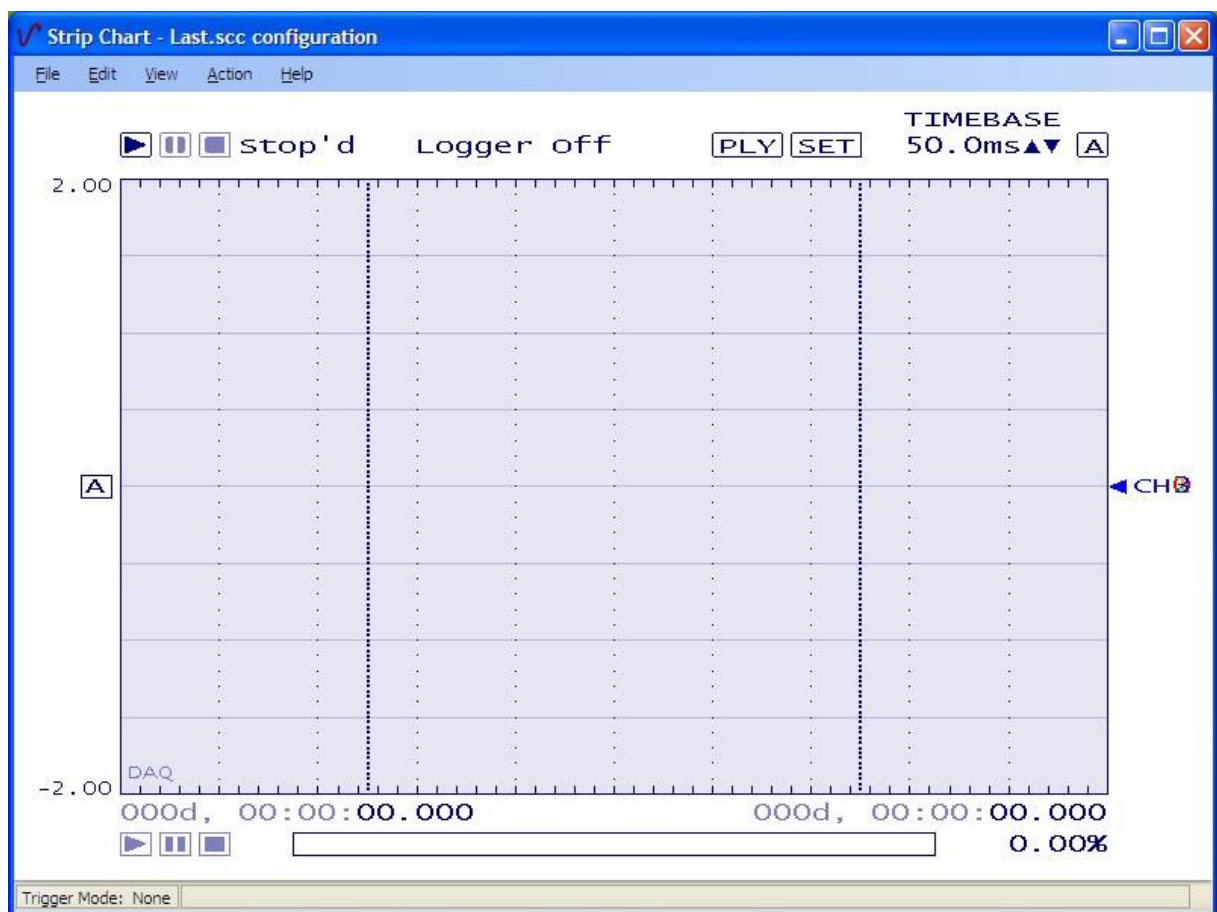
Seguindo a proposta do conceito “Faça você mesmo”, as condições laboratoriais desta pesquisa foram construídas, de acordo com as ferramentas, equipamentos e componentes disponíveis para o desenvolvimento. Primeiramente foi projetada uma estrutura de acrílico para que servisse de suporte para os sensores térmicos e o elemento aquecedor, de forma que houvesse o mínimo de interferência possível na medição. As medições iniciais de resistência dos sensores térmicos foram realizadas manualmente usando um multímetro digital.

Mediante as dificuldades enfrentadas, posteriormente foi construído um condutor fechado de escoamento em material PVC, no qual foi instalado o

dispositivo aquecedor e os sensores térmicos. A alimentação de água, por meio de bombas hidráulicas contribuiu para um controle mais eficaz da vazão e da velocidade. A fim de facilitar o manuseio dos dados, utilizou-se o software TracerDAQ desenvolvido pela Measurement Computing Corporation que é um modelo comercial de sistema de aquisição de dados dedicado comandado por uma interface USB.

Segundo a Measurement Computing Corporation (2021), o programa fornece aplicativos que permitem a exibição gráfica e armazenamento de dados de entrada e gera sinais de saída, por meio de instrumentos visuais. Os valores de tensão em função do tempo coletados pelo sistema geram arquivos com formatos compatíveis a planilhas eletrônicas que permite a comutação dos dados manualmente. A interface do software TracerDAQ pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Interface do software TracerDAQ



Fonte: Software Informer (2021).

5 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS E RESULTADOS

Para admitir o conceito da metodologia de sondas térmicas foi investigada a viabilidade das técnicas de advecção da onda de calor e do acréscimo de temperatura da sonda convectiva. O trabalho envolveu diversas etapas que serão abordadas, mas que podem ser divididas em teste da metodologia de advecção da onda de calor e testes das sondas convectivas.

Inicialmente foram realizados testes em laboratório com sensores NTC instalados num tubo em bancada que permitia a variação da vazão, para familiarização com os equipamentos da bancada experimental, com atividades descritas no item 5.1 denominado Pré-protótipo.

Paralelamente foi efetuada a compra de um kit básico da Eletrogate (2020), que contém vários componentes, com intuito de avaliar a construção do equipamento de medição de velocidade de baixo custo, com sistema de aquecimento, aquisição e processamento de dados automatizado.

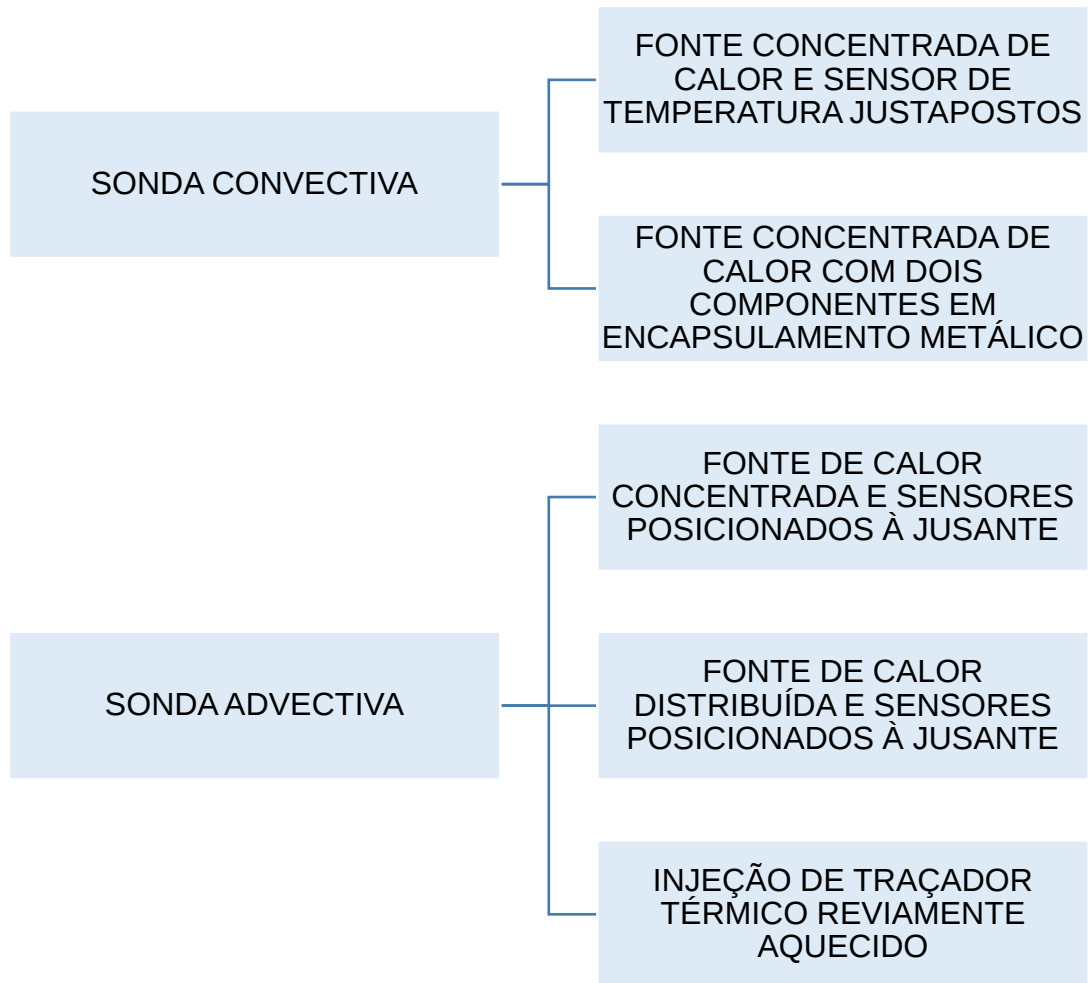
A seguir foram empreendidos testes de funcionamento do princípio de advecção da onda de calor, com duas configurações de sondas com fonte de calor concentrada. Denominados de Primeiro Protótipo, com as atividades descritas no item 5.2, e Segundo Protótipo, descrito no item 5.3.

O trabalho investigou também a configuração construtiva de fonte distribuída de calor, conforme descrito no item 5.4, para permitir a transferência de maior potência e a possibilidade prática da injeção de água aquecida para realização das leituras, conforme descrito no item 5.5.

Outra vertente do trabalho investigou o desempenho das sondas convectivas. No item 5.6 são descritos os primeiros trabalhos realizados com sondas construídas pela justaposição da fonte de calor e do sensor. Em vista dos resultados positivos foi testada a sonda com os componentes encapsulados em corpo metálico, conforme descrito no item 5.7.

Na Figura 19 pode-se observar o delineamento experimental e fluxo de eventos.

Figura 19 – Delineamento experimental e fluxo de eventos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1 PRÉ-PROTÓTIPO

Um pré-protótipo foi produzido para poder interpretar o comportamento dos componentes selecionados para produção do equipamento final.

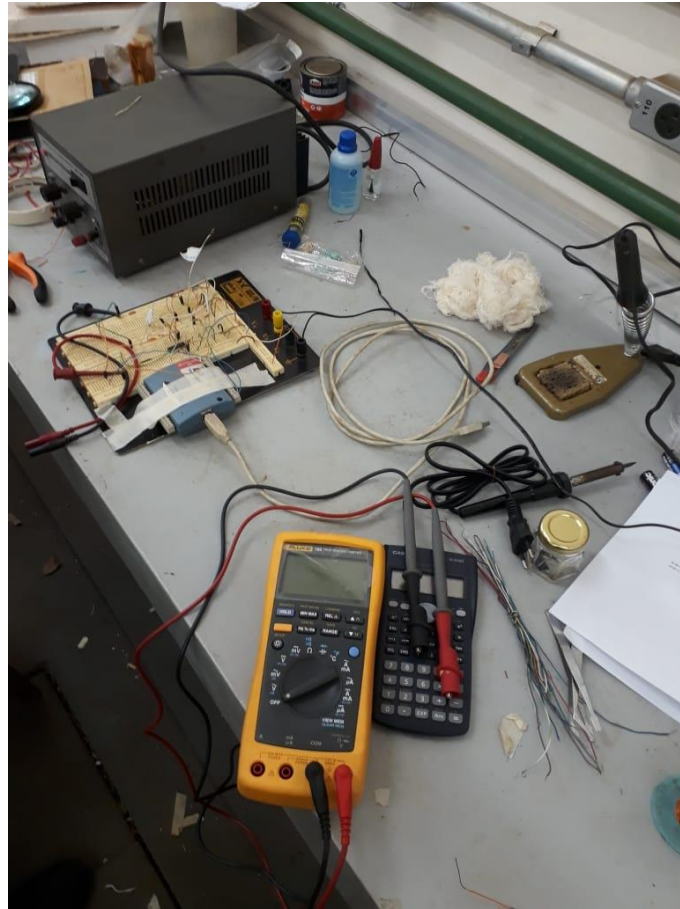
5.1.1 Montagem da Ponte de Wheastone

O sistema foi alimentado por uma fonte elétrica de tensão regulável e as leituras de tensão dos termistores foram realizadas, por meio do registro de desbalanceamento da ponte “ U_{ab} ” (Figura 8), com auxílio de um computador utilizando um sistema comercial de aquisição de dados da Measurement Computing,

comandado por uma interface USB e um software de aquisição dedicado, o TracerDAQ.

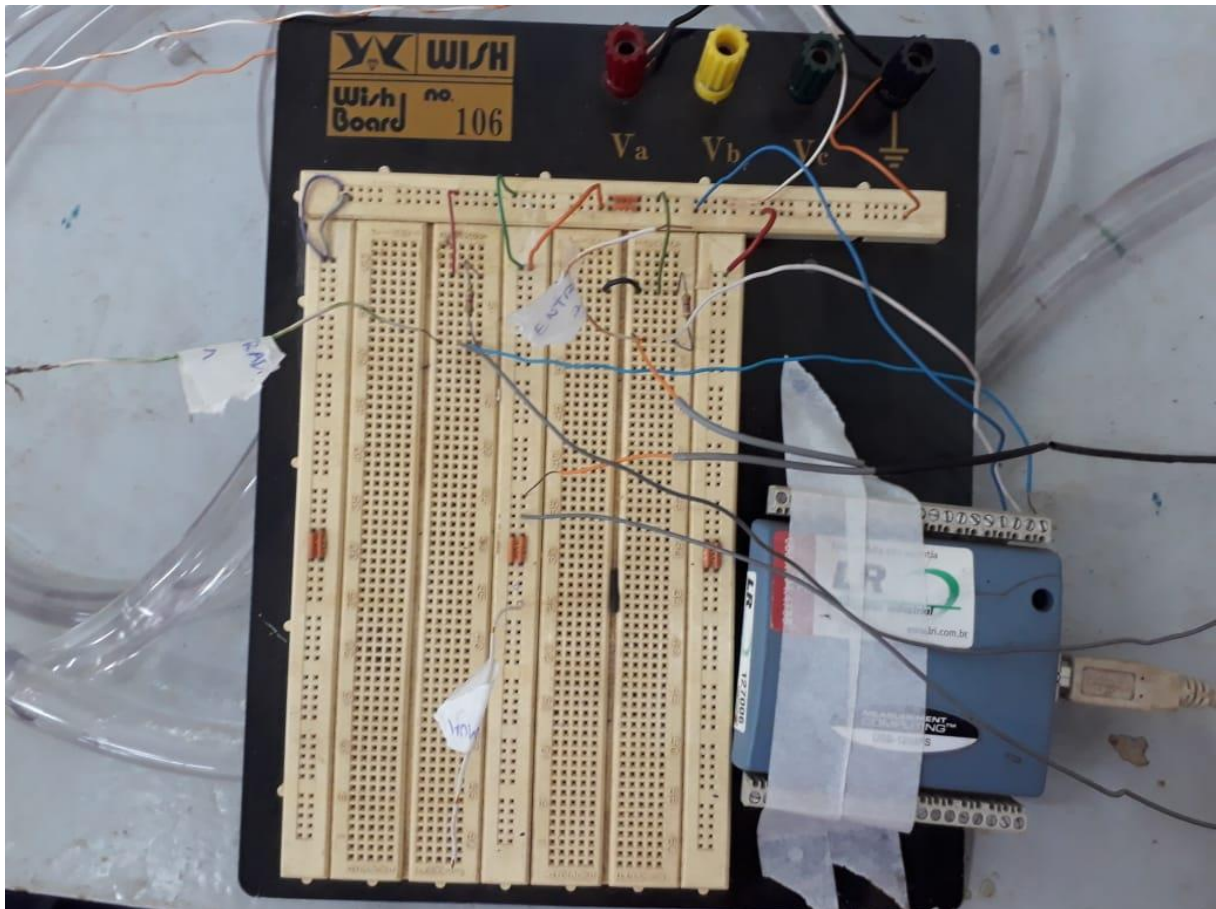
Os dados obtidos pela relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo permitem relacionar a variação de temperatura da água medida pelos sensores térmicos com as suas respectivas resistências, mediante a montagem da Ponte de Wheatstone em uma protoboard (Figuras 20 e 21).

Figura 20 - Montagem do sistema de Ponte de Wheastone



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 21 - Sistema de Ponte de Wheastone

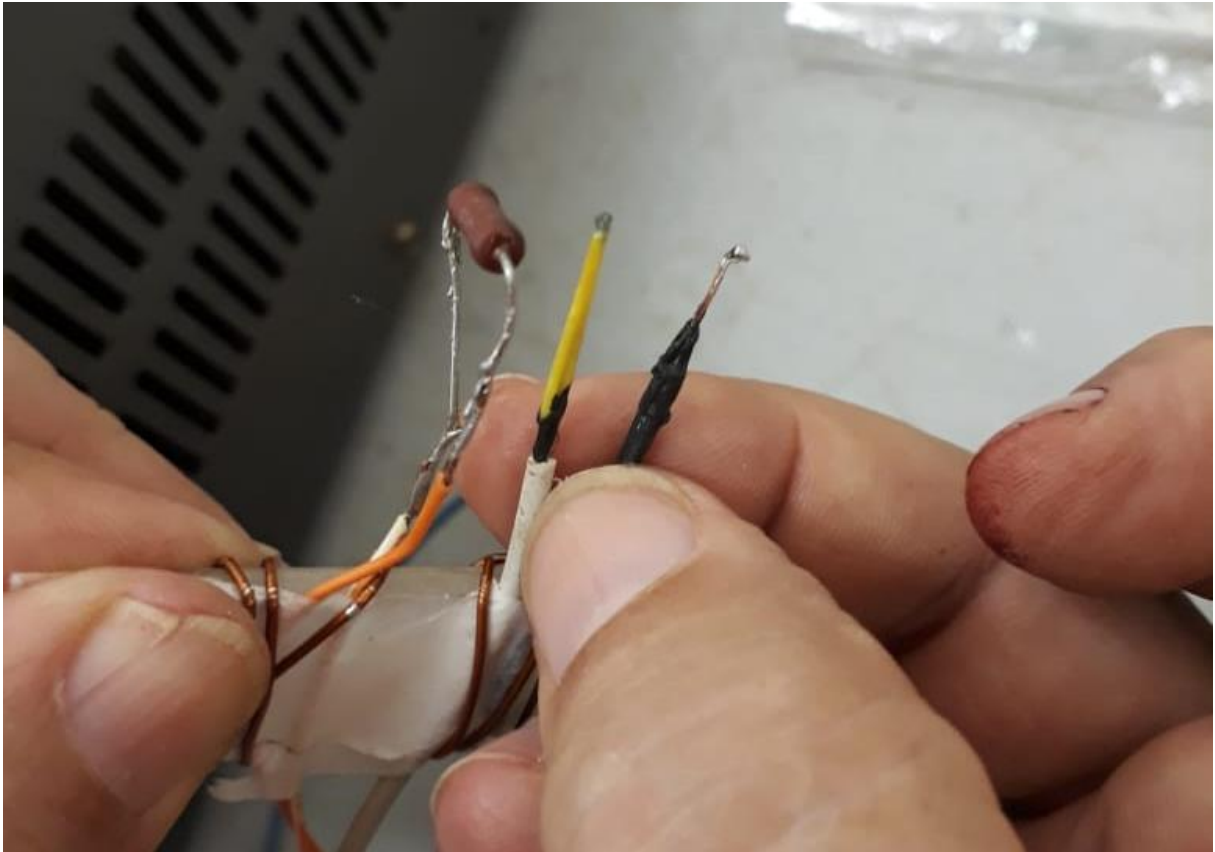


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.1.2 Testagem do Pré-Protótipo em Recipiente com Água Parada

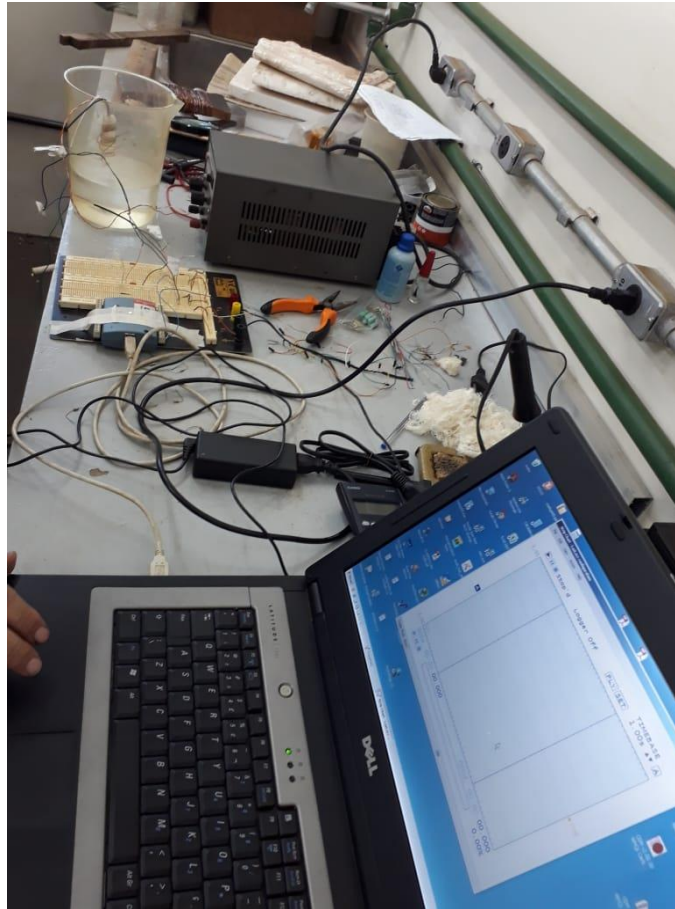
O pré-protótipo foi testado em laboratório aplicando pulsos de calor, a fim de verificar a detecção pelos sensores de temperatura utilizando um resistor para aquecimento da água de um recipiente com água parada e posicionando os sensores térmicos em sequência ao resistor elétrico (Figuras 22 e 23).

Figura 22 - Posicionamento das sondas térmicas para realização do teste do pré-protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 23 - Testagem do pré-protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.1.3 Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do Pré-Protótipo

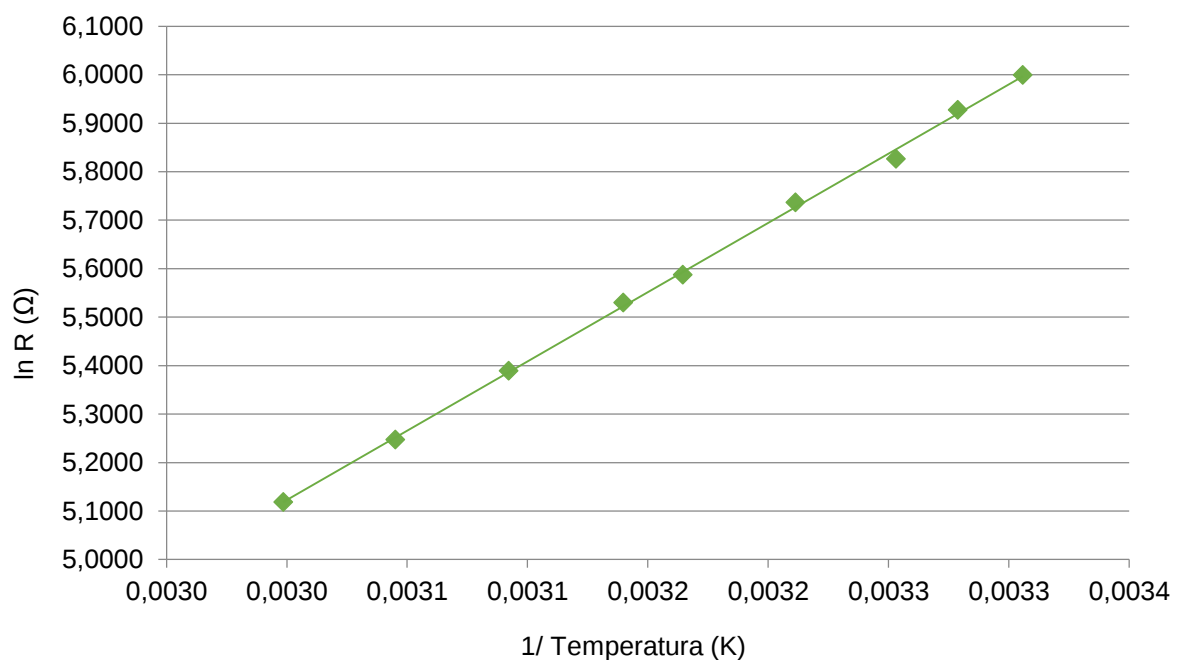
A primeira etapa de experimentos baseou-se elaboração do gráfico correspondente à relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do Pré-Protótipo. Em banho térmico com água e utilizando um termômetro de vidro com mercúrio com 0,1 °C de resolução como padrão de temperatura, a resistência dos sensores foi medida por meio de um multímetro digital. Na Tabela 1 e na Figura 24 pode-se observar os dados obtidos no teste da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) da sonda térmica.

Tabela 1 - Dados da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo

Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	1/Temperatura (K)	Ln R (Ω)
29,5	403	0,0033	5,9989
32	375	0,0033	5,9269
34,4	339	0,0033	5,8260
38,4	310	0,0032	5,7366
43	267	0,0032	5,5872
45,5	252	0,0031	5,5294
50,4	219	0,0031	5,3891
55,4	190	0,0030	5,2470
60,5	167	0,0030	5,1180

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 24 - Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo identificou os pulsos de calor emitidos pelo resistor e possibilitou a obtenção da Equação 7, a qual permite calcular a temperatura medida pelas sondas térmicas, por meio das leituras de resistência das sondas térmicas.

$$y = 2859,1x - 3,4549 \quad (7)$$

5.1.4 Verificação do Erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do Pré-Protótipo

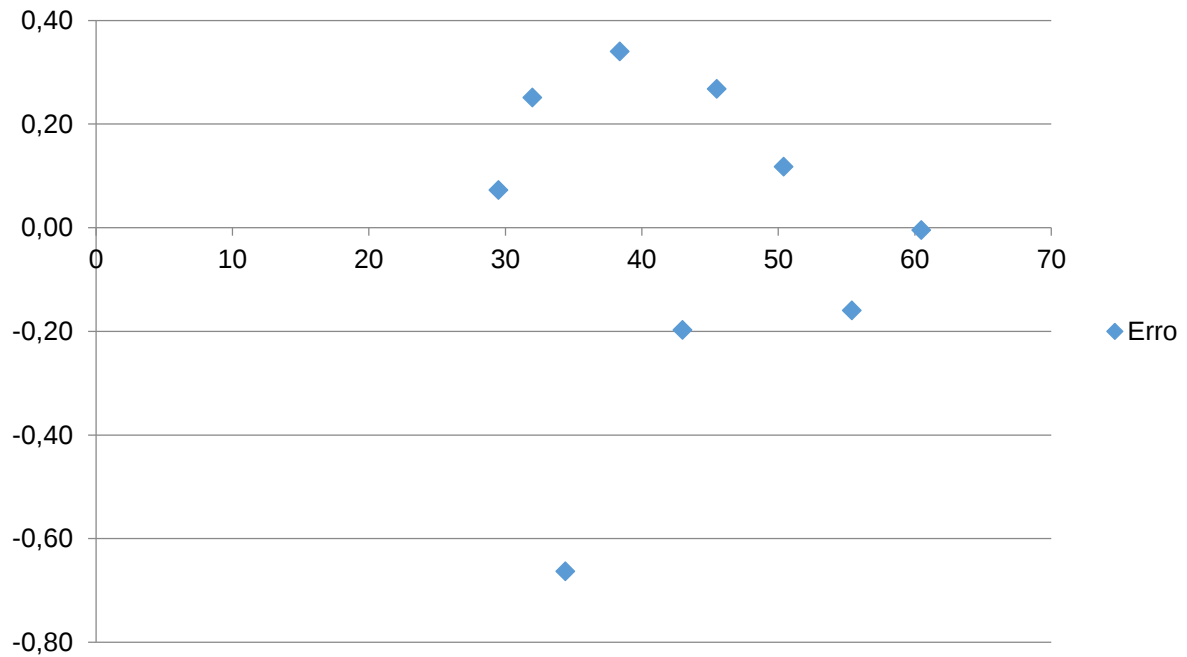
A verificação de margem de erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) da sonda térmica do pré-protótipo foi efetuada para verificação da qualidade dos dados obtidos. Foi elaborado um gráfico que compara a variação temperatura medida pelo termômetro de mercúrio no teste de calibração das sondas com a temperatura resultante da Equação 2 do gráfico da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K), em relação à medição de resistência dos sensores térmicos. Na Tabela 2 pode-se observar os dados utilizados para a obtenção do gráfico que demonstra o erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico do pré-protótipo, apresentado na Figura 25.

Tabela 2 - Dados da Gráfico de erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo

Ln R (Ω)	Temperatura Medida (°C)	Temperatura Resultante (°C)	Erro
6,00	29,50	29,43	0,07
5,93	32,00	31,75	0,25
5,83	34,40	35,06	-0,66
5,74	38,40	38,06	0,34
5,59	43,00	43,20	-0,20
5,53	45,50	45,23	0,27
5,39	50,40	50,28	0,12
5,25	55,40	55,56	-0,16
5,12	60,50	60,50	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 25 - Erro da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC do pré-protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2 PRIMEIRO PROTÓTIPO

5.2.1 Construção do Primeiro Protótipo

A proposta desta etapa foi construir um suporte para os componentes do pré-protótipo, de forma que ficassem instalados em sequência e a uma distância pré-adotada entre si com uma vedação que impedisse os vazamentos. Na Figura 26 pode-se observar a instalação dos componentes no suporte de acrílico.

Figura 26 - Posicionamento das sondas térmicas para realização do teste do pré-protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2.2 Testagem do Primeiro Protótipo em Fluxo Contínuo de Água

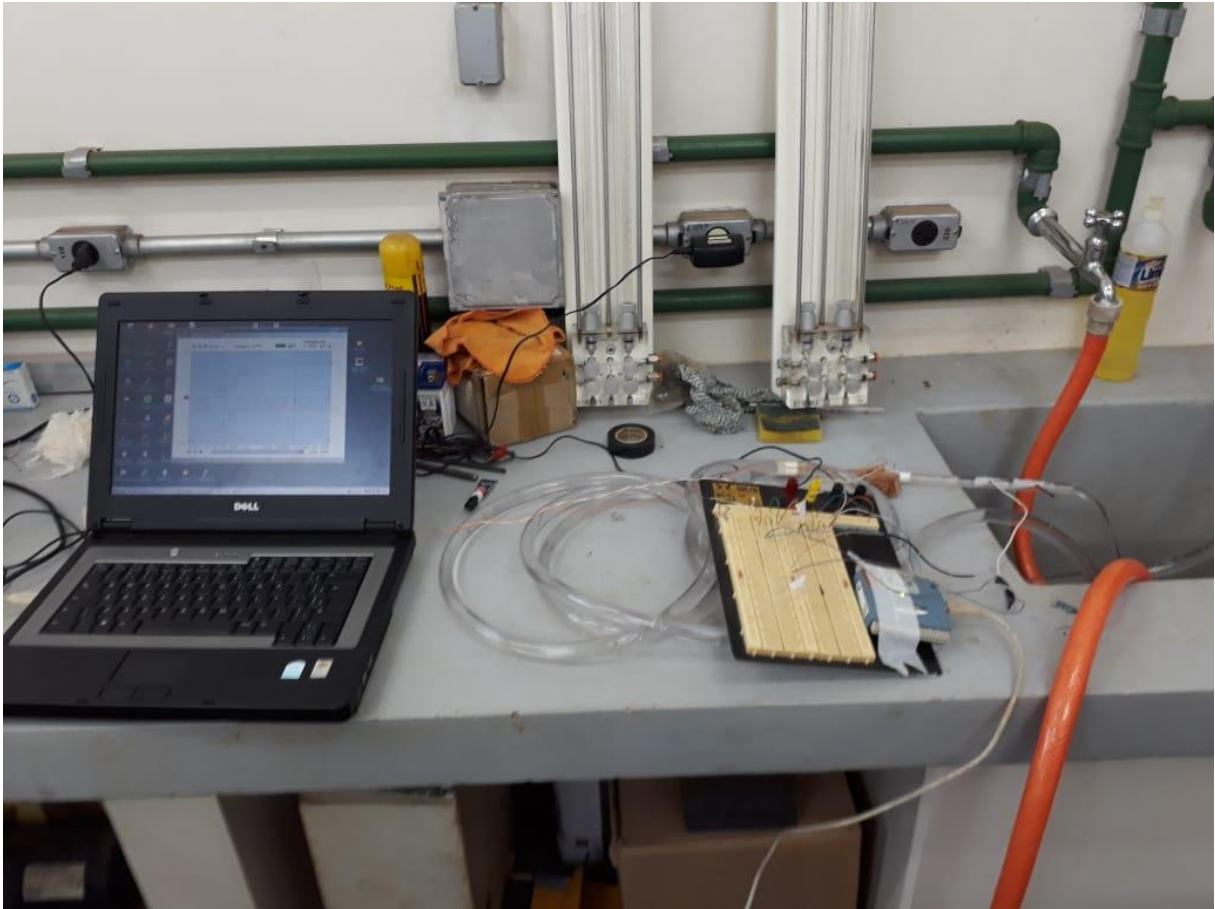
A testagem do primeiro protótipo permitiu averiguar o comportamento do sistema e verificar se os sensores térmicos detectaram os pulsos de calor na temperatura do fluxo contínuo de água. Nas Figuras 27 e 28 pode-se observar o esquema de montagem dos testes iniciais.

Figura 27 – Esquema do protótipo utilizado no teste primeiro protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 28 - Testagem do primeiro protótipo

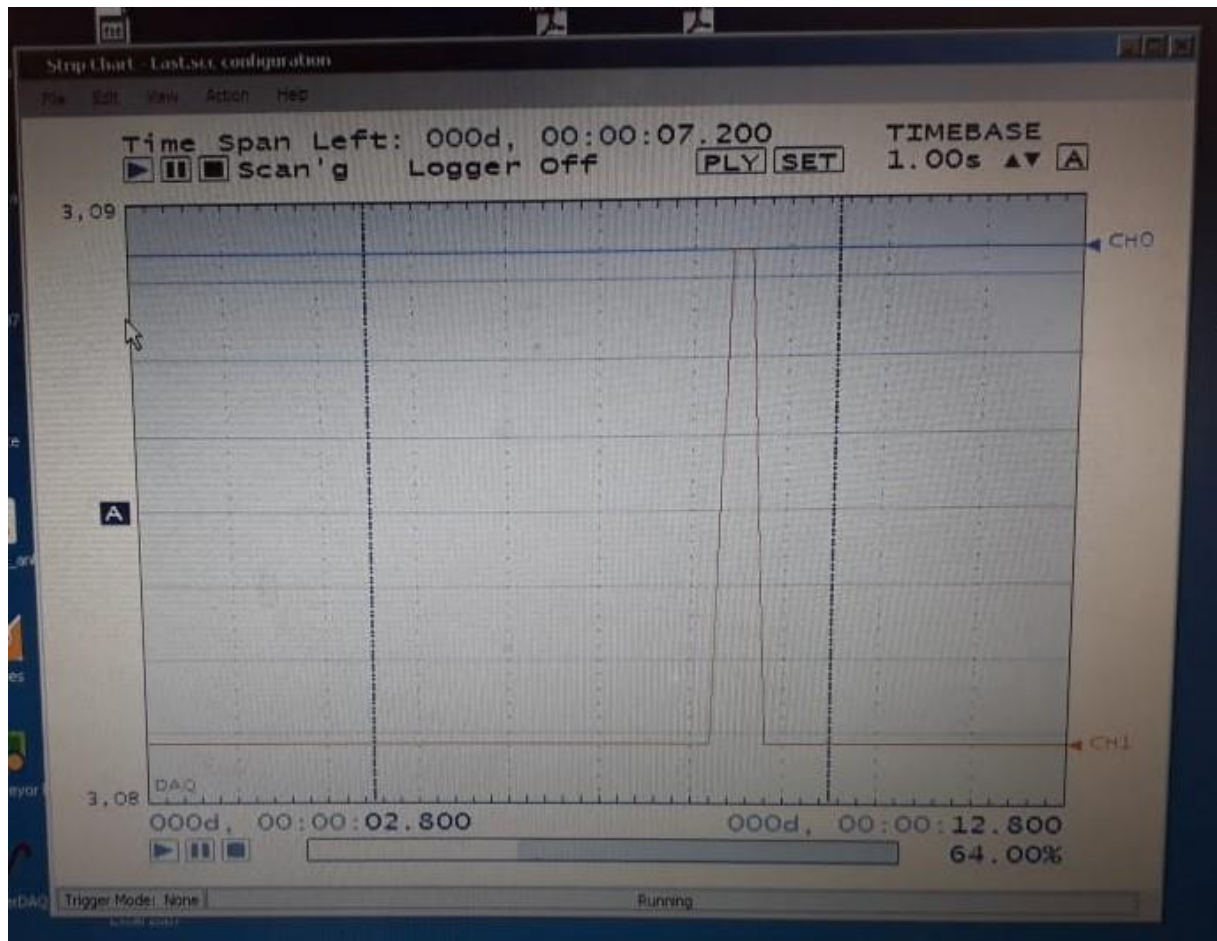


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2.3 Resultados dos Testes no Primeiro Protótipo

A técnica de pulsos de calor apresentou dificuldades quanto ao condicionamento dos sinais do circuito e de aquisição de dados, levando em conta a temperatura da água e a potência necessária para aquecimento do fluxo. Nas Figuras 29 e 30 pode-se observar as medidas de resistência das sondas térmicas obtidas por meio do software TracerDAQ.

Figura 29 - Leitura da resistência das sondas térmicas NTC do primeiro protótipo efetuada com o software TracerDAQ



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 30 - Leitura da resistência das sondas térmicas NTC do primeiro protótipo efetuada com o software TracerDAQ



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Observam-se em azul os dados do canal 0, correspondendo à sonda instalada mais próxima ao aquecedor e em vermelho os dados do canal 1, provenientes da sonda situada à jusante, mais distante da fonte de calor. Devido à semelhança dos gráficos provenientes dos testes no primeiro protótipo, não foi possível identificar com clareza a diferença entre as ondas de calor registradas pelas duas sondas.

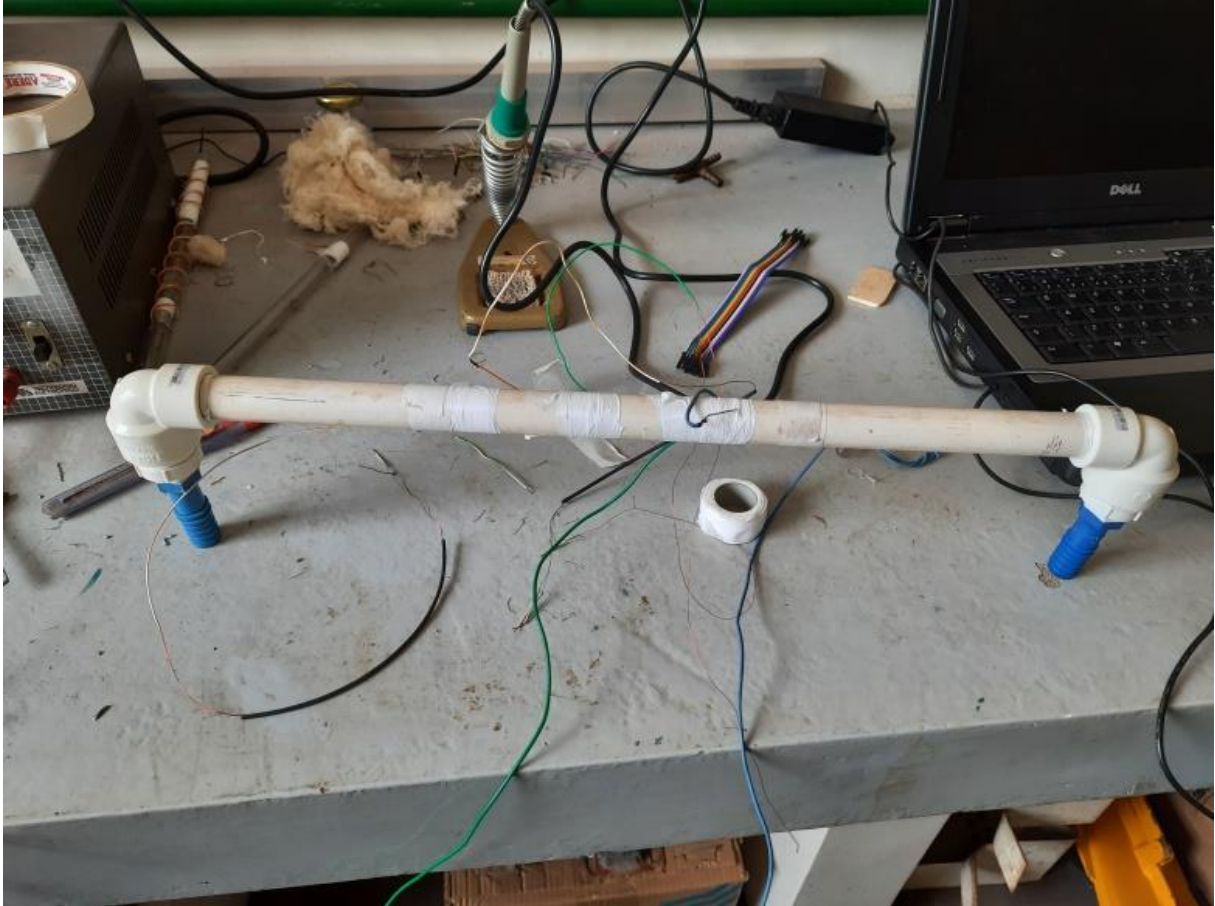
5.3 SEGUNDO PROTÓTIPO

5.3.1 Construção do Segundo Protótipo

Devido os resultados apresentados pelos testes do primeiro protótipo, foi produzido um segundo protótipo com dimensões superiores ao primeiro, para que

pudesse ser aplicada maior potência buscando um aquecimento mais intenso do fluxo d'água. O esquema de montagem pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 - Construção do segundo protótipo

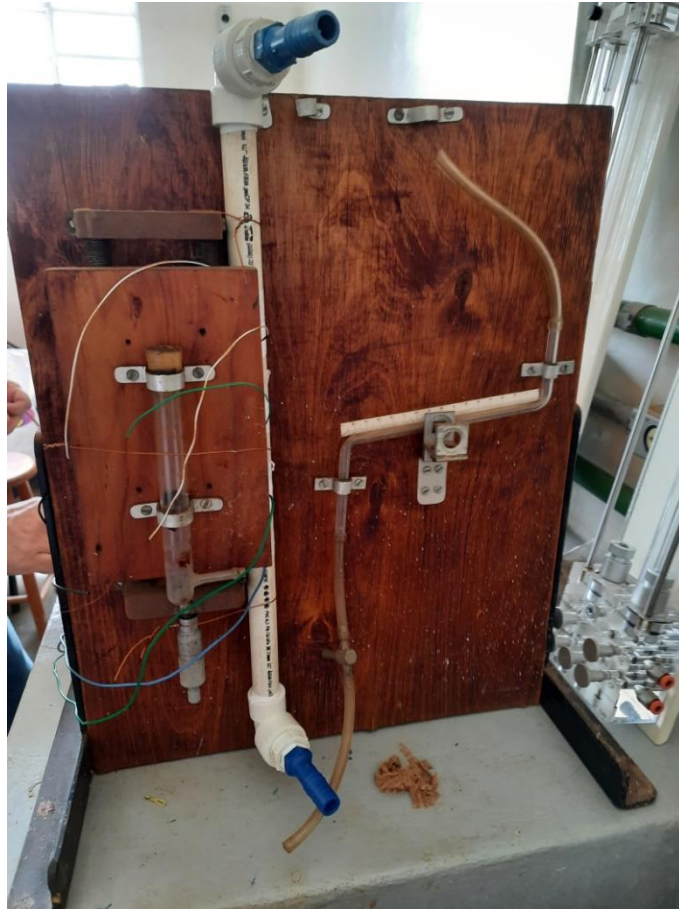


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.3.2 Testagem do Segundo Protótipo em Fluxo Contínuo de Água

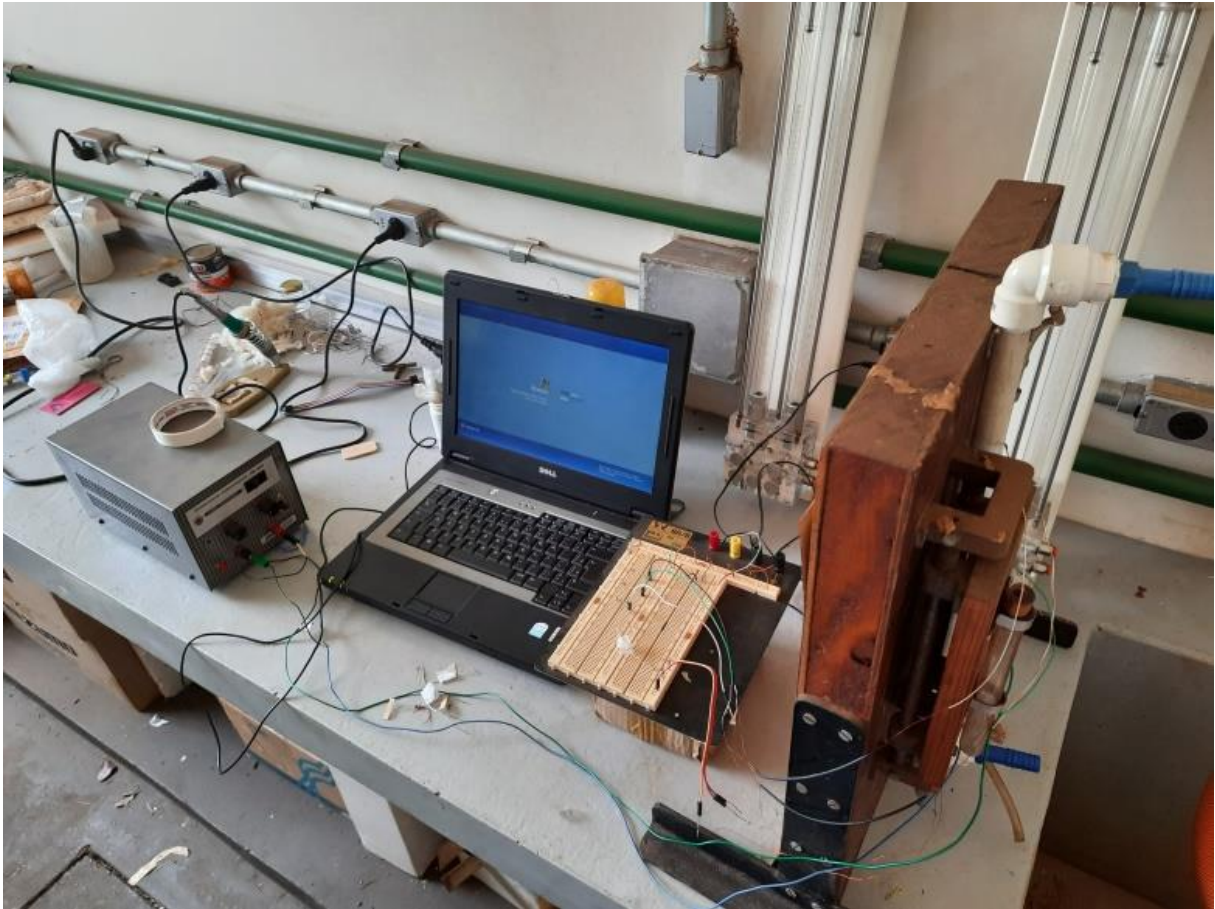
O segundo protótipo foi testado em posição horizontal e vertical, com intuito de verificar se haveria melhorias na detecção dos pulsos de calor pelos termistores no fluxo d'água (Figuras 32 e 33).

Figura 32 - Testagem do segundo protótipo em fluxo contínuo de água em posição vertical



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 33 - Testagem do segundo protótipo em fluxo contínuo de água



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

5.3.3 Resultados dos Testes no Segundo Protótipo

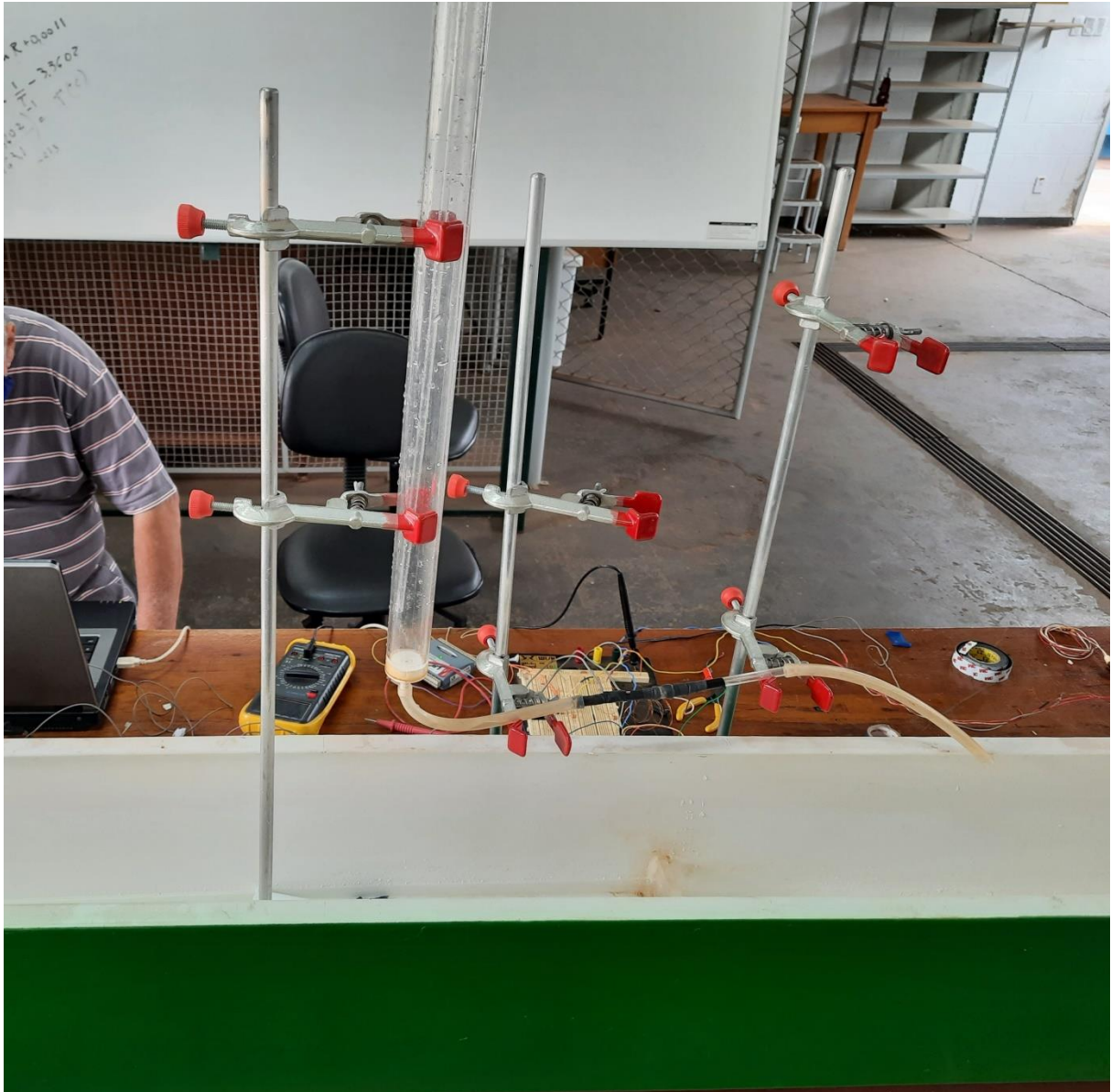
Foram realizados testes no segundo protótipo aplicando um aquecimento mais intenso no fluxo d'água, porém as potências necessárias para detecção dos pulsos de calor no fluxo d'água pelos termistores levaram à destruição da fonte de calor (queima dos resistores) utilizada.

5.4 Sonda ADVECTIVA COM FONTE DE CALOR DISTRIBUÍDA

Neste item são descritas as observações realizadas com a sonda advectiva dotada de aquecimento distribuído, conforme mostrado na Figura 14. A fonte de calor foi construída com um trecho de tubo metálico, com a expectativa de permitir o emprego de maiores potências de aquecimento, o que aumentaria a amplitude das

ondas de calor transportado, facilitando a definição dos picos e do tempo de percurso entre as sondas. Na Figura 34 pode-se observar o aspecto da bancada montada para testar a sonda advectiva com a fonte de calor distribuída.

Figura 34 – Ensaio da sonda com fonte de calor distribuída



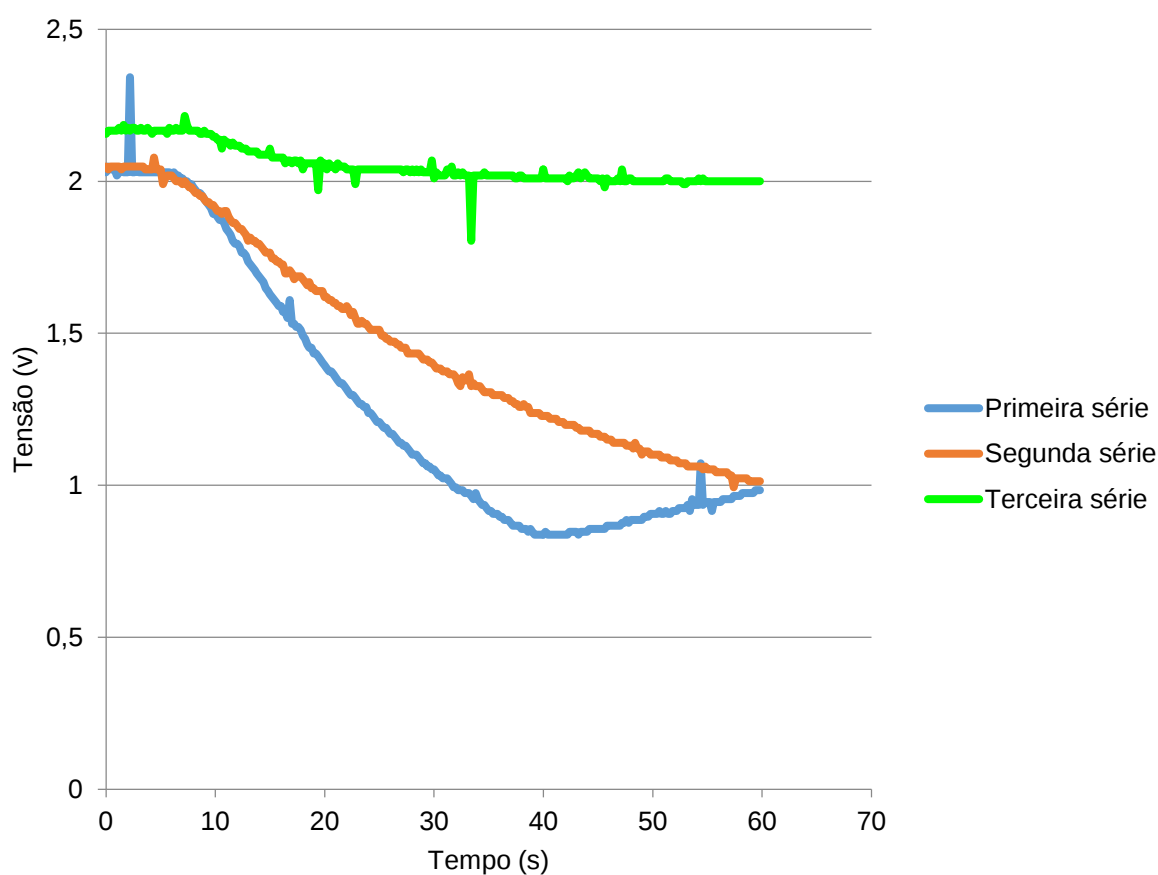
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se na Figura 34 que a sonda tubular foi alimentada pelo escoamento fornecido por um frasco de Mariotte, que permitia a manutenção de vazão constante pelo tempo necessário para realização de cada leitura. Esta solução foi adotada, devido às pequenas vazões necessárias.

Após iniciada, a aquisição de dados era ligada manualmente a fonte de potência para o aquecimento. Os dados foram obtidos durante 60 segundos com uma taxa de 100 leituras por segundo. O objetivo foi verificar se havia transferência de calor suficiente para provocar variações de temperatura detectáveis pelo equipamento utilizado. Para tanto, foram realizados testes exploratórios variando a potência e vazão.

A Figura 35 retrata o gráfico comparativo entre as séries de testes aplicados à sonda de advecção com traçador térmico previamente aquecido.

Figura 35 – Gráfico comparativo das séries de testes da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As condições laboratoriais aplicadas nas séries de testes da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições laboratoriais das séries de testes da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido

Série de Teste	Velocidade (m/s)	Vazão (m³/s)	Tensão (volts)	Potência (watts)
Primeira	0,0375	0,0736	26,8	4,79
Segunda	0,0373	0,0736	20	2,67
Terceira	0,3597	0,7062	26,8	4,79

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Como resultado da exploração inicial do comportamento da sonda com fonte de calor distribuída foi observado que, a despeito das maiores potências de aquecimento, a amplitude das variações de temperatura observadas ainda foi pequena, dificultando a adoção do princípio de tempo de transporte da onda de calor entre dois sensores a jusante. Com isso percebeu-se que o uso da sonda com a tecnologia advectiva com fonte distribuída, embora possível, não seria viável com a instrumentação utilizada no trabalho e com as potências de aquecimento relativamente pequenas a serem utilizadas em uma medição de campo.

5.5 SONDA DE ADVECÇÃO COM INJEÇÃO DE TRAÇADOR TÉRMICO

Esta etapa consistiu em testar a viabilidade da técnica de advecção de calor com aquecimento off-line, ou seja, com a injeção de água previamente aquecida utilizando uma seringa hipodérmica, conforme esquema semelhante apresentado no item 4.2 da metodologia (Figura 15), de modo que este sinal possa auxiliar na calibragem da sonda convectiva ajustando o ponto em que a curva de calibragem da sonda representa as características do meio de aplicação.

5.5.1 Testagem da Sonda de Advecção com Traçador Térmico

Para este teste foi utilizado o software comercial TracerDAQ como sistema para aquisição de dados e a comutação manual. Nas Figuras 36 e 37 pode-se observar detalhes dos ensaios realizados com a sonda de advecção de traçador previamente aquecido.

Figura 36 – Testagem da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 37 – Injeção de água previamente aquecida utilizando seringa hipodérmica



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

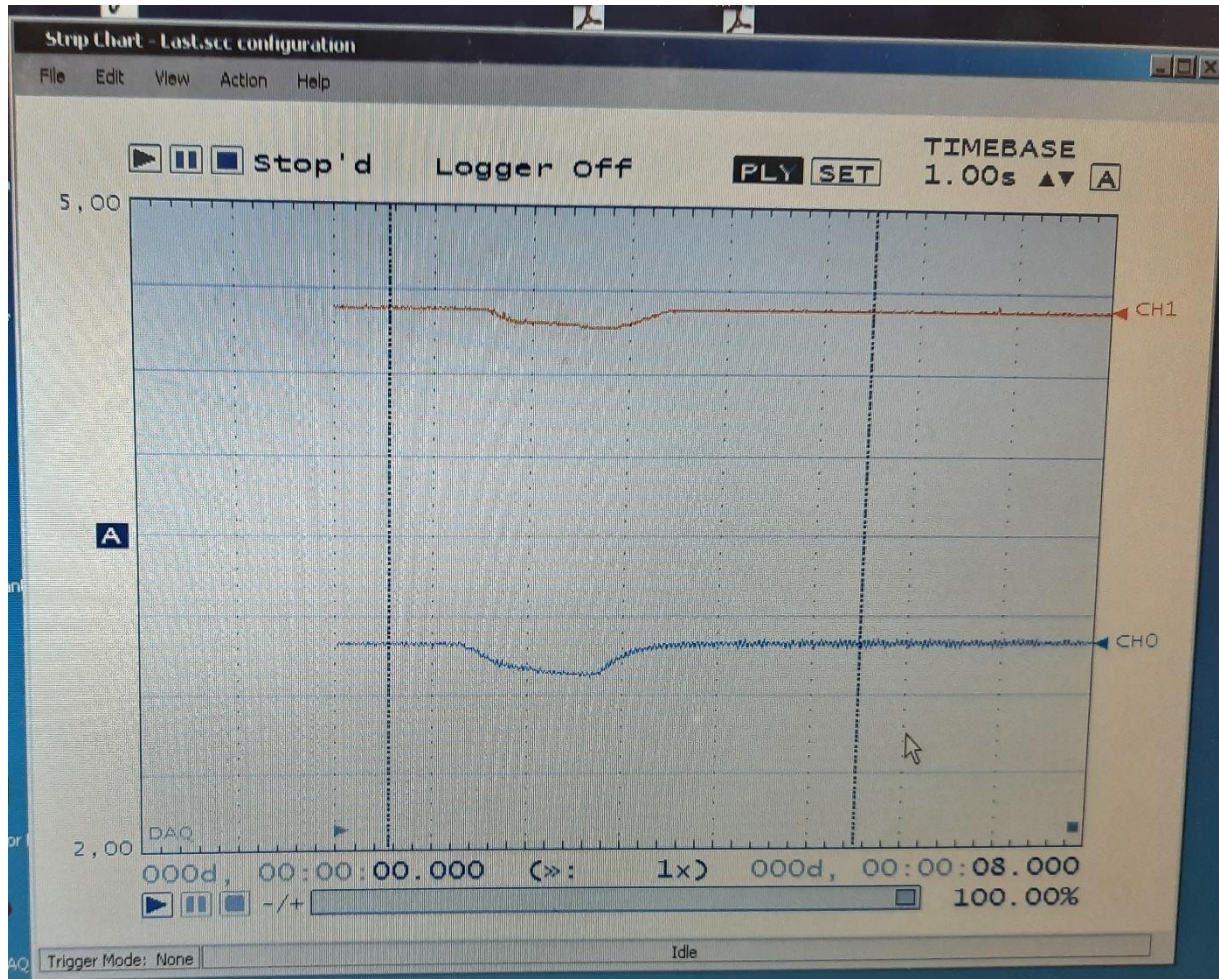
Desta forma, foi possível construir um sistema que admitiria uma calibragem tradicional, como os sistemas de anemometria de filme quente, além da possibilidade de automatizar este sistema para que o usuário possa acionar o ajustamento da curva de calibragem, quantas vezes achar necessário, por meio de microcontroladores e bombas peristálticas.

5.5.2 Resultados dos Testes na Sonda de Advecção com Injeção de Água Quente

Pode-se dizer que a técnica de injeção de traçador térmico utilizando água quente previamente aquecida é possível, porém há necessidade de um condicionamento de sinal bastante eficiente para produzir resultados práticos, combinado com aumento da temperatura e quantidade de água injetada em tempo

mais curto para definir melhor os picos registrados pelos sensores à jusante. Na Figura 38 pode-se observar a imagem da medição detectada pela onda de calor por meio dos sensores térmicos NTC.

Figura 38 – Resultados da testagem da sonda de advecção de traçador térmico previamente aquecido usando o software TracerDAQ



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se que a curva azul representa a sonda de montante e a laranja a de jusante. As diferentes tensões são causadas pela falta de ajuste dos condicionadores de sinal, desnecessária nessa fase de testes. Não é importante o valor absoluto da temperatura, apenas a diferença de tempos de pico.

É visível o atraso da curva laranja em relação à curva azul, de forma que o teste demonstra que a técnica é viável. Outra dedução possível é que a duração da injeção foi maior que o necessário, assemelhando-se mais a um degrau do que a um

pulso, que teria um gráfico mais triangular. Essa característica deve-se à injeção manual adotada no ensaio, podendo ser melhorada com injeção mecanizada.

Não houve condições materiais para levantar mais dados com esse modelo, de forma que o trabalho limitou-se a demonstrar a possibilidade prática de sua realização com as tecnologias e equipamentos disponíveis.

Em resumo, os resultados da advecção da onda de calor para medir a velocidade permitiram afirmar que é possível, entretanto seria necessária uma quantidade maior de traçador (água quente) que poderia influenciar na curva de saída, porém as consequências da perturbação causada no escoamento são de difícil determinação prática, requerendo um longo levantamento experimental com dados comparados com um medidor de velocidade pontual a ser usado como padrão.

Acredita-se que possivelmente a resposta desta comparação será não linear com a relação entre a velocidade real e a registrada, dependendo da própria velocidade da água, do volume injetado de traçador, da diferença de temperatura entre o escoamento e o traçador, além do tempo de injeção.

5.6 Sonda Convectiva

Conforme os resultados apresentados nos testes anteriores foi definido que a técnica de pulsos de calor seria substituída pela transmissão de calor por convecção, onde os sensores térmicos são aquecidos com potência constante, por um determinado intervalo de tempo, desta forma a calibração do protótipo independeria da temperatura da água facilitando a calibração esse processo.

5.6.1 Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC da Sonda Convectiva

Por conta da utilização de um novo sensor térmico, um novo gráfico da relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) foi elaborado.

5.6.2 Testagem da Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água

A sonda convectiva foi produzida em uma escala maior, devido às dificuldades de usar a alta frequência de aquisição de dados com o tamanho inicialmente planejado. Para implantação da técnica de transmissão de calor por convecção, simulou-se um ambiente de fluxo d'água controlado em laboratório e instalou-se o resistor e o sensor térmico NTC em um tubo PVC de diâmetro de 50 milímetros e área transversal de 0,00196 metros quadrados. O aparato experimental pode ser vista na Figura 39.

Figura 39 – Aparato experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Devido às pequenas vazões utilizadas na seção de teste, foi utilizado um divisor de vazão para não prejudicar o funcionamento da bomba hidráulica, conforme pode ser visto na Figura 40.

Figura 40 - Controle do fluxo d'água



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Adotou-se um aquecimento no fluxo d'água utilizando uma fonte de tensão elétrica regulável para alimentação do resistor e controlou-se a vazão e a velocidade do fluxo, por meio de uma bomba hidráulica ligada a um inversor de frequência e as leituras de resistência foram efetuadas manualmente usando um multímetro digital (Figuras 41 e 42).

Figura 41 - Bombas hidráulicas utilizadas no controle do fluxo d'água



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 42 - Testagem da sonda convectiva



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Neste processo, o sensor térmico NTC foi instalado, conforme o esquema demonstrado no item 4.1 da metodologia, em posição adjacente ao resistor (Figura 8), e também testado à jusante ao resistor, com intuito de verificar as alterações nas leituras de resistência da sonda.

Desta forma, foi possível relacionar a variação das leituras de resistência do termistor com a velocidade do fluxo d'água, resultando em gráficos que apresentaram uma Curva " ΔT (°C) x Velocidade (m/s)".

5.6.3 Resultados dos Testes na Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água

Os testes da sonda convectiva foram executados admitindo a técnica de transmissão de calor por convecção. Observou-se que essa alteração da posição do sensor NTC foi prejudicial à variação na calibração, perante o tipo da água (salinidade, sólidos dissolvidos, matéria orgânica), contudo a calibração independeria da temperatura da água favorecendo este processo. Todavia, acredita-se que para a utilização prática em campo, essa dificuldade poderá ser contornada com técnicas de ajuste da curva de calibração, uma vez que poderiam utilizar uma aferição inicial com água parada para identificar o aquecimento máximo da sonda nas condições da medição.

5.6.4 Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do Sensor Térmico NTC da Sonda Convectiva em Fluxo Contínuo de Água

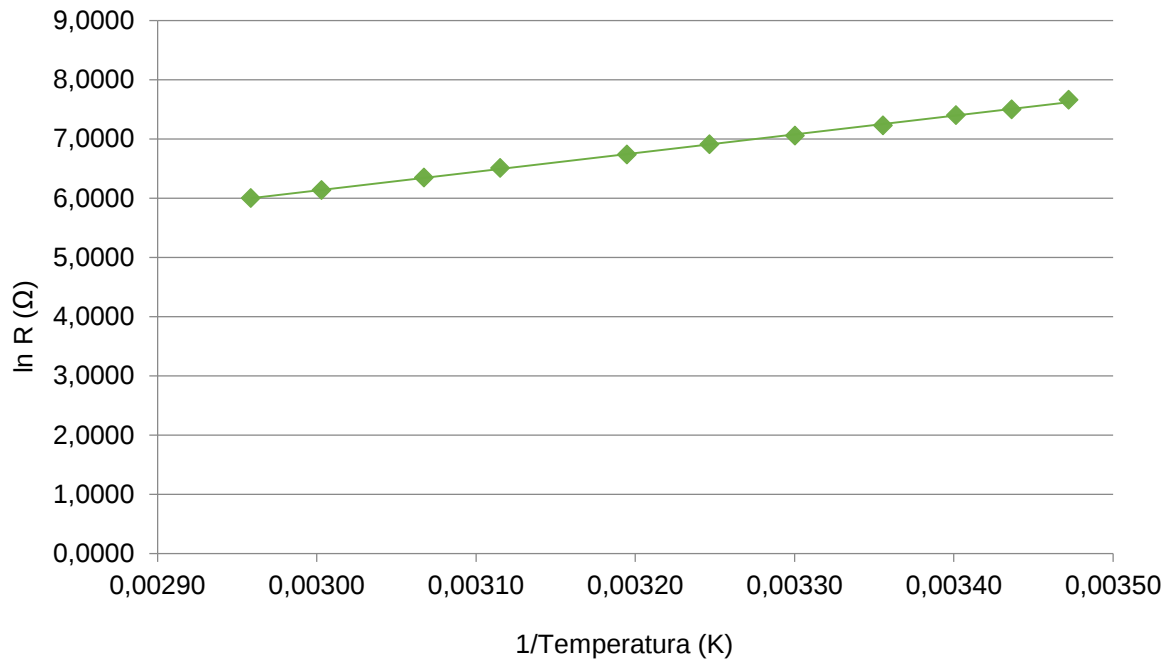
Na Tabela 4 pode-se observar os valores de temperatura e resistência medidos em laboratório durante a o teste de relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do sensor térmico NTC da sonda convectiva e a Figura 43 representa o gráfico resultante.

Tabela 4 - Dados da calibração do sensor térmico NTC da sonda convectiva testada em fluxo controlado

Temperatura (°C)	Resistência (Ω)	1/Temperatura (K)	Ln R (Ω)
15	2120	0,00347	7,6592
18	1810	0,00344	7,5011
21	1640	0,00340	7,4025
25	1380	0,00336	7,2298
30	1160	0,00330	7,0562
35	1000	0,00325	6,9078
40	844	0,00319	6,7382
48	673	0,00312	6,5117
53	570	0,00307	6,3456
60	463	0,00300	6,1377
65	404	0,00296	6,0014

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 43 - Relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do sensor térmico NTC da sonda convectiva testada em fluxo controlado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A relação Resistência (Ω) x Temperatura (K) do sensor térmico da sonda convectiva é dada pela Equação 8:

$$y = 3163,1x - 3,3602 \quad (8)$$

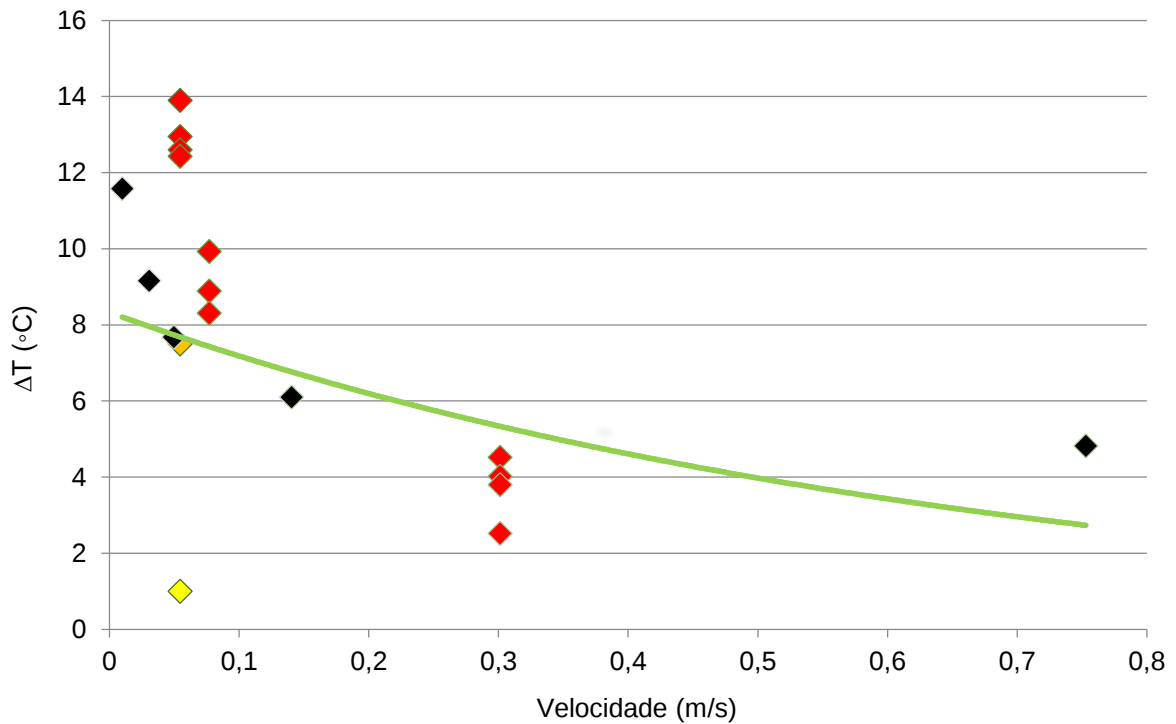
5.6.5 Resultados da Testagem da Sonda Convectiva em Fluxo de Água Controlado

5.6.5.1 Primeiro Teste da Sonda Convectiva em Fluxo de Água Controlado

Para o primeiro teste foi utilizada uma sonda constituída simplesmente pelo resistor da fonte de calor justaposto ao termistor, fixado com cola epóxi no corpo do resistor. Buscou-se relacionar a variação de temperatura da medição com a velocidade admitida no fluxo d'água controlado em laboratório aplicando um aquecimento com potência variável. No Anexo A pode-se observar os valores referentes às medições realizadas e as condições admitidas em laboratório.

Na Figura 44 pode-se observar a curva de variação da temperatura com a velocidade do fluxo d'água.

Figura 44 - Curva de relação da variação da temperatura pela velocidade do fluxo do primeiro teste da sonda convectiva



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Onde as potências de aquecimento variaram da seguinte forma:

- : 1 watts de potência;
- : 5 watts de potência;
- : 10 watts de potência;
- : 20 watts de potência.

A Equação 9 foi gerada pelo gráfico e é apresentada a seguir:

$$\Delta T = 8,3301 e^{-1,477V} \quad (9)$$

O resultado do primeiro teste na sonda convectiva demonstrou que a potência utilizada não foi suficiente para proporcionar respostas nos sensores. Uma

das dificuldades da calibração de sondas de filme quente é adimensionalizar a temperatura em relação à potência ($^{\circ}\text{C} \times \text{W}$), pois esta relação não representa uma curva de calibragem.

5.6.5.2 Segundo Teste da Sonda Convectiva em Fluxo de Água Controlado

Neste teste, o fluxo d'água foi aquecido com uma potência constante de 19,95 watts e foram realizadas diversas medições. Os dados obtidos neste teste foram disponibilizados no Anexo B.

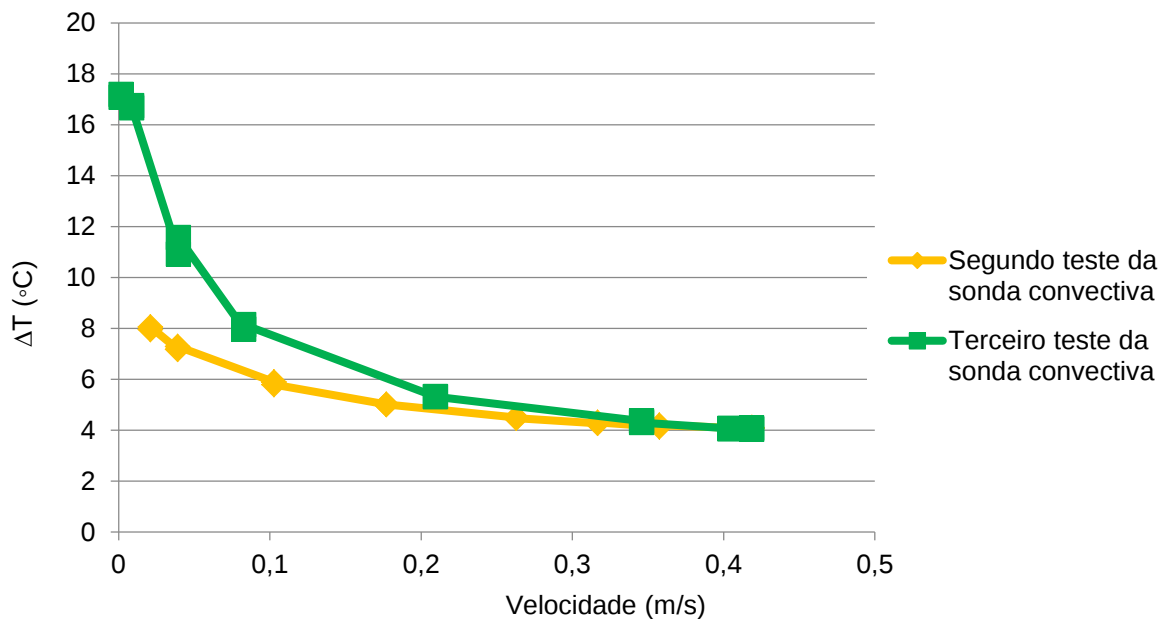
5.6.5.3 Terceiro Teste da Sonda Convectiva em Fluxo de Água Controlado

Nos dois primeiros testes, a sonda foi instalada com o sensor de temperatura posicionado à frente do resistor de aquecimento. Nesta etapa a orientação da sonda em relação ao fluxo foi alterada, com o sensor ficando ao lado do resistor de aquecimento. Os resultados obtidos podem ser observados no Anexo C.

5.6.5.4 Comparação dos Resultados do Segundo e do Terceiro Teste da Sonda Convectiva

Na Figura 45 pode-se observar o comparativo das curvas de variação de temperatura pela velocidade do fluxo do segundo e do terceiro teste da sonda convectiva, a fim de se ter o efeito da orientação do fluxo e conhecer sua proporção.

Figura 45 – Gráfico comparativo das curvas de relação da variação da temperatura pela velocidade do fluxo do segundo e do terceiro teste da sonda convectiva



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As curvas de variação de temperatura pela velocidade do fluxo no segundo e no terceiro teste são representadas pelas Equações 10 e 11:

$$y = 7,3618 e^{-1,578x} \quad (10)$$

$$y = 13,845 e^{-3,255x} \quad (11)$$

O gráfico comparativo mostra que a sonda usada nos testes ficou altamente direcional, pois não se tem um equalizador da temperatura atingida, mesmo superpondo um resistor ao sensor de temperatura, demonstrou grande sensibilidade à direção do escoamento. Esse efeito representa um ponto negativo para medidores de velocidade média e, por conta disso, foi proposto à utilização de uma sonda com revestimento metálico, conforme apresentado no item 4.1 da metodologia, com intuito de garantir a homogeneização da temperatura e tirar o efeito de direção relativa do escoamento.

5.7 Sonda convectiva encapsulada em corpo metálico

A partir da constatação no item anterior de que sonda convectiva possibilita uma calibração viável, embora com as leituras variando em função da orientação da sonda em relação ao fluxo, onde foi difícil determinar os tempos de trânsito da onda de calor gerada, decidiu-se investigar o comportamento da sonda tubular construída funcionando no modo convectivo, ou seja, utilizando apenas um sensor de temperatura, conforme demonstrado na Figura 9.

5.7.1 *Relação entre a Tensão lida pelo Sistema de Aquisição e a Temperatura da Sonda*

Para utilizar o princípio da sonda convectiva, torna-se necessário descobrir o acréscimo de temperatura da sonda ao fim de um dado intervalo de tempo. Essa informação é, a rigor, desnecessária para utilizar a técnica advectiva, pois basta saber os tempos de ocorrência dos picos da onda de calor advectada, não importando a amplitude, ou seja, a temperatura atingida na onda registrada. Por isso, para usar a abordagem convectiva foi necessário inicialmente estabelecer a relação entre a tensão produzida no termistor pela corrente de excitação e a temperatura.

A curva característica dos sensores NTC relaciona a temperatura à resistência elétrica. Em todos os casos a curva foi determinada em banho térmico, usando termômetros de vidro como referência e multímetros para medir diretamente, com registro manual das leituras, os valores de resistência correspondentes.

Para o caso de aquisição automática de dados pelo sistema de aquisição, seria necessário estabelecer a relação entre as tensões geradas pelo condicionador e a resistência da sonda NTC. Uma vez calculada a resistência, determina-se o valor da temperatura por meio da equação característica da sonda. Entretanto, é mais simples determinar diretamente a relação entre a tensão gerada pelo condicionador e a temperatura do sensor. A desvantagem desta técnica é que a curva passa a depender também dos parâmetros do condicionador de sinais, enquanto que a relação R_xT depende apenas do termistor NTC empregado na sonda.

Para determinar a equação de regressão para a relação Tensão x Temperatura foi empreendida uma análise do condicionamento dos sinais utilizado na aquisição de dados.

Para isso considerou-se o condicionador de sinais com configuração do termistor em série com três resistores de 1.000 Ohms em paralelo, resultando num resistor equivalente de 333,33 Ohms. A Equação 12 exhibe a relação entre a tensão lida e a resistência:

$$R(T) = A e^{(-\frac{B}{T})} \quad (12)$$

A função de “ $U_{ab}(T)$ ” é calculada a partir da Equação 13, enquanto a Equação 14 apresenta o valor de corrente do condicionador.

$$U_{ab} = R(T) * I \quad (13)$$

$$I = \frac{+5}{333+R(T)} \quad (14)$$

Sendo assim, a função de “ $U_{ab}(T)$ ” resultante é exibida na Equação 15:

$$U_{ab} = \frac{5 * R(T)}{333 + R(T)} \quad (15)$$

Nesta função, observa-se que a relação entre a tensão lida e a resistência aparece em dois locais, o que dificulta explicitar o valor da resistência do termistor. A Equação 15 poderia ser resolvida por tentativa e erro, utilizando a função “Atingir Meta” no software Microsoft Excel. Embora trabalhoso, seria possível, pois para cada tensão haveria um valor de resistência do NTC, o que permitiria entrar na curva “ $R(T)$ ” em função da temperatura.

Tendo em vista os erros e limitações da bancada experimental, buscou-se simplificar o processo, portanto considerou-se o valor médio de “ $R(T)$ ” para aproximar a equação.

Admitindo “ $R(T)_{\text{médio}}$ ” constante aproximadamente ao valor da resistência média da sonda, pode-se afirmar os seguintes resultados das Equações 16 e 17:

$$U_{ab} = \frac{5 \cdot R(T)}{333 + R(T)_{\text{médio}}} \quad (16)$$

$$U_{ab} = \mathbb{C} \cdot R(T) \quad (17)$$

Portanto, pode-se concluir a função da Equação 18:

$$U_{ab} = \mathbb{C} \cdot A e^{(-B \cdot T)} \quad (18)$$

Onde:

U_{ab} : Leitura obtida pelo sistema de aquisição (Volts);

A e B: Constantes de calibração;

T: Temperatura (°C);

Verifica-se pela Equação 18 que uma relação exponencial pode ser adotada para o ajuste de regressão dos dados. Observa-se também que é indiferente considerar “ $\exp(-B \cdot T)$ ” ou “ $\exp(-B/T)$ ”, pois as duas são equivalentes e variaria apenas os valores das constantes A e B em cada caso.

5.7.2 Ajuste da Relação entre Tensão e Temperatura

Considerando os valores médios das leituras de tensão adquiridas pelo sistema de aquisição de dados para cada temperatura, a redução de dados para as médias pode ser observada na Tabela 5.

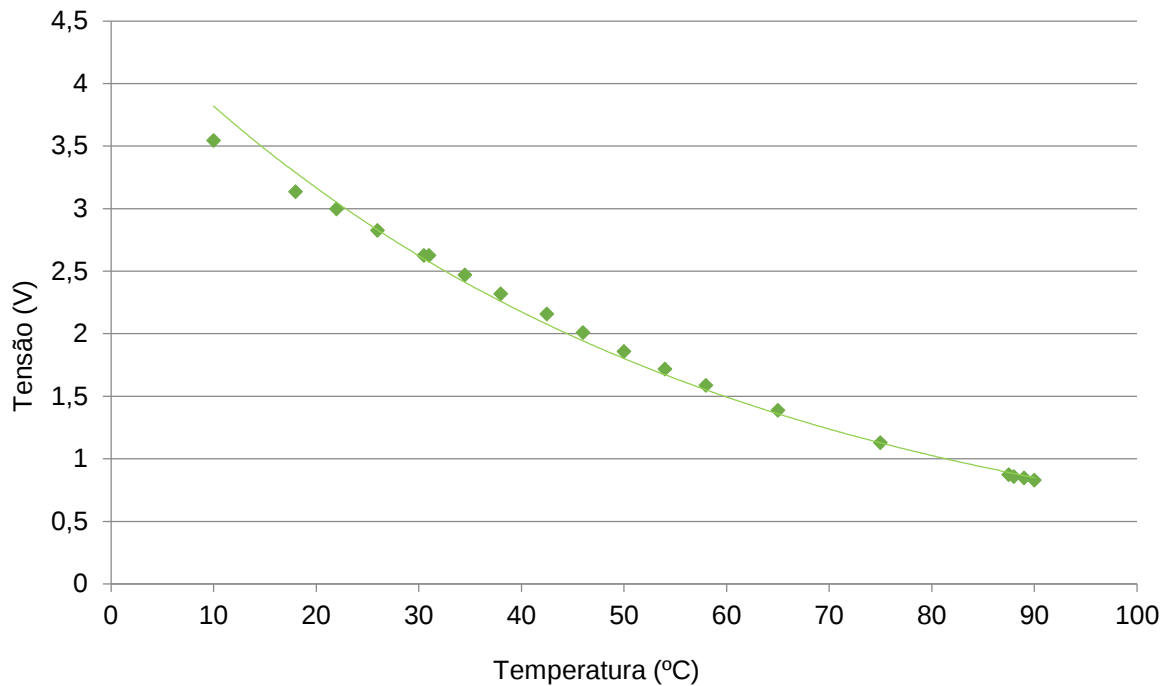
Tabela 5 – Valores médios das leituras de tensão para cada temperatura efetuadas nos ensaios da sonda com encapsulamento metálico

Temperatura (°C)	Tensão Média (V)
10	3,543300
18	3,133100
22	2,995525
26	2,823384
30,5	2,625199
31	2,625198
34,5	2,468997
38	2,316772
42,5	2,156300
46	2,008427
50	1,857476
54	1,716702
58	1,585530
65	1,385580
75	1,127981
87,5	0,872090
88	0,856717
89	0,844554
90	0,827998

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme os dados obtidos, ajustou-se a curva exponencial que aproxima a resposta não linear do condicionador de sinais utilizado, como demonstrado na Equação 18, e o gráfico resultante pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 – Ajuste do gráfico da curva exponencial das leituras de Tensão x Temperatura da sonda



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Abaixo é apresentada a função resultante do ajuste da curva exponencial na Equação 19:

$$U = 4,6097e - 0,019T \quad (19)$$

5.7.3 *Análise dos Dados de Aquecimento da Sonda com Encapsulamento Metálico em Função da Velocidade Média*

Nesta etapa foi necessário selecionar os dados, a partir da série bruta obtida pelo sistema de aquisição em cada leitura. Para a temperatura inicial, considerou-se a média das leituras de tensão entre 0,2 e 9,8 segundos. Para a temperatura final, foram inspecionadas as leituras de 39,8 segundos, sendo que normalmente a máxima temperatura, correspondente à mínima leitura de tensão, ocorre um pouco depois de 40 segundos. Nota-se que ao desligar o aquecimento aparecem em alguns casos um ruído na leitura, portanto foram descartadas as leituras finais que variaram muito em relação às anteriores e posteriores, sendo admitidas as leituras

mais representativas entre 39,6 e 40 segundos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Dados de aquecimento da sonda com encapsulamento metálico em função da velocidade média

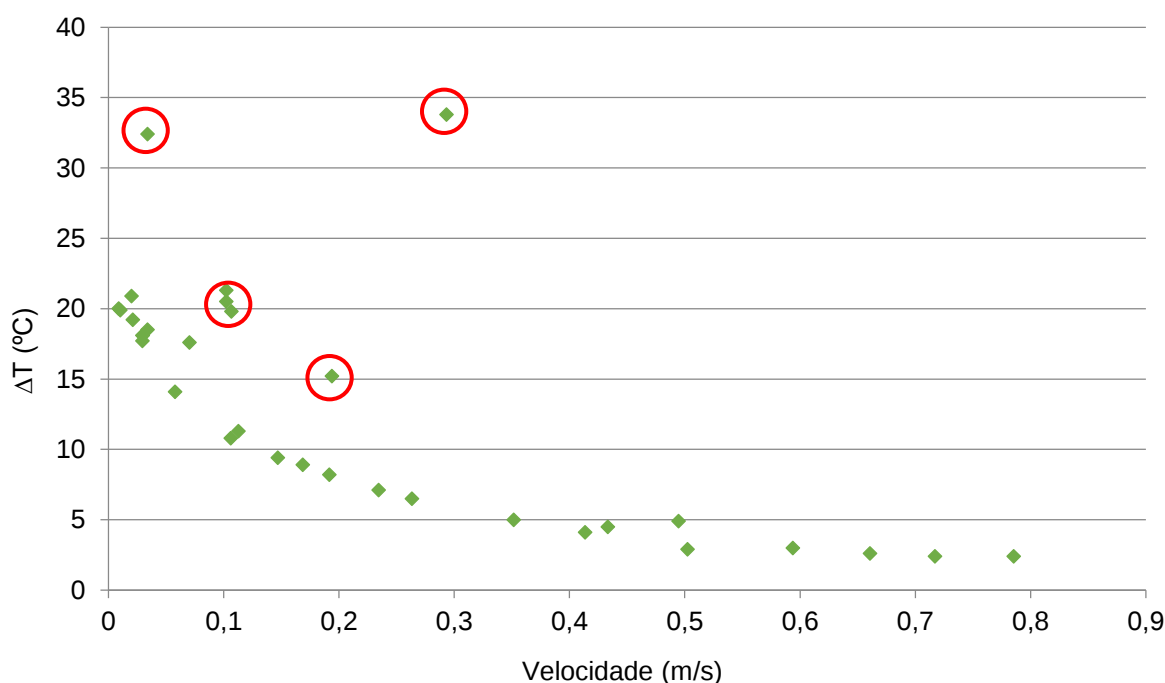
Leitura Número	Tensão Inicial (V)	Tensão Final (V)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Velocidade (m/s)	ΔT (°C)
1	2,6102	1,7773	30,3	50,8	0,1023	20,5
2	2,6559	1,7786	29,4	50,7	0,1022	21,3
3	2,6305	1,7753	29,9	50,8	0,0199	20,9
4	2,6351	1,4335	29,8	62,2	0,0340	32,4
5	2,6101	1,8437	30,3	48,8	0,0340	18,5
6	2,6453	1,9023	29,6	47,1	0,0704	17,6
7	2,6455	1,8242	29,6	49,4	0,1066	19,8
8	2,6477	1,9902	29,5	44,7	0,1939	15,2
9	2,5788	1,3553	30,9	65,2	0,2934	33,8
10	2,6463	2,4103	29,6	34,5	0,3518	5
11	2,6664	2,4493	29,1	33,7	0,4334	4,5
12	2,6648	2,4298	29,2	34,1	0,4946	4,9
13	2,6626	2,5177	29,2	32,2	0,5940	3
14	2,6648	2,5470	29,2	31,6	0,7171	2,4
15	2,6656	2,5470	29,2	31,6	0,7856	2,4
16	2,6662	2,5372	29,2	31,8	0,6608	2,6
17	2,6687	2,5275	29,1	32	0,5026	2,9
18	2,6667	2,4689	29,1	33,2	0,4137	4,1
19	2,6664	2,3614	29,1	35,6	0,2634	6,5
20	2,6656	2,3321	29,2	36,3	0,2345	7,1
21	2,6644	2,1758	29,2	40	0,1061	10,8
22	2,6642	2,2833	29,2	37,4	0,1918	8,2
23	2,6662	2,2540	29,2	38,1	0,1687	8,9
24	2,6652	2,2344	29,2	38,6	0,1470	9,4
25	2,6644	2,1563	29,2	40,5	0,1127	11,3
26	2,6583	2,0391	29,3	43,4	0,0579	14,1
27	2,6589	1,8535	29,3	48,5	0,0211	19,2
28	2,6248	1,8828	30	47,7	0,0296	17,7
29	2,6467	1,8828	29,5	47,7	0,0295	18,1
30	2,6465	1,8828	29,5	47,7	0,0297	18,1
31	2,6555	1,8242	29,4	49,4	0,0090	20
32	2,6248	1,8046	30	49,9	0,0102	19,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Observa-se que a Tabela 5 exibe os valores calculados da temperatura inicial da sonda correspondente à temperatura da água, conforme a proposta da sonda de equilíbrio térmico com a água. Além disso, são apresentados os valores de temperatura final, que permitem calcular o acréscimo de temperatura para cada ensaio, sendo correlacionado com a velocidade da água na penúltima coluna.

A curva de calibração da velocidade em relação à variação da temperatura resultante é apresentada e podem ser observados alguns pontos fora da curva, considerados anômalos destacados na Figura 47.

Figura 47 – Curva de calibração da velocidade em relação à variação da temperatura e pontos anômalos



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

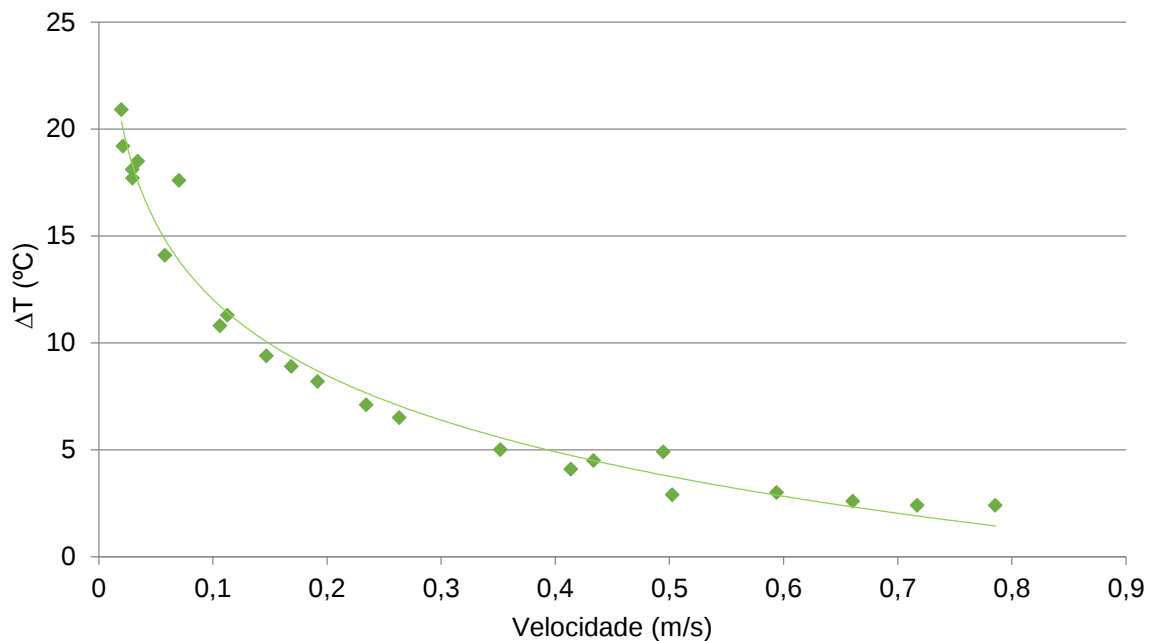
Inicialmente esses pontos fora da curva indicam que a bancada não era adequada para garantir a velocidade média indicada no caso de baixas vazões. Em segundo lugar, apontam que podem ter ocorrido regiões de estagnação na seção de medição da tubulação e acúmulo de ar na região da sonda.

Essas deficiências poderiam ser atenuadas com uma tubulação de calibração na vertical, ao contrário da posição horizontal utilizada. Desta forma, a ação da gravidade ajuda a uniformizar o perfil das velocidades na seção de

calibração, e também inibe a formação de bolhas de ar que podem isolar termicamente a sonda.

Para evidenciar melhor as características da sonda e o método proposto na medição de velocidade, os pontos indicados acima foram eliminados considerados como anômalos, desta forma a curva resultante é mostrada na Figura 48.

Figura 48 – Ajuste da curva de calibração da velocidade em relação à variação da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O gráfico acima aponta que as características da curva combinam com uma função logarítmica, apresentada na Equação 20:

$$\Delta T = -5,14 \ln(V) + 0,2002 \quad (20)$$

Durante o uso da sonda, a variável independente passa a ser o acréscimo de temperatura. Para isso, a equação de calibragem mostrada na Equação 21, pode ser convertida na Equação 22.

$$\Delta T = -5,14 \ln(V) + 0,2002 \quad (21)$$

Coeficiente de correlação na equação da calibragem: 0,974.

$$V = 1,079e^{-0,204\Delta T} \quad (22)$$

Coeficiente de correlação na equação do uso: 0,960.

A forma da curva delineada ilustra a dependência em relação ao coeficiente global de transferência por convecção, também chamado de coeficiente de película. O coeficiente é a única propriedade do ensaio de aquecimento que varia em função da velocidade do fluido, visto que a área da superfície de contato e a potência de aquecimento são constantes. Observa-se uma variação acentuada para as velocidades baixas, entre zero e 0,3 metros por segundo, e uma menor sensibilidade para as altas velocidades, como acima de 0,6 metros por segundo.

Os resultados obtidos apresentaram que:

- i. As leituras são influenciadas pelas características da superfície de contato entre a água e a sonda, que afeta o valor do coeficiente de transferência de calor, por conta disso a sensibilidade à variação de velocidade não é constante, sendo maior em baixas velocidades e diminui à medida que as velocidades aumentam;
- ii. A presença de bolhas de ar ou de impurezas carregadas pelo escoamento podem afetar fortemente os resultados, por isso é necessário que a superfície da sonda seja uniforme, sem cantos vivos e de material resistente à abrasão, evitando que a curva de calibragem se modifique conforme o seu uso e facilitando a limpeza antes da realização das leituras;

- iii. A sonda com o corpo de latão usada neste experimento obteve melhor desempenho em relação ao protótipo testado anteriormente (item 5.6), devido à uniformidade da superfície, menor rugosidade e maior facilidade de limpeza antes da utilização;
- iv. Considerando os aspectos de uso e conservação das características da superfície da sonda, seria desejável um corpo cilíndrico, evitando a presença de arestas do corpo prismático sextavado, como adotado na sonda ensaiada.

As revisões bibliográficas retrataram os problemas identificados do medidor por variação do coeficiente de transferência de calor por convecção, nas seguintes possibilidades de variações com:

- i. O tempo e as condições da água, pela aderência de biofilme na sonda;
- ii. A qualidade da água e ar dissolvido;
- iii. A temperatura da água;
- iv. Construção artesanal exigindo calibração individual;
- v. Diminuição da sensibilidade com o aumento da velocidade.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os modelos construídos de medidores por convecção demonstraram que a potência do resistor não linear utilizado no primeiro protótipo foi insuficiente para aquecimento do fluxo com pulsos de calor e apresentou dificuldades no condicionamento de sinais do circuito e aquisição de dados.

O espaçamento do produto planejado inicialmente demonstrou-se inadequado, devido às dificuldades de usar a alta frequência de aquisição de dados, sendo necessária a utilização de um espaçamento cerca de 3 a 4 vezes maior do que o previsto, o que facilitou o desenvolvimento e os testes do princípio de funcionamento dos sensores nos prazos determinados e com os recursos disponíveis.

Dentre as contribuições deste trabalho, destaca-se a produção do sistema de um equipamento em escala maior que o modelo previsto, porém mantendo o princípio de medição por transmissão de calor.

Portanto, em virtude das limitações de tempo e considerando a proposta de tornar o sistema do equipamento acessível com o conceito “Faça você mesmo” ou “Do it Yourself” (DIY), limitou-se a calibragem em relação à velocidade média e demonstração da viabilidade do equipamento usando escoamentos forçados de baixa velocidade.

Em resumo, sobre o modelo de medidor de velocidade de escoamentos por variação do coeficiente de transferência de calor por convecção, pode-se concluir que:

- a) É possível calibrar;
- b) Condicionamento de sinal simples;
- c) Necessidade de alta potência de alimentação do resistor para proporcionar respostas nos sensores;

- d) Os resultados obtidos demonstram que a precisão dos resultados requer um tratamento mais eficiente dos dados, de acordo com a necessidade de cada usuário.

O comportamento da sonda demonstrou que é possível usar água quente como traçador com a injeção de água previamente aquecida, perante a onda demonstrada na Figura 38, porém seria necessário um condicionamento de sinais eficiente para produzir resultados práticos.

O conceito de utilização de água previamente aquecida para efetuar as medições de velocidade por advecção tem potencial para ser utilizado em conjunto com a sonda convectiva, permitindo ajustes de posicionamento da curva de calibragem da sonda. O sensor proposto utiliza algumas medições por advecção para interpolar as medições obtidas pela sonda convectiva, o que abre a possibilidade de levantar experimentalmente de forma rápida os perfis de velocidade ao longo de um eixo vertical de medição.

Fica para trabalho futuro a calibragem em escoamentos livres utilizando medições pontuais de velocidade, em comparação com algum equipamento de medição utilizado como padrão ou a utilização de outro traçador que possa ser mais eficiente, como por exemplo, o sal para mudar a condutividade elétrica da água, além da automação do sistema eletrônico de aquisição, controle e processamento de dados.

Para viabilizar a continuidade do trabalho no futuro, há pontos positivos e negativos seriam necessários desenvolver:

- a) Analisar a viabilidade de colocar menor volume de traçador, tendo em vista a possibilidade de sensores com tempo de resposta menor, que seria um ponto positivo;
- b) Permitir a medição de velocidade, por meio de um condicionamento de sinais mais complexo, como por exemplo os condutivímetros já projetados e construídos no laboratório de Hidrologia e Hidrometria da Faculdade de Engenharia UNESP – Câmpus Ilha Solteira, entretanto

considera-se um ponto negativo a simplicidade requerida pela proposta DIY;

- c) Elaborar uma calibragem cuidadosa, admitindo as possibilidades prováveis de interferência do volume injetado no escoamento, principalmente a baixas velocidades que seria um ponto negativo, pois essa questão requer uma programação cuidadosa da calibração, usando uma sonda padrão de medição pontual de velocidade, para identificar os efeitos de massa específica do traçador, volume injetado e tempo de injeção sobre a relação entre velocidade medida pelo equipamento e a velocidade média real, medida pelo medidor padrão.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. C. D.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; ZACOLER, J. L. **Medição de velocidade e vazão em cursos d'água**: molinete hidrométrico versus método do flutuador, 2010. p. 4-6.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13403**: Medição de vazão em efluentes líquidos e corpos receptores: escoamento livre. Rio de Janeiro, 1995.

BONIFÁCIO, Cássia Maria; FREIRE, Rosane. Comparação de três métodos para a medição da vazão e velocidade aplicados em dois cursos d'água da Bacia do Ribeirão Maringá. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 406-415, 10 nov. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/19800827922013656>.

BRUUN, H. H. **Hot-Wire anemometry**: principles and signal analysis. New York: Oxford University Press, 1995. p. 507.

CAROLO, Fabiana. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: instrumento para o desenvolvimento sustentável?**: Estudo das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. 2007. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/2949>. Acesso em: 01 maio 2022.

CARVALHO, Thiago Morato de. Técnicas de Medição de Vazão por Meios Convencionais e Não Convencionais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 1, n. 1, p. 73-85, ago. 2008.

COMTE-BELLOT, G. Hot-Wire Anemometry. **Annual Review Of Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 209-231, jan. 1976. Annual Reviews. DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.fl.08.010176.001233>.

CORTEZ, Fábio A. R.; DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton. MEDIÇÃO DE UMIDADE COM SONDAS TÉRMICAS DE POTÊNCIA CONSTANTE EM SOLO COM VARIAÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, 1996. **Anais [...]** Bauru: CBEA, 1996.

COSTA, Fernanda Martineli, BACELLAR, Luis de Almeida Prado e SILVA, Eder Fonseca. Vertedores portáteis em microbacias de drenagem. Rem: **Revista Escola de Minas** [online]. 2007, v. 60, n. 2 [Acessado 30 Junho 2021] , pp. 213-218. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000200002>>. Epub 06 Ago 2007. ISSN 1807-0353. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672007000200002>.

CRUZ, Jussara; TUCCI, Carlos. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p111-124>.

DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton; ROMA, Woodrow Nelson Lopes. **Avaliação e perspectivas do método térmico com termistores ntc no monitoramento da umidade de solos utilizando sistemas automáticos de aquisição**. 1989. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

DALOLA, S.; CERIMOVIC, S.; KOHL, F.; BEIGELBECK, R.; SCHALCO, J.; FERRARI, V.; MARIOLI, D. KEPLINGER, F.; SAUTER, T. MEMS Thermal Flow Sensor With Smart Electronic Interface Circuit. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 12, p. 3318-3328, 2012.

DAN ROWE (Usa). Rowe Technologies. **Rowe EDU - ADCP Applications Summary**. 2020. Rowe EDU - ADPC Applications Sumary. Disponível em: http://www.rowetechinc.com/blog/adcp_application_summary/. Acesso em: 05 nov. 2021.

EGUTI, Carlos César Aparecido. **Desenvolvimento de um Circuito Eletrônico Experimental de Anemômetro de Fio Quente**. 2005. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ELETROGATE (Belo Horizonte). **Kit Arduino Basic**. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/kit-arduino-basic>. Acesso em: 01 out. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (org.). **Crops and Drops**. Roma: FAO, 2002. Disponível em: http://www.fao.org/3/y3918e/y3918e02.htm#P0_0. Acesso em: 15 jun. 2021.

GARCEZ, Lucas Nogueira. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1988. 291 p.

HIDROMECH. **Micro molinete**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.hidromechc.com.br/copia-contador-digital-1>. Acesso em: 05 nov. 2019.

HIDROMECH. **Molinete** **Newton**. Disponível em: <https://www.hidromechc.com.br/copia-molinete-mini>. Acesso em: 05 nov. 2019.

HIRSCH, Robert M.; COSTA, John E. U. S. stream flow measurement and data dissemination improve. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, [S.L.], v. 85, n. 20, p. 197-203, 18 maio 2004. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2004eo200002>.

LAMON, Antônio Wagner. **Caracterização de biofilmes em filtros lentos domiciliares operados em fluxo contínuo e intermitente com o uso de microsensores**. 2020. 338 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2020.

MACIEL, Geraldo de Freitas; DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton. Medição de velocidades pontuais em água por meio de transferência de calor, utilizando sonda térmica NTC. IN: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA NORTE-NORDESTE, 3., 1994, Belém. **Anais [...]** Belém: Universidade Federal do Pará – Câmpus Universitário do Guamá, 1994, p. 311-314.

MARTINS JR, W. N. **Perdas de carga e velocidades induzidas em Reatores Aeróbios de Leito Fluidizado com Circulação**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2005.

MAXIGAS, Peter. Hacklabs and hackerspaces: Tracing two genealogies. **Journal Of Peer Production**. Lancaster, UK, p. 1-2. jul. 2012. Disponível em: <http://peerproduction.net/issues/issue-2/peer-reviewed-papers/hacklabs-and-hackerspaces/>. Acesso em: 05 nov. 2021.

MEASUREMENT COMPUTING CORPORATION (org.). **TracerDAQ and TracerDAQ Pro**. 2021. Disponível em: <https://www.mccdaq.com/daq-software/tracerdaq-series.aspx>. Acesso em: 20 jun. 2021.

MEDIR COMÉRCIO E SERVIÇOS DE APARELHOS DE MEDIÇÃO EIRELI. **Micro - Molinete Universal Medir para uso profissional**. Disponível em: http://www.aparelhosmedir.com/micro-_molinete_13.html. Acesso em: 05 nov. 2019.

MILANESE, D. H. E. **Hidrodinâmica de reatores aeróbios retangulares de leito fluidizado com circulação**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2002.

MOORE, John P.. **A Thermistor Based Sensor for Flow Measurement in Water**. 2003. 125 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências, School of Physical Sciences, Dublin City University, Dublin, 2003.

MYLROI, M. G.; CALVERT, G. **Measurement and instrumentation for control**. IEE control engineering series, 26. Peter Peregrinus Ltd. London, 1984.

PIAU, Leonardo Peres Araújo. **Controle de vazões outorgadas: estudo de caso da bacia do São Francisco**. 2016. 216 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/22830>. Acesso em: 01 maio 2022.

PEREIRA, Francisco Aécio de Lima *et al.* Desenvolvimento de sensor de umidade do solo utilizando o princípio da resistência elétrica. **Irriga**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 29-41, 31 mar. 2021. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2021v26n1p29-41>.

Petropoulos, A.; Kontakis, K.; Kaltas, G.; Goglides, E. **Evaluation of a Microfluidic Sensor Fabricated on Polymeric Material**. DTIP, Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of Mems/Moems, pages 1-4, 2009.

RUGGERI JR, H. C. **Hidrodinâmica de reatores aeróbios de leito fluidizado com circulação em tubos concêntricos**. 2002. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2002.

SANCHES, Rafael Grecco *et al.* Proposta de pluviômetro de baixo custo utilizando a plataforma de prototipagem Arduino. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, Campinas, p. 2024-2035, jul. 2017. Instituto de Geociências - UNICAMP. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2416>.

SARPONG, David *et al.* Do-it-yourself (DIY) science: the proliferation, relevance and concerns. **Technological Forecasting And Social Change**, [s. l.], v. 158, p. 120127, set. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120127>.

SIMPSON, Michael R.. Discharge measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler. **U.S. Geological Survey: Open-File Report**, Sacramento, v. 1, n. 1, p. 1-134, 2002. DOI: [Http://dx.doi.org/10.3133/ofr011](http://dx.doi.org/10.3133/ofr011).

SILVEIRA, Geraldo; TUCCI, Carlos. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 97-110, 1998. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v3n3.p97-110>.

SOFTWARE INFORMER (org.). **TracerDAQ 2.1**. 2021. Disponível em: <https://tracerdaq.software.informer.com/2.1/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142008000200002>.

WENDLING, Marcelo. **Sensores**. 2010. Disponível em: <https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>. Acesso em: 20 maio 2021.

ANEXO A – Valores das medições executadas no primeiro teste da sonda convectiva com potência variável

Potência (W)	Voltagem (v)	Δm (kg)	Volume (L)	Δt (s)	Área (m ²)	Q (m/s ²)	Velocidade (m/s)	Resistência inicial (Ω)	10s	20s	30s	40s	60s	ΔT (°C)
1	5	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,100	1,064	1,064	1,064	1,064	1,064	1,00
5	12,6	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,106	0,870	0,866	0,836	0,864	0,862	7,50
10	18,7	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,106	0,697	0,684	0,692	0,702	0,704	13,90
10	18,7	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,106	0,725	-	-	-	-	12,95
10	18,7	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,106	0,733	-	-	-	-	12,60
10	18,7	3,07	3,085	28,90	0,00196	0,00011	0,0544	1,106	0,741	0,739	0,737	-	-	12,43
10	18,7	3	3,015	19,97	0,00196	0,00015	0,0769	1,105	0,789	0,791	0,797	0,797	-	9,93
10	18,7	3	3,015	19,97	0,00196	0,00015	0,0769	1,105	0,807	0,806	0,823	0,822	0,824	8,89
10	18,7	3	3,015	19,97	0,00196	0,00015	0,0769	1,106	0,832	0,839	0,840	-	-	8,31
10	18,7	5,82	5,849	9,89	0,00196	0,00059	0,3012	1,109	0,942	0,944	0,953	-	-	4,52
10	18,7	5,82	5,849	9,89	0,00196	0,00059	0,3012	1,110	0,948	0,964	0,970	-	-	4,02
10	18,7	5,82	5,849	9,89	0,00196	0,00059	0,3012	1,110	0,976	0,977	0,977	-	-	3,80
10	18,7	5,82	5,849	9,89	0,00196	0,00059	0,3012	1,115	1,015	1,019	1,024	-	-	2,52
20	25,72	7,62	7,658	5,18	0,00196	0,00148	0,7530	1,124	0,953	0,954	0,956	-	-	4,82
20	25,62	5,09	5,116	18,55	0,00196	0,00028	0,1404	1,132	0,922	0,922	0,923	-	-	6,10
20	25,62	2,07	2,080	21,35	0,00196	0,00010	0,0496	1,134	0,880	0,878	0,878	-	-	7,68
20	25,62	1,48	1,487	77,09	0,00196	0,00002	0,0098	1,133	0,799	0,776	0,774	-	-	11,58
20	25,62	2,47	2,482	41,40	0,00196	0,00006	0,0305	1,134	0,843	0,840	0,837	-	-	9,16

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

ANEXO B – Valores das medições executadas no segundo teste da sonda convectiva com potência constante

Potência (W)	Voltagem (v)	Δm (kg)	Volume (L)	Δt (s)	Área (m ²)	Q (m/s ²)	Velocidade (m/s)	Resistência inicial (Ω)	10s	20s	30s	ΔT (°C)
19,95	25,66	1,56	1,568	37,59	0,00196	0,00004	0,0212	1,1420	0,866	0,870	0,876	7,96
19,95	25,66	1,56	1,568	37,59	0,00196	0,00004	0,0212	1,1418	0,879	0,873	0,873	8,06
19,95	25,66	2,21	2,221	29,04	0,00196	0,00008	0,0390	1,1426	0,902	0,905	0,899	7,18
19,95	25,66	2,21	2,221	29,04	0,00196	0,00008	0,0390	1,1430	0,905	0,905	0,896	7,29
19,95	25,66	4,15	4,171	20,67	0,00196	0,00020	0,1028	1,1429	0,943	0,941	0,938	5,89
19,95	25,66	4,15	4,171	20,67	0,00196	0,00020	0,1028	1,1428	0,944	0,939	0,941	5,79
19,95	25,66	4,5	4,523	13,00	0,00196	0,00035	0,1772	1,1422	0,968	0,968	0,965	5,01
19,95	25,66	4,5	4,523	13,00	0,00196	0,00035	0,1772	1,1436	0,971	0,966	0,966	5,02
19,95	25,66	6,34	6,372	12,34	0,00196	0,00052	0,2630	1,1441	0,988	0,986	0,983	4,50
19,95	25,66	6,34	6,372	12,34	0,00196	0,00052	0,2630	1,1441	0,986	0,984	0,984	4,47
19,95	25,66	6,55	6,583	10,58	0,00196	0,00062	0,3169	1,1448	0,995	0,993	0,991	4,28
19,95	25,66	6,55	6,583	10,58	0,00196	0,00062	0,3169	1,1450	0,993	0,992	0,990	4,31
19,95	25,66	7,26	7,296	10,39	0,00196	0,00070	0,3577	1,1452	0,998	0,995	0,996	4,13
19,95	25,66	7,26	7,296	10,39	0,00196	0,00070	0,3577	1,1466	1,000	0,997	0,995	4,20
19,95	25,66	8,37	8,412	10,39	0,00196	0,00081	0,4123	1,1468	1,005	1,002	0,999	4,09
19,95	25,66	8,37	8,412	10,39	0,00196	0,00081	0,4123	1,1485	1,005	1,001	1,000	4,10
19,95	25,66	7,97	8,010	9,74	0,00196	0,00082	0,4188	1,1487	1,005	1,002	1,001	4,07
19,95	25,66	7,97	8,010	9,74	0,00196	0,00082	0,4188	1,1501	1,004	1,002	1,001	4,11

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

ANEXO C – Valores das medições executadas no terceiro teste da sonda convectiva com potência constante com alteração da posição do sensor térmico NTC

Potência (W)	Voltagem (v)	Δm (kg)	Volume (L)	Δt (s)	Área (m ²)	Q (m/s ²)	Velocidade (m/s)	Resistência inicial (Ω)	10s	20s	30s	ΔT (°C)
19,95	25,66	7,97	8,010	9,74	0,00196	0,00082	0,4188	1,1505	1,004	1,003	1,002	4,09
19,95	25,66	7,97	8,010	9,74	0,00196	0,00082	0,4188	1,1516	1,007	1,003	1,005	4,03
19,95	25,66	6,97	7,005	8,82	0,00196	0,00079	0,4045	1,1526	1,013	1,004	1,005	4,05
19,95	25,66	6,97	7,005	8,82	0,00196	0,00079	0,4045	1,1522	1,009	1,006	1,004	4,07
19,95	25,66	7,2	7,236	10,65	0,00196	0,00068	0,3460	1,1529	1,001	0,997	0,997	4,30
19,95	25,66	7,2	7,236	10,65	0,00196	0,00068	0,3460	1,1540	1,001	0,995	0,996	4,36
19,95	25,66	5,41	5,437	13,20	0,00196	0,00041	0,2098	1,1533	0,969	0,965	0,964	5,32
19,95	25,66	5,41	5,437	13,20	0,00196	0,00041	0,2098	1,1533	0,971	0,966	0,964	5,32
19,95	25,66	3,54	3,558	21,83	0,00196	0,00016	0,0830	1,1524	0,893	0,885	0,878	8,15
19,95	25,66	3,54	3,558	21,83	0,00196	0,00016	0,0830	1,1522	0,888	0,875	0,883	7,97
19,95	25,66	2,29	2,302	29,53	0,00196	0,00008	0,0397	1,151	0,803	0,803	0,786	11,56
19,95	25,66	2,29	2,302	29,53	0,00196	0,00008	0,0397	1,1503	0,793	0,764	0,802	10,91
19,95	25,66	0,64	0,643	37,28	0,00196	0,00002	0,0088	1,1488	0,673	0,642	0,669	16,66
19,95	25,66	0,64	0,643	37,28	0,00196	0,00002	0,0088	1,1465	0,673	0,665	0,666	16,75
19,95	25,66	0,19	0,191	50,79	0,00196	0,00000	0,0019	1,1460	0,668	0,686	0,657	17,18
19,95	25,66	0,19	0,191	50,79	0,00196	0,00000	0,0019	1,1437	0,672	0,663	0,658	17,07

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).