

Universidade Brasil
Campus de Fernandópolis

JALES LÚCIO DE ANDRADE JÚNIOR

CF-SPEED 20 - MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO EM
CANAIS POR DIFERENCIAL DE PRESSÃO
CF-SPEED 20 - FLOW SPEED METER IN CHANNELS BY PRESSURE
DIFFERENTIAL

Fernandópolis – SP
2020

Jales Lúcio de Andrade Júnior

CF-SPEED 20 - MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO EM CANAIS POR
DIFERENCIAL DE PRESSÃO

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sérgio Vanzela

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Fernandópolis – SP
2020

FICHA CATALOGRÁFICA

A565c Andrade Júnior, Jales Lúcio de.
CF-Speed 20 – Medidor de velocidade de escoamento em canais por diferencial de pressão/ Jales Lúcio de Andrade Júnior. São Paulo – SP: [s.n.], 2020.
61 p.: il.; 29,5cm.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Sérgio Vanzela.

1.Hidrometria. 2.Vazão. 3.Sensores. 4.Arduino. 5.Recursos hídricos. I.Título.

CDD 551.48



TERMO DE APROVAÇÃO

JALES LÚCIO DE ANDRADE JÚNIOR

**“CF-SPEED 20 - MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO
EM CANAIS POR DIFERENCIAL DE PRESSÃO”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, pela seguinte banca examinadora:



Prof(a). Dr(a) Luiz Sergio Vanzela (Presidente)



Prof(a). Dr(a) Juliana Heloisa Pinê Américo Pinheiro (Universidade Brasil)



Prof(a). Dr(a) Marcelo Luis Murari (Instituto Federal de São Paulo)

Fernandópolis, 27 de novembro de 2020



Termo de Autorização

Para Publicação de Dissertações e Teses no Formato Eletrônico na Página WWW do Respeetivo Programa da Universidade Brasil e no Banco de Teses da CAPES

Na qualidade de titular(es) dos direitos de autor da publicação, e de acordo com a Portaria CAPES no. 13, de 15 de fevereiro de 2006, autorizo(amos) a Universidade Brasil a disponibilizar através do site <http://www.universidadebrasil.edu.br>, na página do respectivo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, bem como no Banco de Dissertações e Teses da CAPES, através do site <http://bancodeteses.capes.gov.br>, a versão digital do texto integral da Dissertação/Tese abaixo citada, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira.

A utilização do conteúdo deste texto, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, fica condicionada à citação da fonte.

Título do Trabalho: "CF-SPEED 20 - MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO EM CANAIS POR DIFERENCIAL DE PRESSÃO"

Autor(es):

Discente: Jales Lúcio de Andrade Júnior

Assinatura: Jales Lúcio de Andrade Júnior

Orientador: Luiz Sergio Vanzela

Assinatura: Luiz Sergio Vanzela

Data: 27/novembro/2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, porque sem Ele e a sua permissão, eu não haveria concluído esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação contou com a ajuda de diversas pessoas, entre elas estão:

A minha família, em especial o meu pai Jales Lúcio, que sempre me incentivou e me apoiou em todas minhas decisões durante o mestrado.

Ao meu orientador, que sempre me ensinou, me cobrou e me ajudou, para que, esta dissertação fosse um grande sucesso. Obrigado pelos ensinamentos professor Vanzela.

Ao laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Estadual Paulista – UNESP de Ilha Solteira por disponibilizar o molinete Hidrométrico utilizado nas calibrações e testes.

Aos meus professores do Mestrado em Ciências Ambientais, que através de seus ensinamentos permitiram que eu concluísse esta dissertação.

Ao Instituto Federal do Mato Grosso do Sul e aos meus colegas de trabalho, em especial aos meus amigos José Aparecido Jorge e Murilo Miceno Frigo.

Aos meus colegas de sala Bruna, Aparecida, Joelma, Marilene, Midian, Rita e Vinicius, por me ajudarem diretamente e indiretamente com a minha dissertação.

CF-SPEED 20 - MEDIDOR DE VELOCIDADE DE ESCOAMENTO EM CANAIS POR DIFERENCIAL DE PRESSÃO

RESUMO

As bacias hidrográficas são muito importantes para o ciclo hidrológico, a entrada de água é por meio de precipitação, enquanto a saída ocorre por meio de escoamento e evapotranspiração. Este escoamento pode ser monitorado por meio de cálculos probabilísticos e algoritmos de precisão. Em córregos e rios, o monitoramento de vazão é realizado por vários métodos e técnicas, como por exemplo molinete hidrométrico, calhas, doppler acústicos ou até mesmo métodos com flutuadores. Hoje com as novas tecnologias, a importância da inovação tecnológica se tornou algo importante, pensando nisso, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver um dispositivo de medição de velocidade de escoamento em canais por meio de pressão, denominado CF-SPEED 20. O medidor foi desenvolvido na Universidade Brasil – Campus Fernandópolis e é composto por sensores (pressão), módulos amplificadores digitais (HX711) e cartão de memória, conectados a plataforma Arduino. A estrutura onde fica os sensores e os circuitos eletrônicos foi construída utilizando material de baixo custo e a base de plástico. Para dar maior equilíbrio e precisão durante a medição, foi instalado na parte superior da estrutura um nível bolha formato T. Em cinco testes realizados pelo CF-SPEED 20, foi coletado e armazenado dados da velocidade de escoamento em um determinado trecho do córrego, permitindo calcular a quantidade de água que passa naquele local. A calibração do CF-SPEED 20 foi realizada por regressão, sendo uma variável a velocidade de escoamento mensurada pelo molinete hidrométrico e a variável com a diferença de tensão medida nos sensores de pressão. Os resultados obtidos da calibração dos sensores e a aplicação do medidor apresentaram ótima confiabilidade na obtenção de dados da velocidade de escoamento. Pode-se concluir que o medidor CF-SPEED 20 é funcional para medições de velocidade de escoamento utilizando a pressão diferencial e com custo baixo quando comparado a outros equipamentos disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Hidrometria, Vazão, Sensores, Arduino, Recursos hídricos

CF-SPEED 20 - FLOW SPEED METER IN CHANNELS BY PRESSURE DIFFERENTIAL

ABSTRACT

The river basins developments are very important for the water cycle, the entry of water is through precipitation, while the exit occurs through runoff and evapotranspiration. This flow can be monitored by means of probabilistic calculations and precision algorithms. In streams and rivers, flow monitoring is carried out by various methods and techniques, such as hydrometric windlass, gutters, acoustic doppler or even methods with floats. Today with the new technologies, the importance of technological innovation has become something important, thinking about it, the present work aims to develop a device for measuring flow velocity in channels by means of pressure, called CF-SPEED 20. The meter it was developed at Universidade Brasil - Campus Fernandópolis and consists of sensors (pressure), digital amplifier modules (HX711) and memory card, connected to the Arduino platform. The structure where the sensors and electronic circuits are located was built using low cost material and the plastic base. To provide greater balance and accuracy during measurement, a bubble level T-shape was installed on the upper part of the structure. In five tests performed by the CF-SPEED 20, flow velocity data was collected and stored in a given stretch of the stream, allowing calculate the amount of water passing through that location. The calibration of the CF-SPEED 20 was performed by regression, with one variable being the flow rate measured by the hydrometric reel and the variable with the voltage difference measured in the pressure sensors. The results obtained from the calibration of the sensors and the application of the meter, show an excellent reliability in obtaining data of the flow velocity. It can be concluded that the CF-SPEED 20 meter is functional to capture the flow velocity using the differential pressure and at a low cost.

Keywords: Hydrometry, Flow, Sensors, Arduino, Water Resource

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Esquema da medição de velocidade de escoamento pelo método do flutuador.....	23
Figura 2 – medição de velocidade de escoamento por molinete hidrométrico.....	24
Figura 3 – Esquema do número e profundidades das medidas de velocidade de escoamento na vertical (s, 0,2h, 0,4h, ..., f) por molinete hidrométrico, necessárias para compor a velocidade média do escoamento em determinado ponto da seção (L1, L2, ..., Ln).....	25
Figura 4 - Vertedor triangular de soleira delgada.....	26
Figura 5– Placa Arduino MEGA 256 R3.....	27
Figura 6 – Sistema de ligação do protótipo	28
Figura 7 - Robô RecArd.....	29
Figura 8 – Robô Seguidor Concluído	30
Figura 9 - Imagens do protótipo montado: a) módulo transmissor, b) módulo receptor.	33
Figura 10 – Estação meteorológica automática desenvolvida com o uso de Arduino.	34
Figura 11 – Sonda multiparâmetro dinâmica Aqua-X.....	34
Figura 12 – Esquema do princípio de funcionamento do CF-SPEED 20, com um tubo instalado na extremidade do conduto (A) e outro instalado no centro do conduto (B).	35
Figura 13 – Esquema da estrutura do CF-Speed 20 (A) e detalhes do conjunto medidor de diferencial de pressão (B) e o abrigo do controlador (C).	36
Figura 14– Microcontrolador Arduino MEGA 2560.....	37
Figura 15 – Sensor de pressão	38
Figura 16– Módulo HX711.....	39
Figura 17 – Display LCD 16,2	39
Figura 18 – Módulo I2C soldado ao display LCD.	40
Figura 19 – Módulo Micro SD.....	40
Figura 20 - Interface do IDE do Arduino.....	41
Figura 21 – Modelo do circuito elétrico.....	42
Figura 22 – Modelo do circuito elétrico.....	43
Figura 23 – Estrutura desenvolvida.....	43

Figura 24 – Detalhe das partes em PVC do conjunto medidor de diferencial de pressão.....	44
Figura 25 – Saída de ar para o sensor.....	45
Figura 26 – Estrutura superior do medidor.....	45
Figura 27– Sensores conectados na extremidade dos tubos Pitots.....	46
Figura 28 – Estrutura desenvolvida e pronta para medição.....	46
Figura 29 – Pontos registrados da coleta de dados do sensor de pressão, do medidor CF-SPEED 20.	47
Figura 30– Leitura realizada pelo molinete hidrométrico.....	48
Figura 31 – Leitura do Delta realizada pelo CF-SPEED20.....	48
Figura 32 – Curva de calibração da diferença de tensão entre os sensores de pressão do CF-Speed 20 (DU) e a velocidade do escoamento (v).....	49
Figura 33 – Fluxograma da programação do Molinete CF-SPEED 20.....	50
Figura 34 – Ligação da bateria com o Arduino Mega.....	52
Figura 35 – Localização do Led no Arduino Mega.....	53
Figura 36– Localização do trecho do afluente do Rio São Patricinho, Município de Itapaci GO.	54
Figura 37 – Visão de um dos pontos utilizados para realizar a medição com o CF-SPEED 20.	55
Figura 38 – CF-SPEED 20 em funcionamento no córrego.....	56
Figura 39 – Resultado da análise de regressão linear da velocidade média do escoamento medida com o molinete hidrométrico (va) em função da velocidade do escoamento medida pelo CF-Speed 20.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posições na vertical e equações para determinação da velocidade média do escoamento da seção (v_m) em função da profundidade (h).....	25
Tabela 2 – Tabela de cálculo das velocidades médias pelo Método Simplificado	31
Tabela 3 – Valores dos equipamentos utilizados.	58
Tabela 4 – Cotação de Equipamentos Comercializados no Brasil.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANA – Agencia Nacional de Águas
CAD – Computer Aided Design
CS – Chip Select
GND - Ground
LCD – Liquid Crystal Display
 $m\ s^{-1}$ – Metros por Segundo
 $m^3\ s^{-1}$ – Metros Cúbicos por Segundo
mA - Miliampère
MISO - Master IN Slave OUT
MOSI - Master Out, Slave In
pH – Potencial de Hidrogênio
RAM – Random Access Memory
SCK - Serial Clock
SCL – Serial Clock
SDA – Serial Data
USB – Universal Serial Bus
V - Volt
VDC – Voltage Direct Current

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Hidrologia	19
3.2 Hidrometria.....	19
3.2.1 Conceitos	19
3.2.2 Importância.....	20
3.2.3 Variáveis Envolvidas e Métodos.....	21
3.2.4 Método Volumétrico Direto	21
3.2.5. Métodos indiretos para estimativa da velocidade de escoamento	22
3.2.6. Método indireto por vertedores.....	26
3.3 Tecnologia do Arduino.....	27
3.3.1 Conceitos e Importância.....	27
3.3.2 Aplicações	28
3.3.2.1 Automação	28
3.3.2.2 Robótica	29
3.3.3. Limitações	30
3.3.4. Plataforma Arduino em monitoramentos ambientais.....	32
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1. Desenvolvimento.....	35
4.2. Princípio e funcionamento	35
4.3. Projeto da estrutura.....	36
4.4. Sensores e componentes eletrônicos.....	37
4.4.1. Microcontrolador.....	37
4.4.2. Sensor de pressão	38
4.4.3. Módulo HX711.....	38
4.4.4. Display LCD	39
4.4.5. Módulo cartão micro SD	40
4.5. Software	40
5. PREPARAÇÃO E MONTAGEM	42

5.1. Montagem	42
5.1.1. Circuito elétrico.....	42
5.1.2. Construção da estrutura	43
5.1.3. Instalação dos componentes eletrônicos.....	45
5.2. Calibração dos sensores	47
6. PROGRAMAÇÃO.....	50
7. OPERAÇÃO	52
7.1. Preparação.....	52
8. TESTE DE DESEMPENHO	54
8.1. Local.....	54
8.2. Metodologia.....	55
9. DESEMPENHO	56
9.1. Desempenho físico.....	56
9.2. Desempenho na medida	57
9.3. Observações relevantes.....	57
9.4. Custo	57
10. CONCLUSÃO.....	60
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica é um componente importante para a análise do ciclo hidrológico, por ser uma área de captação de fluxos de água por meio de precipitação. Ela é definida pelo divisor de águas e os cursos d'água, que por sua vez, influenciam no relevo do local. Uma bacia hidrográfica está sujeita a entradas de água por eventos de precipitação e que depois gera uma saída por escoamento, infiltração e evapotranspiração (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Para Collischonn e Tassi (2008), a vazão é o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio em um intervalo de tempo. A medição dessa vazão é expressa metros cúbicos por segundo ($m^3 s^{-1}$) no sistema internacional de unidades. A vazão é o resultado da precipitação sobre a bacia, descontado das saídas por infiltração e evapotranspiração, que depende das características da bacia hidrográfica.

De acordo com Shiklomanov (1998), a vazão é uma fonte renovável de recursos hídricos, exerce um efeito sobre a ecologia da superfície terrestre e desenvolvimento humano. Em prática, é a quantidade de vazão em rios que é usada para estimar a disponibilidade de água e/ou déficit de recursos hídricos para qualquer região.

Para haver um monitoramento de vazão em bacias hidrográficas existe um método por meio de previsão de vazões, que pode ser realizada a longo prazo ou a curto prazo. As vazões podem ser estimadas a longo prazo utilizando cálculos probabilísticos. Para bacias pequenas ou médias, a vazão pode ser medida com monitoramento de chuva por meio de radar meteorológico e redes telemétricas. (OLIVEIRA, 2003)

Um modelo mundialmente utilizado para previsão de vazões e que ainda é utilizado em alguns órgãos públicos e privados no Brasil, é o SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*) (ROCKWOOD, 1958). Um modelo que por meio de dados de chuva, simula e sintetiza vazões, utilizando um algoritmo e dados referentes a bacia, assim, o aparelho é calibrado e aplicado àquela região.

Existem alguns métodos para medir diretamente a vazão em cursos d'água. Nesses métodos utilizam-se materiais ou equipamentos, dentre os quais destacam-se os molinetes hidrométricos, calhas, efeito doppler acústicos ou até mesmo simples

flutuadores. Mas o método adotado interferirá diretamente na precisão, complexidade e custo do monitoramento.

Um dos aparelhos mais utilizados é o molinete hidrométrico, que realiza a medição por pequenas hélices rotacionadas pela passagem da água. É um aparelho que dá a velocidade local do escoamento da água pela medida do número de revoluções do hélice. Utilizado em medições de vazões em estações fluviométricas convencionais (COLLISCHONN; TASSI, 2008), apresentam ótima precisão.

A relação entre velocidade de escoamento e velocidade de rotação do molinete é descrita pela equação de calibração. Esta equação é fornecida pelo fabricante do molinete, porém, deve ser verificada periodicamente, pois pode ser alterada pelo desgaste das peças (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

Outra desvantagem no molinete está relacionada ao preço, em um pregão do Governo Federal, o valor estimado para aquisição de um molinete hidrométrico era no valor de R\$ 12.143,00 (PORTAL DA TRANSPARÊNCIA, 2013). Por conta do preço e da calibração, não há uma aquisição em massa por órgãos públicos e privados.

Entretanto, as novas tecnologias disponíveis de microprocessamento, microcomputadores, sistemas embarcados e nano tecnologia, os molinetes hidrométricos poderão ser substituídos por sistemas e *hardwares*, mantendo-se a qualidade em medições, porém, com custo significativamente inferior.

Essas tecnologias além de ser promissoras em melhorar o funcionamento desses equipamentos, permite a introdução de novos métodos de medição de vazão. A inovação tecnológica poderá beneficiar o monitoramento hidrológico com mesma qualidade, maior rapidez no processamento de dados e menos investimento em infraestrutura.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento de medição de velocidade de escoamento em canais por diferencial de pressão, denominado CF-SPEED 20 (Channel Flow Speed 20).

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver sistema sensor integrado ao de coleta e armazenamento de dados;
- Programar o sistema de coleta e armazenamento de dados;
- Desenvolver a plataforma para o embarque de sistemas eletrônicos;
- Realizar a calibração do sensor;
- Testar a tecnologia em campo;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Hidrologia

Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua relação com o meio ambiente, incluindo as formas vivas (CHOW, 1959).

Para Collischonn e Tassi (2008a) hidrologia é o estudo da água na superfície terrestre, no solo e no subsolo. Ela pode ser tanto uma ciência como um ramo da engenharia e com os aspectos comuns com a meteorologia, geologia, geografia, agronomia, engenharia ambiental e a ecologia. A Hidrologia utiliza como base conhecimentos em hidráulica, física e estatística. Uma diferença entre a Hidrologia e as demais ciências que estudam o comportamento da água, está no estudo dos processos do ciclo de água em contato com os continentes.

A hidrologia é uma ciência que teve uma evolução em face aos problemas crescentes na ocupação das bacias, do incremento da utilização da água e do resultante impacto sobre o meio ambiente. De uma ciência descritiva e qualitativa, evoluiu para métodos quantitativos pelas metodologias matemáticas e estatísticas, melhorando os resultados e explorando melhor as informações existentes. Com isso, a quantificação da disponibilidade hídrica serve de base para o projeto e planejamento dos recursos hídricos, por exemplo, na produção de energia hidrelétrica, abastecimento de água, navegação, controle de enchentes e impacto ambiental (TUCCI, 1993).

3.2 Hidrometria

3.2.1 Conceitos

Desde os tempos de Leonardo da Vinci no século XV, vem sendo desenvolvidas atividades para medição de vazão em rios. Saber o comportamento de um rio naquela época já era importante. Hoje sabe-se que, com dados de vazão, é possível conhecer um regime fluvial. Esses dados são importantes para o planejamento dos recursos hídricos, previsão de cheias, gerenciamento de bacias hidrográficas, saneamento básico, abastecimento público e industrial, navegação,

irrigação, transporte, meio ambiente e muitos outros estudos de grande importância científica e socioeconômica (IBIAPINA, 1999; KOBIYAMA; GRISON; MOTA, 2011).

A Hidrometria é a parte da hidrologia responsável pela coleta e fornecimento de dados, sendo a base experimental da hidrologia, que é uma ciência natural e empírica. A Hidrometria entende e opta por métodos apropriados para a mediação de vazão, custos e detalhamento para cada área, qualidade da medição e verificação de dados. A geração de dados consistentes em diversos espaços é um dos desafios da Hidrometria. Um exemplo é como medir a vazão após uma chuva em determinada bacia sabendo que existe uma variabilidade tridimensional do fenômeno (KOBIYAMA; GRISON; MOTA, 2011).

De acordo com a Agência Nacional das Águas - ANA (2015), foi criada uma lista de termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas e nela, a Hidrometria é descrita como a ciência da medida e da análise das características físicas e químicas da água, inclusive dos métodos, técnicas e instrumentação em hidrologia.

3.2.2 Importância

Os recursos hídricos vão sendo comprometidos, principalmente a qualidade e a quantidade, além das alterações das estruturas dos cursos d'água. Com isso, a gestão dos recursos hídricos é uma ferramenta estratégica para gestão territorial, e a bacia hidrográfica é uma das principais unidades de intervenção e análise. (EMBRAPA, 2012)

Dessa forma, de acordo Spadotto (2012), conforme citado por Embrapa (2012), diz que a importância da gestão territorial como instrumento de planejamento, implantação e acompanhamento das políticas públicas e de setores privados.

Para um controle adequado dos potenciais hidráulicos disponíveis no mundo é fundamental conhecer o comportamento dos rios, suas fases estacionais e vazões, assim como os regimes pluviométricos das diversas bacias hidrográficas, considerando as suas distribuições espaciais e temporais, que exige um trabalho de coletas e interpretação de dados de forma ininterrupta, cuja a confiabilidade é maior à medida que suas séries históricas ficam mais extensas, envolvendo eventos de cheias e de secas (IBIAPINA et al., 1999). O mesmo autor ainda afirma que os dados hidrométricos são importantes nos estudos de aproveitamento hidroenergéticos,

assim como em outros segmentos, como o planejamento de uso dos recursos hídricos, previsão de cheias, gerenciamento de bacias hidrográficas, saneamento básico, abastecimento público e industrial, navegação, irrigação, transporte, meio ambiente e muitos outros estudos de grande importância científica e socioeconômica.

3.2.3 Variáveis Envolvidas e Métodos

A tecnologia vem facilitando a necessidade de monitoramento das vazões dos cursos d'água por meio de medidas de velocidade de escoamento, nível d'água, pressão e outras variáveis hidrológicas. A determinação da vazão, diretamente relacionada com a disponibilidade hídrica, é imprescindível para análise da pressão sobre o uso da água em bacias hidrográficas.

As medições de vazão podem ser realizadas por vários aparelhos ou métodos, como o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*), vertedores, calhas, molinetes hidrométricos e os flutuadores. A escolha é de acordo com o tamanho da bacia, condições da calha do curso d'água, recursos financeiros disponíveis e precisão requerida (ALMEIDA JUNIOR et al., 2010).

3.2.4 Método Volumétrico Direto

Nos métodos diretos são utilizados recipientes de volume conhecido. Mede-se o tempo necessário para que esse volume conhecido seja ocupado pela água. É processo aplicado em casos de pequenas descargas que podem ser convergidas em um único ponto e sob condições muito favoráveis para a captação no recipiente de volume conhecido (STUDART, 2006)

Este método é denominado de volumétrico direto, determinado em função do intervalo de tempo (Δt) que determinado fluxo de água leva para ocupar um recipiente de volume conhecido (ΔV) (SANTOS et al., 2001). Esse método pode ser expresso pela Equação 01.

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \dots\dots\dots \text{Equação 01}$$

Ainda, de acordo com Santos et al. (2001), é recomendável a realização de uma média de no mínimo três repetições das medidas, para melhorar a precisão da determinação.

3.2.5. Métodos indiretos para estimativa da velocidade de escoamento

Os métodos indiretos se fundamentam na estimativa indireta da velocidade do escoamento de água (v) e na seção molhada (S_m) do canal, a partir da Equação 02.

$$Q = v \cdot S_m \quad , \text{ sendo: } \dots\dots\dots \text{Equação 02}$$

Q – vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

v – velocidade do escoamento de água na seção do canal (m s^{-1});

S_m – seção molhada do canal (m^2).

A seção molhada é determinada por batimetria, enquanto a velocidade média do escoamento pode ser estimada por diferentes métodos e equipamentos, os quais serão descritos a seguir.

a. Flutuador

É o método que estima a velocidade média do escoamento da água a partir da medida da velocidade do deslocamento de um objeto flutuante (flutuador) na superfície da água, que é calculado em função do tempo necessário de deslocamento do flutuador em trecho, do curso d'água, de comprimento conhecido. Segundo Santos et al. (2001) é recomendado para situações de risco a vida dos hidrometristas ou na falta de um equipamento para uma medição mais exata.

Embora este método seja simples e necessite de poucos equipamentos, quando se quer precisão, o flutuador não é recomendável (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA, 1990), pois a velocidade da água não é homogênea ao longo de qualquer seção transversal ao canal e nem mesmos ao longo da profundidade (MARTINELLI; KRUSCHE, 2004). Neste método a determinação da velocidade do escoamento pode ser expressa pela equação 03 (Figura 1).

$$v = 0,85 \cdot \frac{\Delta d}{\overline{\Delta t}}, \text{ sendo: } \dots\dots\dots \text{Equação 03}$$

v – velocidade média do escoamento (m s^{-1});

Δd – intervalo de espaço percorrido pelo flutuador (m);

$\overline{\Delta t}$ – média do intervalo de tempo do percurso do flutuador no espaço percorrido (s).

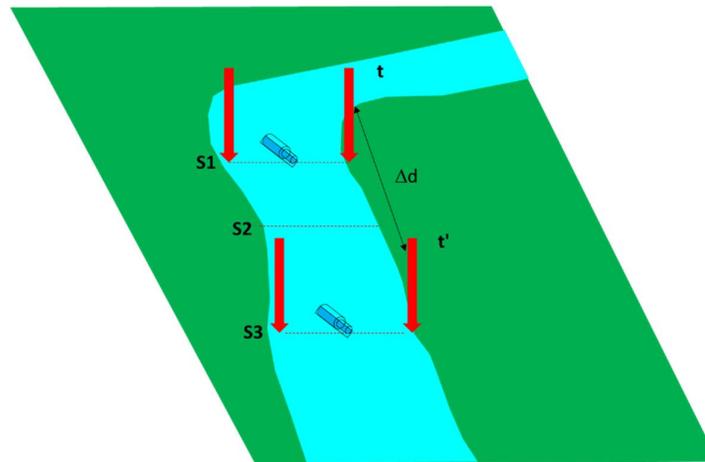


Figura 1– Esquema da medição de velocidade de escoamento pelo método do flutuador.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Para melhorar a precisão do método do flutuador recomenda-se que a seção molhada seja determinada pela média das seções (S1, S2 e S3) e o intervalo médio de tempo ($\overline{\Delta t}$) seja calculado a partir da medição de no mínimo cinco intervalos de tempo (Δt) entre as seções S1 e S3 (Figura 1).

b. Molinete hidrométrico

O molinete hidrométrico é um instrumento que permite estimar a velocidade do escoamento a partir da frequência de rotações de uma hélice posicionada perpendicularmente a direção do escoamento de água nos canais (Figura 2). A estimativa é realizada, segundo Collischonn e Tassi (2008), a partir de equação é fornecida pelo fabricante do equipamento, que necessita de análises periódicas, devido ao desgaste das peças.



Figura 2 – medição de velocidade de escoamento por molinete hidrométrico.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Para canais com profundidade superior a 0,60 m, a velocidade média do escoamento deve ser integrada com a medição das velocidades médias na vertical da seção do canal (Figura 3), em que de acordo com Santos et al. (2001), a velocidade superficial é medida a 10 cm de profundidade para que a hélice do molinete fique submersa, enquanto que a velocidade do fundo é medida entre 15 e 25 cm acima do fundo, por conta do lastro ao eixo do molinete.

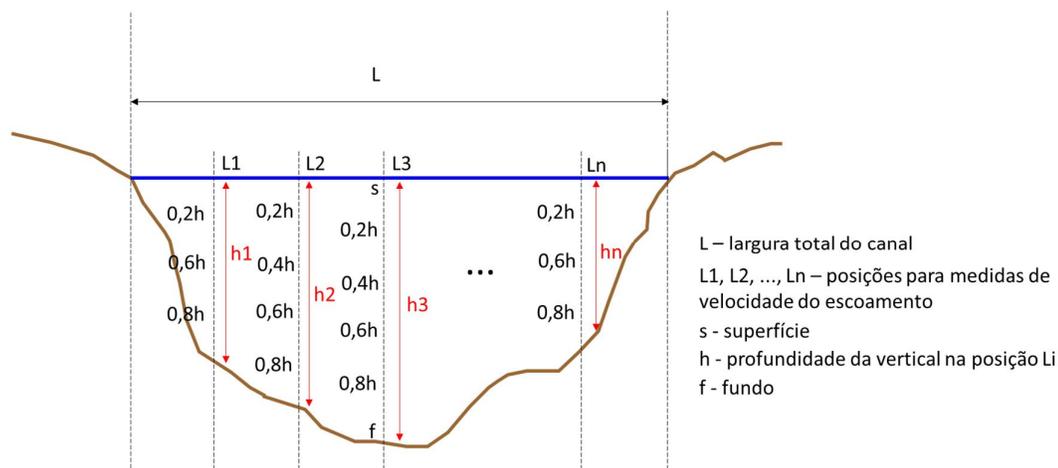


Figura 3 – Esquema do número e profundidades das medidas de velocidade de escoamento na vertical (s, 0,2h, 0,4h, ..., f) por molinete hidrométrico, necessárias para compor a velocidade média do escoamento em determinado ponto da seção (L1, L2, ..., Ln).

Fonte: Autoria Própria (2020)

Santos et al. (2001) ainda recomendam a necessidade de se realizar até seis medições de velocidade de escoamento, para compor a velocidade média do escoamento, dependendo da profundidade da vertical (Tabela 1).

Tabela 1 – Posições na vertical e equações para determinação da velocidade média do escoamento da seção (v_m) em função da profundidade (h).

h (m)	Pontos	Posição	Velocidade média (v_m)
0,15 a 0,60	1	0,6h	$v_m = v_{0,6}$
0,60 a 1,20	2	0,2h e 0,8h	$v_m = \frac{(v_{0,2} + v_{0,8})}{2}$
1,20 a 2,00	3	0,2h, 0,6h e 0,8h	$v_m = \frac{(v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8})}{4}$
2,00 a 4,00	4	0,2h, 0,4h, 0,6h e 0,8h	$v_m = \frac{(v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + v_{0,8})}{6}$
> 4,00	6	s, 0,2h, 0,4h, 0,6h, 0,8h e f	$v_m = \frac{[v_s + 2(v_{0,2} + v_{0,4} + v_{0,6} + v_{0,8}) + v_f]}{10}$

Fonte: Adaptado de DNAEE (1977) citada por SANTOS et al., 2001.

Dentre os erros na medição de vazão por molinetes hidrométricos destacam-se os erros na batimetria e na calibração. De acordo com Pinto e Holtz (2000), pode haver uma variação no nível da água, e quando isso acontece o correto é diminuir o tempo de medição, utilizando um método simples ou eliminando algumas verticais. Os mesmos autores ainda afirmam que na medição por molinete hidrométrico a margem de erro varia de 2% para uma condição boa e de até 15% para condição desfavorável.

3.2.6. Método indireto por vertedores

Neste método, a água é canalizada para um vertedor de dimensões conhecidas, que permitem estimar a vazão a partir da altura da lâmina d'água.

Os vertedores podem variar de acordo com o tipo de soleira (SANTOS et al., 2001). Um dos mais utilizados são os de soleira delgada, que de acordo com os mesmos autores, são constituídos de uma placa fina que intercepta transversalmente o fluxo de água, provocando uma elevação à montante e vertendo para jusante.

Os vertedores de soleira delgada podem ser ter formatos triangular, retangular, trapezoidal e outros, sendo que muitos já estão calibrados e permitem assim a transformação direta do nível da água em vazão (Figura 4).



Figura 4 - Vertedor triangular de soleira delgada.
Fonte: Vanzela (2004).

No vertedor triangular de soleira delgada com ângulo de 90° graus, a vazão é estimada a partir da relação entre carga hidráulica, distância do vértice do triângulo do vertedor ao nível da água de montante, e vazão (COLLISCHONN; TASSI, 2008). Essa relação é expressa pela Equação 04.

$$Q = 1,42 \cdot h^{2,5} \quad , \text{ sendo: } \dots\dots\dots \text{Equação 04}$$

Q – vazão (m³ s⁻¹);
h - altura do nível de água a montante do vertedor (m)

3.3 Tecnologia do Arduino

3.3.1 Conceitos e Importância

Em 2005, os pesquisadores Massimo Benzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino e David Mellis desenvolveram a plataforma Arduino. Eles buscaram desenvolver um dispositivo para controlar projetos construídos de uma forma mais simples e acessível do que outros disponíveis no mercado (SILVA et al., 2014).

O Arduino é uma plataforma versátil que utiliza eletrônica, hardware e software aberto, com baixo custo e fácil de utilizar. Sobre o hardware, ele utiliza uma placa que possui componentes ligados a um microcontrolador da família ATmega. Já as linguagens de programação utilizadas são as C e C++. Um conceito importante também do Arduino está relacionado as comunidades, que são compostas milhares de pessoas que compartilham conhecimentos e projetos (OLIVEIRA et al., 2018).

A placa Arduino possui uma configuração semelhante a de um computador, como microcontrolador, memória RAM, memória secundária (memória flash), relógio, comunicação USB e outras funções. Na Figura 5 está apresentado um modelo de placa utilizada por muitos desenvolvedores, a placa Arduino MEGA 2560 R3 (OLIVEIRA et al., 2018).



Figura 5– Placa Arduino MEGA 256 R3.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Ele foi desenvolvido utilizando o microcontrolador ATmega2560 com 54 pinos com entrada e saída digitais, 15 com saídas PWM¹ (*Pulse Width Modulation*), 16

¹ PWM consiste em manter uma onda quadrada fixa e variar o tempo que o sinal fica em nível lógico alto. (OLIVEIRA et al., 2018)

entradas analógicas e 4 portas serial. Os pinos analógicos recebem uma tensão entre 0 e 5V e produzem em uma escala de 0 a 1023. Além disso possui pinos de 3,3V, 5V e GND (Terra) para alimentação dos circuitos (OLIVEIRA et al., 2018).

De acordo com McRoberts (2011), o Arduino é uma plataforma embarcada, formada por hardware e *software* com fonte aberta. Assim, pode criar vários projetos independentes de controle, monitoramento, bastando conectá-lo a uma rede ou computador e assim receber e enviar dados do Arduino.

Ainda de acordo com McRoberts (2011), a maior vantagem do Arduino sobre outras plataformas de desenvolvimento de microcontroladores é a sua fácil utilização, ele permite que pessoas que não são da área possam rapidamente aprender e criar projetos em um curto espaço de tempo.

3.3.2 Aplicações

3.3.2.1 Automação

Outro exemplo de aplicação do Arduino é em automação. Cardoso et al. (2015) desenvolveram um protótipo para controle automático de irrigação, utilizando a plataforma Arduino UNO R3 (Figura 6). Além do Arduino, foram utilizados válvula solenoide, fonte de energia, sensor capacitivo, módulo capacitância, relé e jumpers.



Figura 6 – Sistema de ligação do protótipo (Alterado de Cardoso et al., 2015)

Nesta aplicação o sistema coleta dados da umidade do solo e capacitância conectados um PC ao Arduino, permitindo acionar um conjunto motobomba para a irrigação. Esta aplicação é de extrema importância para usos futuros no desenvolvimento de tecnologias de baixo custo para o manejo da irrigação, por meio

do controle da válvula solenoide quando a unidade de irrigação for atingida (CARDOSO et al., 2015).

3.3.2.2 Robótica

Com a plataforma Arduino é possível desenvolver robôs para educação, em competições e até usos comerciais em automação.

Um exemplo para uso na educação é o denominado Projeto RecArd, que consiste em um carro-rôbo (Figura 7), a partir da plataforma de prototipagem Arduino, como um novo método para auxiliar e complementar o ensino-aprendizagem multidisciplinar. Foi aplicado em sala de aula com 34 alunos do Curso Técnico de Informática e Eletromecânica, além de estudantes do curso superior em Engenharia Elétrica (SILVA et al., 2014).

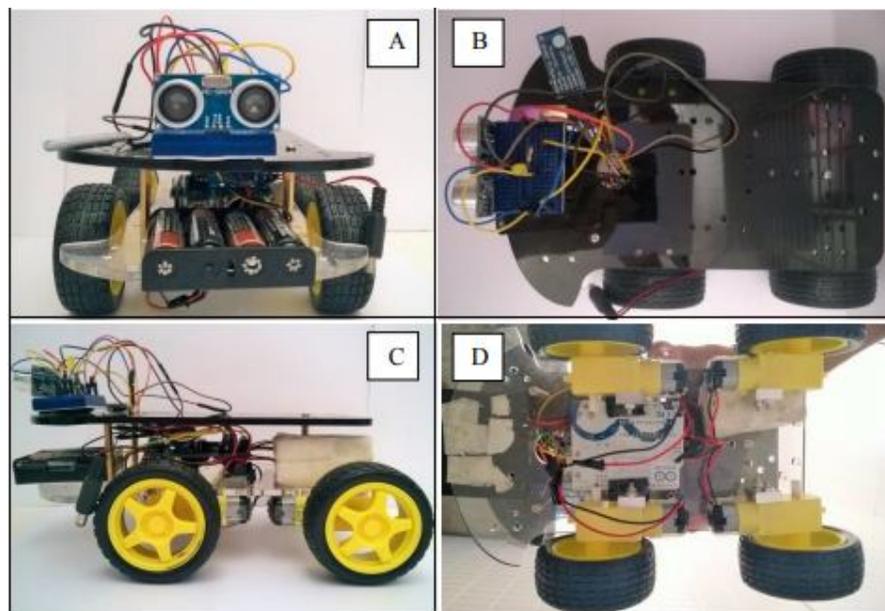


Figura 7 - Robô RecArd

Fonte: Adaptado de Silva et al., 2014

Para a construção do robô, foram necessários uma placa Arduino UNO R3, uma mini-protoboard, quatro motores DC com caixa de redução, quatro rodas de plástico, um chassi com duas placas de acrílico, um led amarelo, uma *Shield Ardufruit L293D* (Ponte H), um resistor de 330 ohms, um módulo *bluetooth* HC-06, um sensor ultrassônico, vinte e um jumpers, um conjunto de 4 pilhas AA para alimentação do Arduino, um conjunto de 8 pilhas AA para alimentação dos motores e um *smartphone*.

(SILVA et al., 2014). Ainda de acordo com os mesmos autores o projeto aborda a inserção da robótica na educação bem como sua importância, assim, relatar e apresentar os resultados coletados a partir das atuais pesquisas e debates em sala de aula.

Existem robôs que são desenvolvidos para participar de competições como os Robôs Seguidores de Linha (Figura 8). São robôs autônomos com o objetivo de seguir um trajeto descrito por uma linha desenhada sobre uma superfície de cor. Em competições, vence o robô que finaliza o caminho em menor tempo. Pensando nisso, alunos da Universidade Estadual do Piauí desenvolveram um robô de competição categoria seguidor de linha utilizando a Plataforma Arduino (PEREIRA et al., 2018).

Para desenvolver o robô foram utilizados um Arduino MEGA 2560 R3, uma Ponte H L298, um MDF 15cmx15cm, dois micromotores com redução 30:1, um par de rodas 60x8mm, uma esfera transferidora e uma barra de sensores QTR-8A. (PEREIRA et al., 2018)

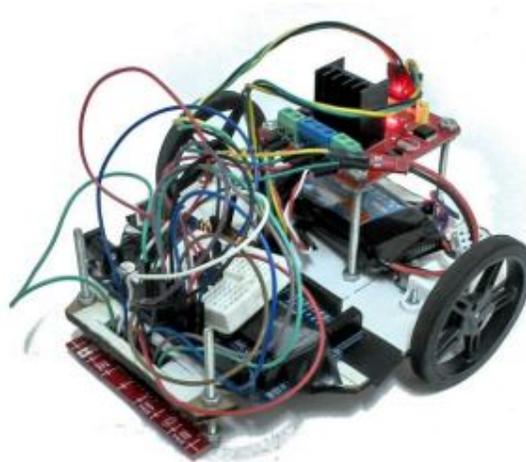


Figura 8 – Robô Seguidor Concluído

Fonte: Adaptado de Pereira et al., 2018

A pista foi desenvolvida em CAD com um tamanho de 2,10x1,40m, a linha possui uma largura de 19,0mm \pm 1mm, e foi projetada em cor branca sobre um fundo preto, conforme as regras do campeonato (PEREIRA et al., 2018).

3.3.3. Limitações

As placas de circuito impresso são componentes utilizados no desenvolvimento de equipamentos eletrônicos, principalmente em circuitos integrados.

Uma placa é desenvolvida utilizando fenolite (um tipo de papel impregnado com resina) ou fibra de vidro, com espessura de 1mm, 1,6 mm, 1,8mm e 2,5mm. Os melhores circuitos são feitos de fibra de vidro e por isso são os mais caros. Existem outros materiais como o composite, que está entre a fibra de vidro e o fenolite (LIMA; VILLAÇA, 2012).

Os fabricantes de componentes eletrônicos fornecem especificações sobre o produto por meio de datasheet. Por essas especificações demonstra-se os limites dos componentes. Na Tabela 2 está o exemplo das especificações e limites do sensor de pressão absoluta MPX5700AP.

Tabela 2 – Tabela de cálculo das velocidades médias pelo Método Simplificado

Característica	Operação
Faixa de pressão operacional	15kPa a 700kPa (2.18 ~ 101.5 PSI)
Tensão de alimentação	5V
Sensor Caso Estilo	867B-04
Nº de Pinos	6
Pinos úteis	3
Sensibilidade V/P	6.4mV/kPa
Corrente de suprimento	7Ma
Faixa de temperatura de operação	-40°C a + 125°C

Fonte: Autoria Própria (2020)

Com estas especificações a utilização do sensor é definida pelo usuário. No caso desse sensor de pressão absoluta, possui uma sensibilidade mais baixa, o que não seria suportado para identificar pressões com alta sensibilidade. Além disso, o *datasheet* fornece a faixa de temperatura que o sensor suporta, a tensão de alimentação, além da quantidade de pinos disponíveis.

Além destas informações, o *datasheet* exibe ao usuário as dimensões de cada componente, a forma de ligar, quais são os pinos de VCC (Voltagem em Corrente Contínua), GND (*Graduated Neutral Density Filter*) e de entrada e saída de dados.

A maioria dos componentes eletrônicos possuem um problema em comum, que é o desgaste por oxidação e corrosão, que ocasiona a perda de elétrons e aumento da carga (HOLANDA, 2010).

Já a corrosão eletroquímica é um processo espontâneo, quando o metal está em contato com um eletrólito, onde acontecem, simultaneamente, reações anódicas e catódicas. Mas é com mais frequência que ocorra na natureza, por conta da presença de água, na maioria das vezes a temperatura natural e criando uma pilha de corrosão (MERÇON; GUIMARÃES; MAINIER, 2014).

A corrosão eletroquímica é um desafio para o desenvolvimento tecnológico, pois o seu avanço depende da capacidade em contornar este problema. Uma forma de neutralizar este tipo de corrosão, está em isolar o metal para que não ocorra o contato com a água.

Muitas vezes os custos poderão atingir 20 vezes mais na manutenção do material. Por isso, é mais comum o emprego de técnicas anticorrosivas, como os revestimentos e os inibidores de corrosão. O mesmo pode ser aplicado em placas de circuito impresso, mas, utilizando outros métodos (MERÇON; GUIMARÃES; MAINIER, 2014).

3.3.4. Plataforma Arduino em monitoramentos ambientais

Alguns projetos inovadores têm demonstrado as utilidades promissoras do uso da Plataforma Arduino em coleta de dados para fins de monitoramentos ambientais. Um exemplo, cada vez mais pesquisado e desenvolvido, é o monitoramento climático automático.

Macedo, Nery e Landau (2018) desenvolveram dois dispositivos para transmissão de dados por rádio frequência, visando o monitoramento de dados climáticos voltado para o manejo dos cultivos e planejamento de atividades agrícolas. O protótipo utilizou duas protoboards 840 pinos, dois microcontroladores Arduino UNO R3, um sensor de temperatura, pressão e altitude Barômetro (BMP 180), um sensor de data e hora *Real Time Clock* (RTC DS1307), um módulo RF 433, um display LCD (16,2), um potenciômetro 10k, dois cabos USB (um para cada microcontrolador Arduino) e fios jumpers (Figura 9).

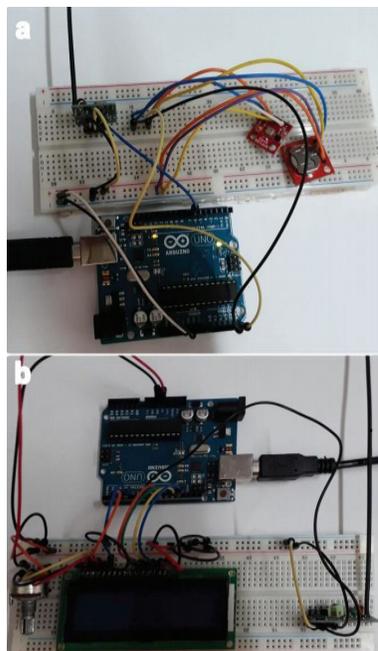


Figura 9 - Imagens do protótipo montado: a) módulo transmissor, b) módulo receptor.
Fonte: Alterado de Macedo, Nery e Landau (2018).

Oliveira (2019), utilizando Arduino integrado a outros Hardwares, desenvolveu uma central de monitoramento climático automatizada denominada de OPWeather (Figura 10), que permite coleta, armazenamento e disponibilização de dados de múltiplos sensores climáticos conectados ao SysClimate (Sistema de Monitoramento Climático).

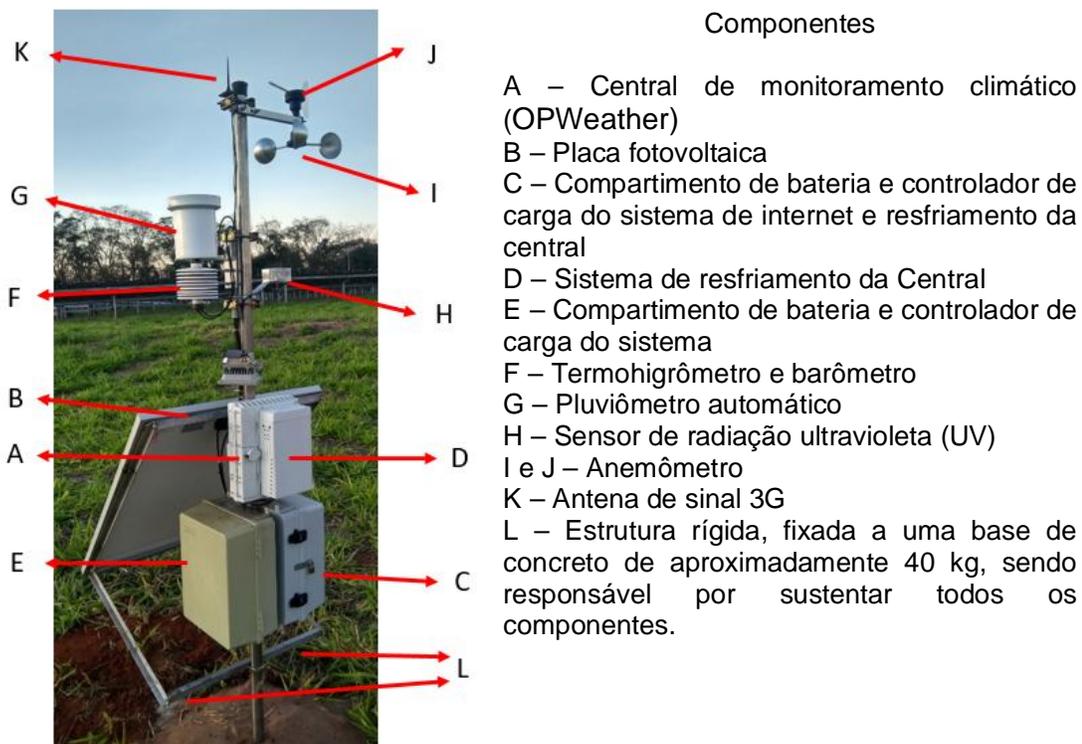


Figura 10 – Estação meteorológica automática desenvolvida com o uso de Arduino.
Fonte: Alterado de Oliveira (2019).

Outras variáveis ambientais, em que já foram utilizadas tecnologias de Arduino em monitoramentos, são as hidrológicas. Jorge Junior (2019) desenvolveu uma sonda multiparâmetro denominada Aqua-X (Figura 11), que permite o monitoramento dinâmico da qualidade de água e, em sua primeira versão, mede o pH, turbidez, temperatura e coordenadas geográficas em cursos d'água.

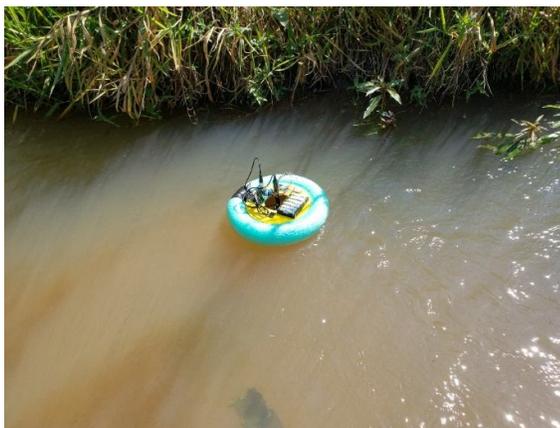


Figura 11 – Sonda multiparâmetro dinâmica Aqua-X.
Fonte: Jorge Junior (2019).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Desenvolvimento

O medidor CF-Speed 20 foi projetado e desenvolvido no Laboratório de Hidrologia e Climatologia na Universidade Brasil, Campus Fernandópolis – SP, entre o período de 12/11/2019 até 05/03/2020.

4.2. Princípio e funcionamento

A medição de velocidade do escoamento no CF-SPEED 20 é por diferencial de pressão, com o uso de Pitot (Figura 12), constituído de um tubo instalado na extremidade do conduto, em que os valores de velocidade do escoamento são próximos de zero, e outro no meio do tubo, onde a velocidade do escoamento é próxima do máximo.

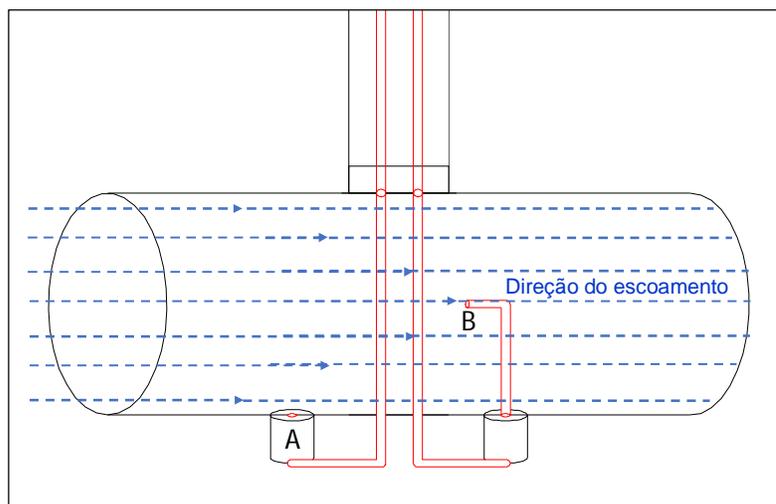


Figura 12 – Esquema do princípio de funcionamento do CF-SPEED 20, com um tubo instalado na extremidade do conduto (A) e outro instalado no centro do conduto (B).

Fonte: Autoria Própria (2020)

Portanto, a partir de sensores eletrônicos capazes de registrar variáveis relacionadas as diferenciais sensíveis de pressão entre os pontos A e B (Figura 12) é possível calibrá-los com a velocidade do escoamento.

4.3. Projeto da estrutura

Visando a adequação do princípio do Pitot para medições em canais superficiais, projetou-se uma estrutura (Figura 13A) que permitisse a submersão do conjunto de medição do diferencial de pressão (Figura 13B), sem que houvesse contato da água com os componentes eletrônicos dos sensores 01 e 02.

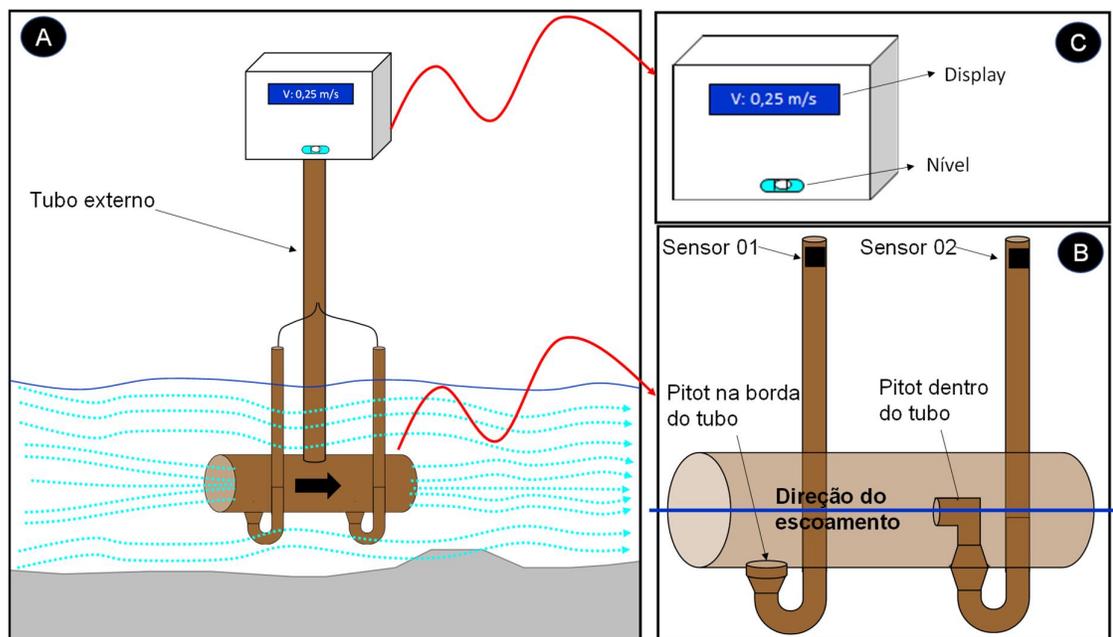


Figura 13 – Esquema da estrutura do CF-Speed 20 (A) e detalhes do conjunto medidor de diferencial de pressão (B) e o abrigo do controlador (C).
Fonte: Autoria Própria (2020)

O conjunto medidor de diferencial de pressão é composto de duas tubulações curvas que permitem conectar a entrada do Pitot aos sensores de pressão, de forma hermética e resistente a força da corrente de água. Um tubo externo central (Figura 13A) de maior diâmetro foi utilizado para fixar o conjunto medidor de diferencial de pressão ao controlador (Figura 13C), também permitindo direcionar os cabos por seu interior.

No controlador foram adicionados um display, para visualizar as medidas em tempo real, e um nível, para manter o tubo do conjunto medidor de pressão exatamente paralelo a linha do escoamento.

4.4. Sensores e componentes eletrônicos

4.4.1. Microcontrolador

O protótipo foi desenvolvido utilizando o microcontrolador Arduino MEGA 2560 (Figura 14), que por meio das entradas analógicas, recebem os sinais de tensão pelos módulos HX711 que estão ligados aos sensores de pressão.



Figura 14– Microcontrolador Arduino MEGA 2560.
Fonte: Autoria Própria (2020)

O Arduino também está ligado ao display LCD com módulo I2C que exibe em tempo real ao usuário as leituras recebidas pelas entradas analógicas. Todos os dados que aparecem no display, estão sendo armazenados em um cartão microSD do módulo cartão SD, conectado na saída do microcontrolador.

A escolha pelo Arduino Mega está relacionada a quantidade de pinos que a plataforma possui. Mas, pode ser utilizado outro modelo de Arduino como por exemplo o Arduino UNO, que possui menos pinos e configuração que o Arduino Mega, mas, consegue realizar as funcionalidades necessárias.

Além do Arduino para o desenvolvimento, foi realizada uma análise para a utilização do Raspberry. Mas não houve a necessidade de utilização do mesmo. As funções que o Raspberry possui, não terão utilidades para o desenvolvimento dos componentes eletrônicos. O Arduino é mais viável para este desenvolvimento, além do custo ser inferior em relação ao Raspberry.

4.4.2. Sensor de pressão

No CF-Speed 20 foi utilizado o sensor de pressão MPS20N0040D-D, que possui a faixa de medida entre 0 e 40 kPa, com a operação em 5 VDC (Figura 15).

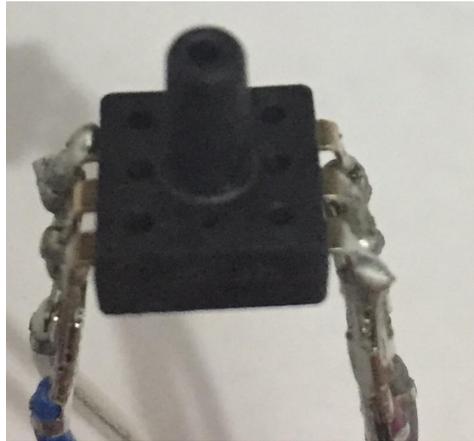


Figura 15 – Sensor de pressão
Fonte: Autoria Própria (2020)

O sensor pode ser usado em projeto de medição de pressão de pneus, interruptor de freio a ar, manômetros, monitor de ambiente e monitor de pressão arterial. A faixa de temperatura de operação é entre -40° Celsius e 85° Celsius, com a precisão linear superior a 0,25 %.

4.4.3. Módulo HX711

É um amplificador e conversor digital de 24 bits, que faz com o que os sinais de alguns dispositivos sejam amplificados, permitindo a ligação entre o sensor e o microcontrolador (Figura 16).

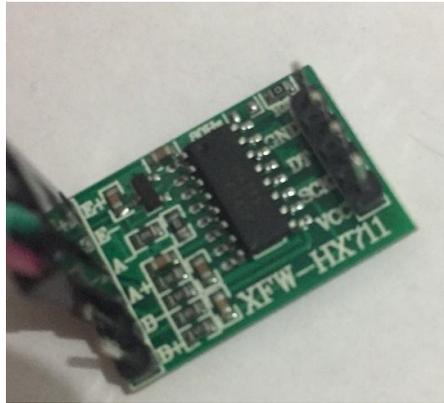


Figura 16– Módulo HX711
Fonte: Autoria Própria (2020)

Possui uma alimentação de 5 VDC, uma corrente de operação de 1,6 mA, temperatura de operação entre -20° à 85° Celsius. É muito utilizado em projetos de balança e na indústria.

4.4.4. Display LCD

O display LCD utilizado foi o módulo LCD 16x2 (dezesseis colunas e duas linhas no display). Muito utilizado em diversos tipos de projetos com sensores por mostrar os resultados em tempo real ao usuário, por ser de baixo custo e facilidade na programação. A sua tensão de operação é de 4,7 V à 5,3 V, o consumo sem a luz de fundo é de 1mA, display alfanumérico (Figura 17).



Figura 17 – Display LCD 16,2
Fonte: Autoria Própria (2020)

Ao display LCD foi acoplado um módulo I2C (Figura 18), que permite reduzir a necessidade de entradas digitais no microcontrolador. Com o módulo I2C soldado ao display, passou a utilizar apenas 4 pinos (VCC, GND, SDA e SCL).

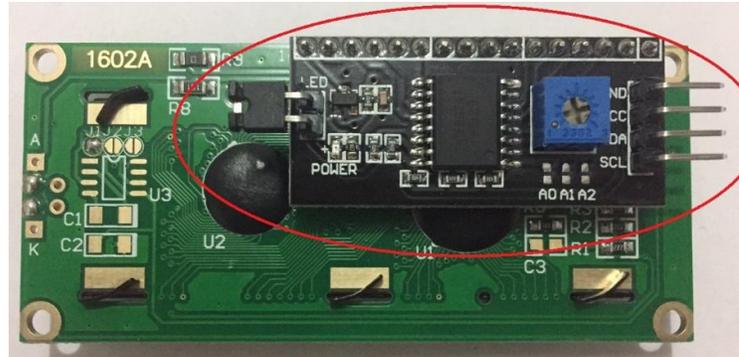


Figura 18 – Módulo I2C soldado ao display LCD.

Fonte: Autoria Própria (2020)

4.4.5. Módulo cartão micro SD

Permite a leitura e escrita em cartão SD, com fácil conexão ao microcontrolador, suporta arquivos FAT16 e FAT32 e alimentação de 3.3V ou 5V (Figura 19).

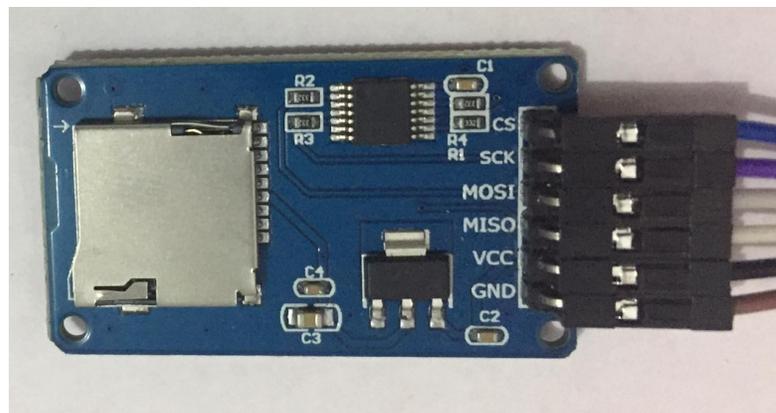


Figura 19 – Módulo Micro SD.

Fonte: Autoria Própria (2020)

A comunicação é feita pela interface SPI (pinos MOSI, SCK, MISO e CS), e o nível de sinal é de 3.3V, exigindo um divisor de tensão para ligação à microcontroladores que trabalhem em 5V.

4.5. Software

O Arduino possui um ambiente de desenvolvimento denominado *Arduino Integrated Development Environment* (IDE), programa de computador que compila linhas de código para interação entre sensores, componentes eletrônicos e usuário.

A linguagem utilizada pela IDE do Arduino é a Wiring, que é derivada da linguagem C/C++. Na Figura 20 está apresentada a interface de IDE utilizada para programar o Arduino.

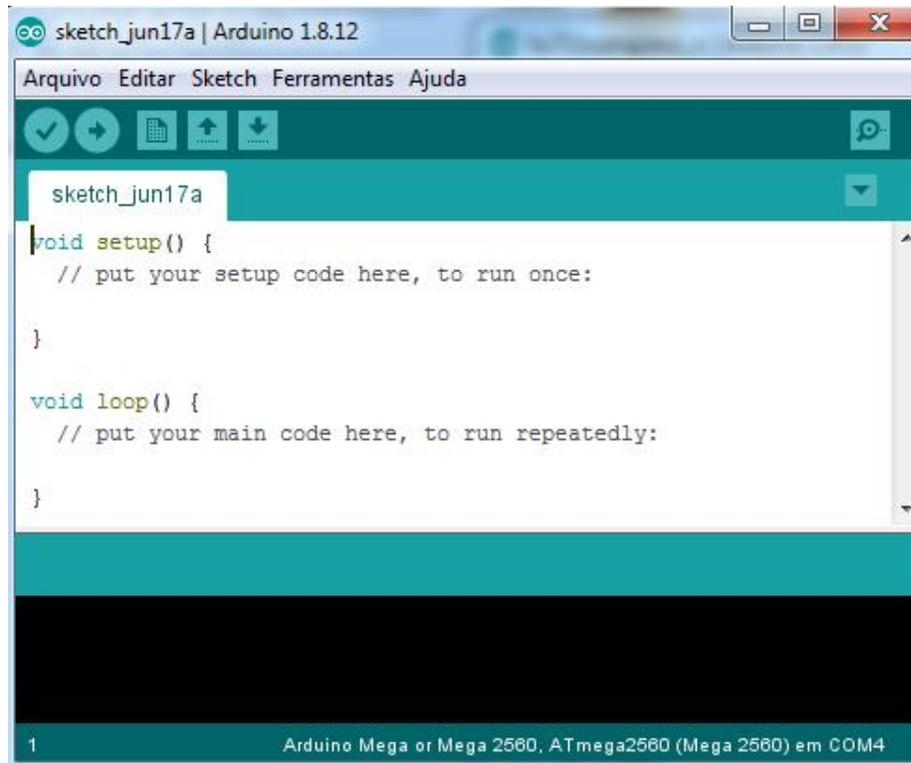


Figura 20 - Interface do IDE do Arduino.
Fonte: Autoria Própria (2020)

5. PREPARAÇÃO E MONTAGEM

5.1. Montagem

5.1.1. Circuito elétrico

Para o desenvolvimento do modelo da placa de circuito elétrico do medidor foi utilizado o software Fritzing. Dessa forma elaborou-se a placa eletrônica com o Arduino MEGA e a conexão dos sensores de pressão, os módulos HX711, o módulo Micro SD e o LCD (Figura 21).

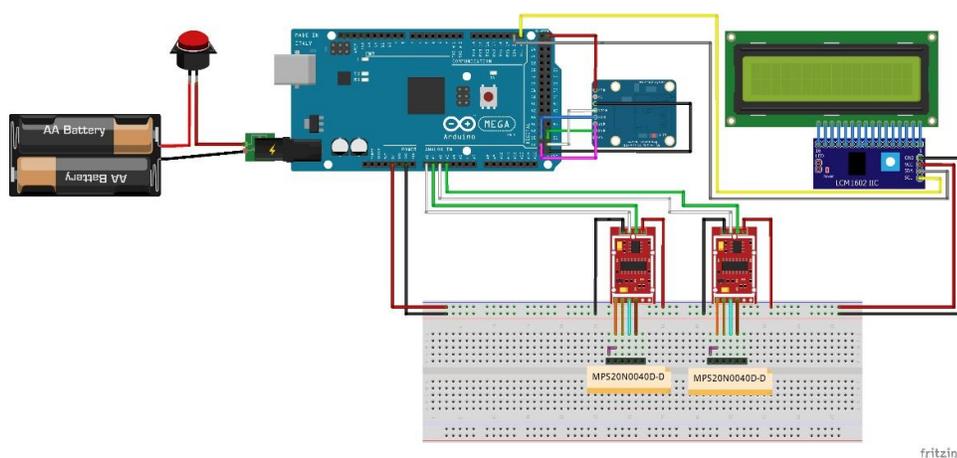


Figura 21 – Modelo do circuito elétrico
Fonte: Autoria Própria (2020)

Após o desenvolvimento do modelo foi iniciada a montagem e instalação do circuito eletrônico, com a soldagem do módulo HX711 e sensor de pressão. Foi soldado também o módulo I2C com o LCD e a ligação dos demais componentes com o Arduino MEGA (Figura 22).

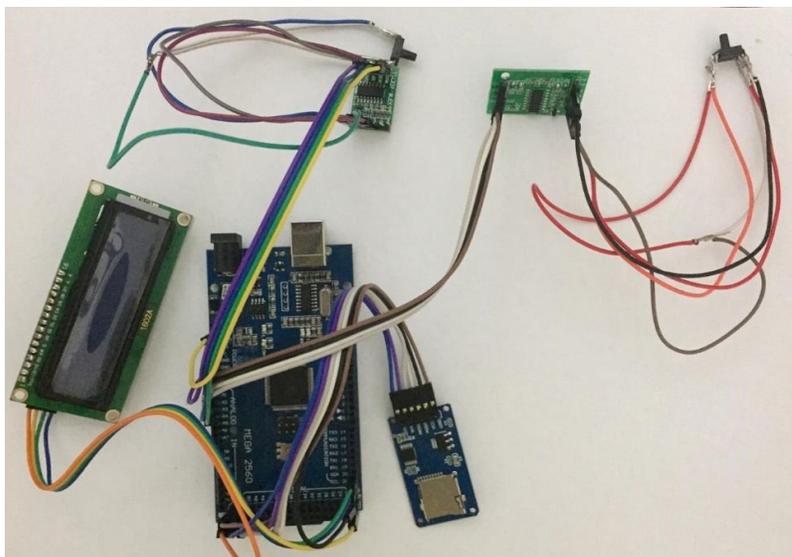


Figura 22 – Modelo do circuito elétrico
Fonte: Autoria Própria (2020)

5.1.2. Construção da estrutura

A estrutura do CF-Speed 20 foi desenvolvida visando agregar a mensuração da diferença de pressão com segurança dos hardwares, mantendo um equipamento leve e de fácil manuseio. Dessa forma, o material utilizado no tubo externo e no conjunto medidor do diferencial de pressão foi o policloreto de vinila (PVC), enquanto no abrigo do controlador utilizou-se o acrílico (Figura 23).



Figura 23 – Estrutura desenvolvida.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Para a conexão do tubo externo ao tubo de direcionamento do fluxo de água foi utilizado um “T” em PVC soldável de 2 polegadas (Figura 24a). A conexão dos Pitots ao tubo direcionador de fluxo foi por joelhos em 90° soldável em PVC do tamanho 19,05 milímetros (Figuras 24b e 24c).

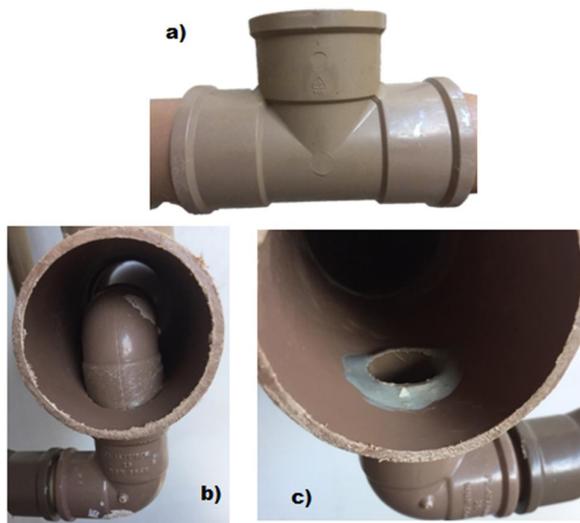


Figura 24 – Detalhe das partes em PVC do conjunto medidor de diferencial de pressão.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Na continuidade dos Pitots foram utilizadas curvas de 90° soldáveis em PVC de tamanho 19,05 milímetros e tubos de mesmo diâmetro e tamanho suficiente para que a extremidade esteja acima do nível d'água (Figura 25a). Ao final destes tubos foram fixados Caps e conectadas mangueiras pneumáticas de 5 milímetros (Figura 25b), permitindo a conexão hermética dos sensores.

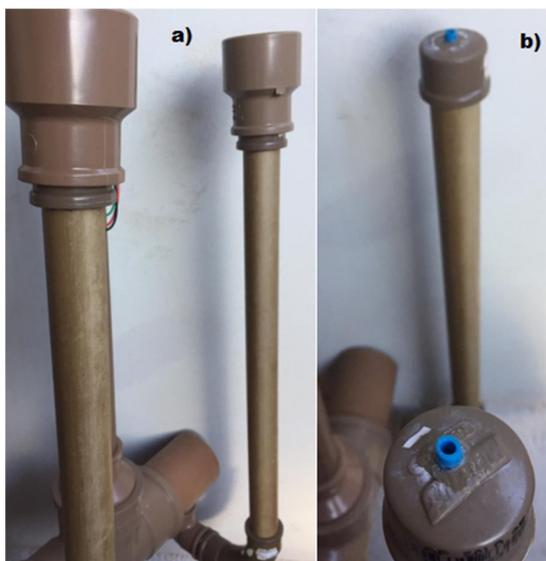


Figura 25 – Saída de ar para o sensor
Fonte: Autoria Própria (2020)

O tubo externo foi confeccionado em PVC de 1 polegada, permitindo abrigar os cabos de conexão dos sensores ao controlador e o manuseio do equipamento pelo usuário (Figura 26a). Na parte superior do tubo externo está o abrigo do controlador construído em acrílico, permitindo abrigar com segurança a maior parte dos hardwares e visualizar as medições no monitor LCD (Figura 26b).

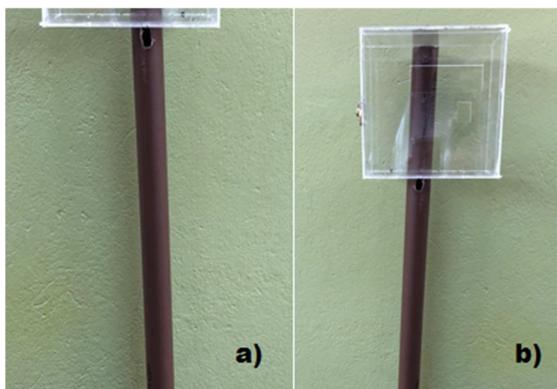


Figura 26 – Estrutura superior do medidor.
Fonte: Autoria Própria (2020)

5.1.3. Instalação dos componentes eletrônicos

Após a construção da estrutura foi realizada a instalação dos sensores na parte inferior da estrutura (Figura 27).

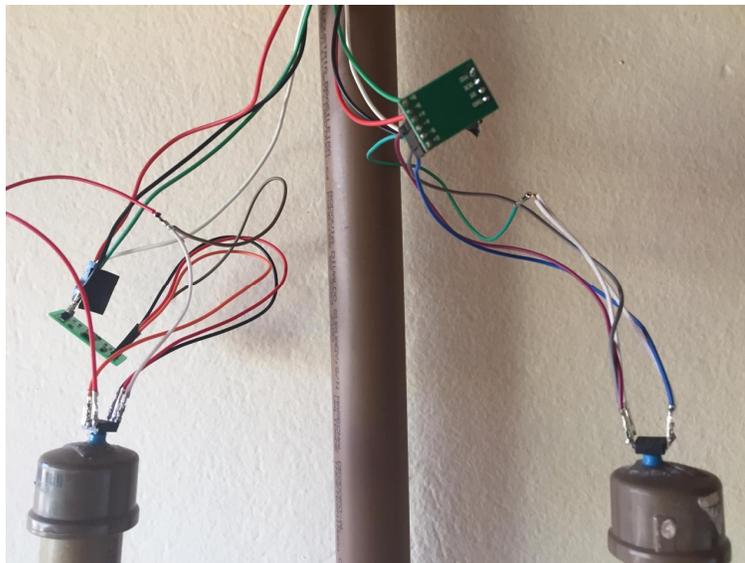


Figura 27– Sensores conectados na extremidade dos tubos Pitots.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Dentro do abrigo do controlador foram instalados o Arduino, o circuito eletrônico, os módulos e a bateria (Figura 28).

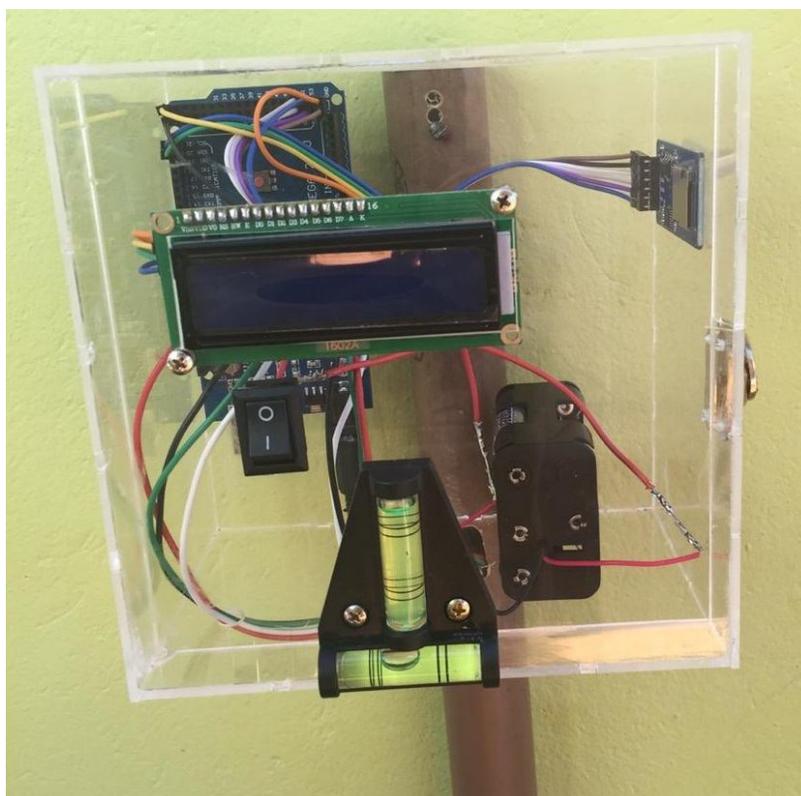


Figura 28 – Estrutura desenvolvida e pronta para medição.
Fonte: Autoria Própria (2020)

5.2. Calibração dos sensores

A calibração foi realizada por regressão, sendo a variável dependente a velocidade do escoamento mensurada por molinete hidrométrico convencional e a variável independente a diferença de tensão medida nos sensores de pressão do CF-Speed 20. O molinete hidrométrico utilizado foi da marca Global Water, modelo FP111 Flow Probe.

A coleta dos dados foi realizada no Córrego Ribeirão do Cocho, município de Itapaci - GO. Foram coletadas um total de 4 medições em locais com diferentes velocidades de escoamento, tanto pelo molinete hidrométrico como pelo CF-Speed 20 (Figura 29). As medições para a calibração foram realizadas em 29 de setembro de 2020.



Figura 29 – Pontos registrados da coleta de dados do sensor de pressão, do medidor CF-SPEED 20.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Em cada ponto de medição para calibração, primeiro media-se a velocidade média do escoamento pelo molinete hidrométrico. Para isso, submergiu-se o molinete até a meia profundidade e, após a velocidade no display do equipamento permanecesse constante, o valor era anotado (Figura 30).



Figura 30– Leitura realizada pelo molinete hidrométrico.
Fonte: Autoria Própria (2020)

E, em seguida, na mesma profundidade, coletava-se os dados de diferença de tensão pelos sensores de pressão durante um intervalo de aproximado de 10 segundos, em que os dados eram salvos no cartão Micro SD.



Figura 31 – Leitura do Delta realizada pelo CF-SPEED20.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Utilizando as 4 medidas de variáveis dependentes e independentes das medições realizadas no Córrego Ribeirão do Cocho, e testando diferentes modelos a partir do maior valor de coeficiente de determinação, o melhor ajuste para calibração foi pelo modelo logarítmico (Figura 32).

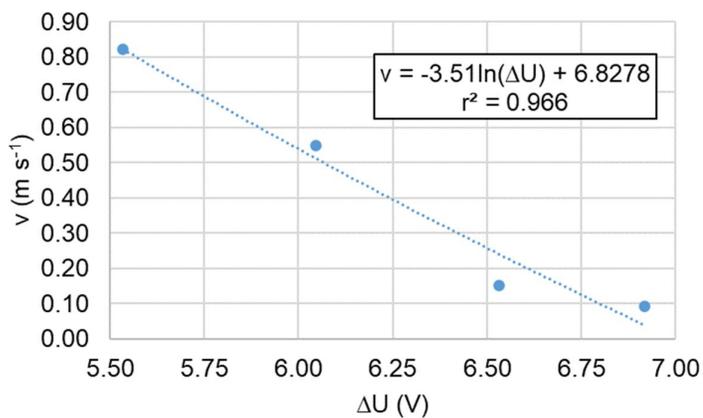


Figura 32 – Curva de calibração da diferença de tensão entre os sensores de pressão do CF-Speed 20 (DU) e a velocidade do escoamento (v).
Fonte: Autoria Própria (2020)

A equação de calibração foi $v = -3,51 * \ln(\Delta U) + 6,8278$, em que “ v ” é a velocidade do escoamento em $m\ s^{-1}$ e DU é a diferença de tensões medidas pelos sensores de pressão instalados nos tubos Pitots.

6. PROGRAMAÇÃO

O sistema foi programado com taxa de gravação de dados de 10 segundos, no qual o sistema mensura a tensão nos sensores de pressão, calcula a diferença de tensão, determinada a velocidade de escoamento pela equação de calibração e encontra a média. O resultado é exibido no display LCD e gravado no Micro SD (Figura 33).

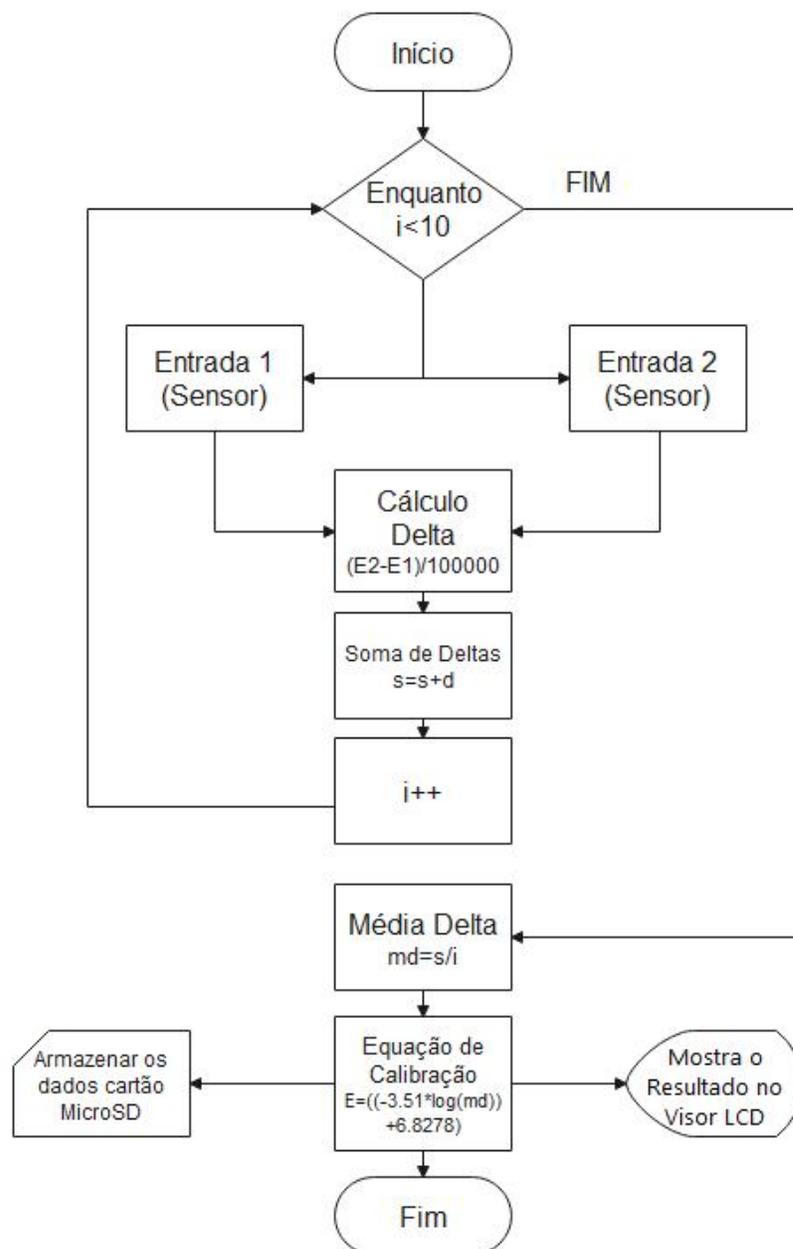


Figura 33 – Fluxograma da programação do Molinete CF-SPEED 20
Fonte: Autoria Própria (2020)

Ao ligar o Arduino Mega (Figura 3), a programação tem início entrando em um laço de repetição que coletará 10 dados durante 10 segundos (1 dado por segundo). Os dados coletados são os valores gerados pelos sensores de pressão. Após a coleta, é realizado o cálculo de determinação do diferencial de tensão entre os dois sensores, que irá gerar o valor de delta (Δ).

Após gerar o delta, o valor é enviado para outra variável que irá realizar a soma dos deltas (s), além disso, o contador (i) aumenta em cada leitura, até atingir 10. No valor desejado, o laço de repetição é concluído. Fora do laço de repetição é realizado o cálculo da média dos deltas (md). Com isto, será possível adicionar o valor gerado à fórmula de calibração. Feito o cálculo e gerada a velocidade de escoamento, os dados são salvos no MicroSD e exibido na tela do monitor para que o usuário acompanhe a medida. Este ciclo continua até o usuário desligar o equipamento.

7. OPERAÇÃO

7.1. Preparação

Para a utilização do CF SPEED 20 para medição da velocidade de escoamento em uma determinada seção de rio ou córrego, deve realizar os seguintes procedimentos:

a) Conectar o Arduino Mega e a bateria (Figura 34).

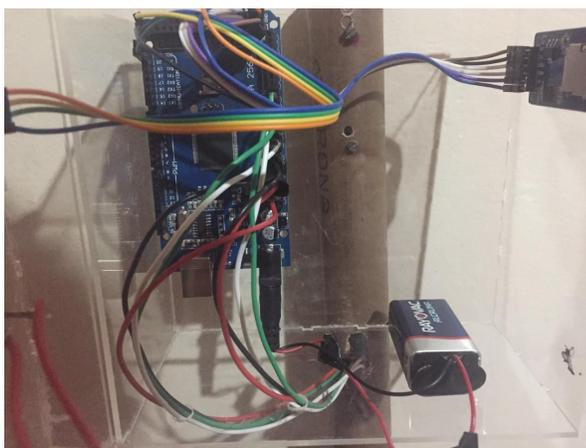


Figura 34 – Ligação da bateria com o Arduino Mega.
Fonte: Autoria Própria (2020)

b) Inserir o cartão Micro SD no módulo SD.

c) Ligar o CF-Speed 20 no botão de acionamento.

d) O medidor CF-Speed 20 agora está preparado para realizar a coleta de dados.

e) A recepção dos dados coletados pelos sensores é indicada no acender e apagar do Led no Arduino. (Figura 35)

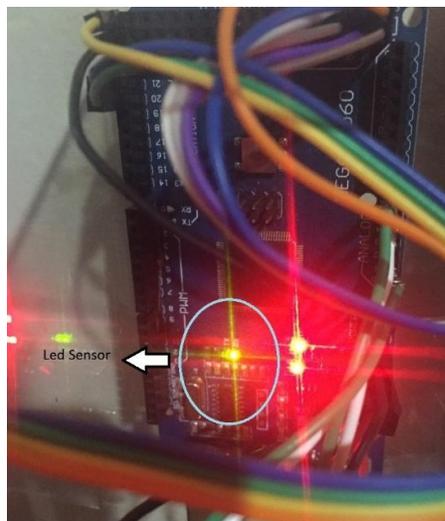


Figura 35 – Localização do Led no Arduino Mega.
Fonte: Autoria Própria (2020)

e) Para terminar e salvar o arquivo com os dados coletados, basta desligar o medidor no botão liga/desliga.

8. TESTE DE DESEMPENHO

8.1. Local

O teste de avaliação do desempenho do CF-Speed 20 foi realizado no dia 05 de outubro de 2020, em um trecho dos afluentes do Rio São Patricinho, próximo à Rodovia GO-459, 2 km do município de Itapaci – GO, entre as latitudes 14°94'37,48" e 14°94'51,06" Sul e longitudes 49°54'42,34" e 49°54'55,86" Oeste (Figura 36).

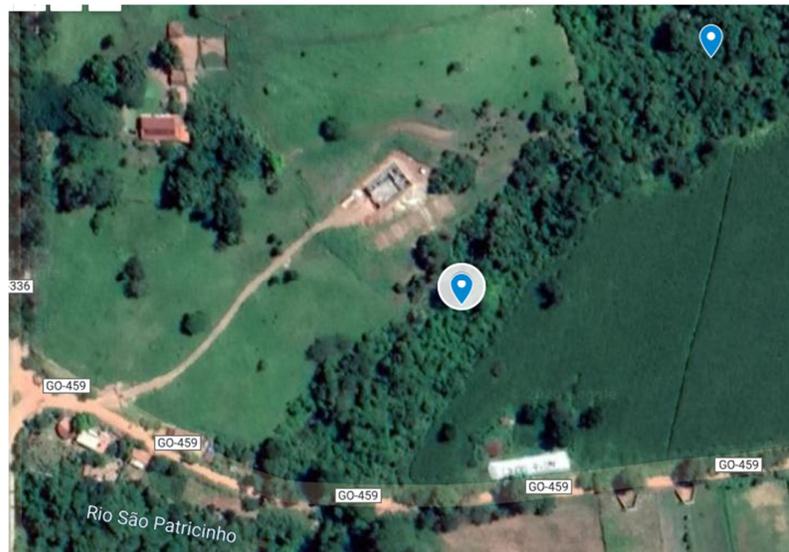


Figura 36– Localização do trecho do afluente do Rio São Patricinho, Município de Itapaci GO.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Os trechos utilizados no córrego possuem vegetação ciliar preservada, caracterizada por conter no local mata nativa do cerrado. A calha possui dimensões aproximadas de 4,5 a 5,1 m de largura com no máximo 0,70 m de profundidade (Figura 37).



Figura 37 – Visão de um dos pontos utilizados para realizar a medição com o CF-SPEED 20.
Fonte: Autoria Própria (2020)

8.2. Metodologia

No local foram realizadas 5 medições em locais distintos com o CF-Speed 20 e com o molinete hidrométrico. As medições foram realizadas em 08 de outubro de 2020.

Após a coleta de dados realizou-se uma análise de variância da regressão linear, onde as variáveis dependentes e independentes foram as medições da velocidade média do escoamento pelo molinete hidrométrico Global Water FP111 Flow Probe e pelo CF-Speed 20.

A análise do desempenho foi com referência no nível de significância e valor do coeficiente de determinação, em que quanto mais próximo de $r^2 = 1$, mais preciso é a medida de velocidade média do escoamento com a do molinete hidrométrico convencional.

9. DESEMPENHO

9.1. Desempenho físico

Na Figura 38 pode ser observado o medidor CF-SPEED 20 durante o teste de desempenho em um dos locais de medição, onde está coletando e armazenado os dados de velocidade do escoamento.



Figura 38 – CF-SPEED 20 em funcionamento no córrego.
Fonte: Autoria Própria (2020)

Observou-se que a estrutura desenvolvida para realizar as medições proporcionou boa robustez em fixar o conjunto medidor de diferencial de pressão durante a medida. Nenhum dos componentes eletrônicos foram impactados pela umidade, o que demonstrou que a escolha do design e materiais foram suficientes para a aplicação desejada.

9.2. Desempenho na medida

No quesito de precisão da medida, utilizando como referência um molinete hidrométrico convencional, o CF-Speed 20 também demonstrou ótimo desempenho (Figura 39).

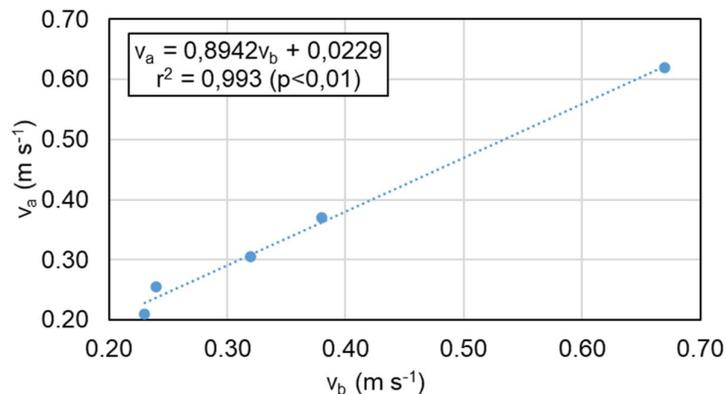


Figura 39 – Resultado da análise de regressão linear da velocidade média do escoamento medida com o molinete hidrométrico (v_a) em função da velocidade do escoamento medida pelo CF-Speed 20 (v_b).

Fonte: Autoria Própria (2020)

O resultado do ajuste linear das medições realizadas com o CF-Speed 20 em relação as medições com o molinete hidrométrico convencional, pode ser avaliado como quase perfeito ($r^2 \approx 1,0$).

9.3. Observações relevantes

Por possuir uma base inferior relativamente grande, para que fosse possível a fixação dos joelhos de PVC nos tubos Pitots, o seu uso está limitado a profundidades de no mínimo 12 cm de profundidade.

9.4. Custo

Um fator incluído na inovação proposta para o CF-Speed 20 é que seu custo de aquisição fosse significativamente inferior aos convencionais do mercado, visando sua maior acessibilidade. Na Tabela 3 está apresentado o custo detalhado e total do desenvolvimento do equipamento.

Tabela 3 – Valores dos equipamentos utilizados.

Equipamentos	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Arduino Mega	1 unidade	74,90	74,90
Módulo HX711	2 unidades	9,75	19,50
Sensor de Pressão	2 unidades	12,00	24,00
Display LCD 16X2 com Módulo I2C	1 unidade	23,50	23,50
Módulo Cartão Micro SD	1 unidade	8,20	8,20
Botão liga e desliga	1 unidade	1,37	1,37
Nível Bolha modelo T	1 unidade	21,90	21,90
Cabo flexível 20awg	4 metros	1,50	6,00
Suporte 6 pilhas AA com P4	1 unidade	12,99	12,99
Caixa Acrílica 15x15x8	1 unidade	40,00	40,00
Cano PVC de 1 polegada	1 metro	2,00	2,00
Tê PVC de 2 polegadas	1 unidade	21,90	21,90
Joelho 90º PVC Soldável	3 unidades	0,80	2,40
Curva 90º PVC Soldável	2 unidades	3,49	6,98
Cano PVC soldável 25mm	½ metro	2,00	1,00
Tampão PVC soldável 25mm	2 unidades	1,00	2,00
Total			R\$ 268,64

Fonte: Autoria Própria (2020)

Como pode ser observado o custo total para o desenvolvimento do CF-Speed 20 foi de R\$ 268,64.

O molinete hidrométrico é um dos equipamentos mais utilizados para medição da velocidade de vazão. Por este motivo, na Tabela 4 estão algumas cotações destes equipamentos comercializados no Brasil.

Tabela 4 – Cotação de Equipamentos Comercializados no Brasil

Empresa	Marca, Modelo e Especificações	Investimento	Percentual em relação ao CF-Speed 20
A	MC-01 para Molinetes e Micro Molinetes em m/s	R\$ 10.830,00	4.031%
B	Molinete hidrométrico c31 com hélice n.1, haste 2m e con pul - ott/hydrolab	R\$ 71.327,30	26.551%

Fonte: Autoria Própria (2020)

Como observado na Tabela 4, as cotações realizadas em duas empresas A e B, os investimentos em molinetes hidrométricos convencionais variaram de R\$

10.830,00 a R\$ 71.327,30, sendo de cerca de 4 a mais de 26 mil por cento superior ao custo para fabricação do CF-Speed 20. Essa diferença demonstra o potencial da tecnologia desenvolvida na redução dos investimentos em monitoramentos hidrológicos.

10. CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver o equipamento de medição de velocidade de escoamento em canais por diferencial de pressão (denominado CF-SPEED 20), com componentes de baixo em relação a outros equipamentos com funções semelhantes disponíveis no mercado.

A calibração dos sensores, construção da estrutura integrando os circuitos eletrônicos e o desenvolvimento da programação com a calibragem, demonstram confiabilidade na obtenção de dados da velocidade de escoamento. O CF-SPEED 20 apresentou ótimo desempenho de precisão em testes comparativos com o molinete hidrométrico convencional.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA (org.). **Lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 26 mar. 2015. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149-2015.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

ALMEIDA JUNIOR, A.J.C.D; HERNANDEZ, F.B.T.; FRANCO, R.A.M.; ZOCOLER, J.L. Medição de velocidade e vazão em cursos d'água: Molinete hidrométrico versus método do flutuador. **CONIRD**, [s. l.], 2010. Disponível em: http://www2.feis.unesp.br/irrigacao/pdf/conird2010_junior.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

CARDOSO, G. G.G.; SÁ, M. J. S.; SILVA, J. E. P.; CAMARGO, N. Plataforma Arduino na automação da irrigação por gotejamento no cultivo da cana-de-açúcar. **XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, [s. l.], 13 nov. 2015. Disponível em: <http://www.abid.org.br/cd-xxv-conird/PDF/002.pdf>. Acesso em: 7 maio 2020.

CHOW, V.T., 1959. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill. U.S. Federal Council for Science and Technology.

COLLISCHONN, W.; TASSI, Rutinéia. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre - RS: IPH UFRGS, Maio 2008. 151 p. v. 5.

EMBRAPA. Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica: Subsídio à Gestão Territorial Estudo de caso no Alto e Médio Mamanguape. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 2**, Campinas-SP, v. 2, n. 1, p. 35, 1 dez. 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/960720/1/0000010346BPDAnalisemorfometrica.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

FUNDAÇÃO CENTRO TÉCNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Medidores de Vazão para Pequenos Cursos d'água**. Rio de Janeiro: PRONI, 1990. 88p.

HOLANDA, A. B.; **Míni Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa**. [S. l.]: Positivo Editora, 2010.

IBIAPINA, A. V.; FERNANDES, D.; CARVALHO, D. C.; OLIVEIRA, E.; SILVA, M. C. A. M.; GUIMARÃES, V. S. **Evolução da hidrometria no Brasil**. In: O ESTADO das águas no Brasil. Brasília, DF: Aneel: ANA, 1999.

JORGE JUNIOR, J. A.; **Desenvolvimento de Sonda Multiparâmetro Dinâmica de Qualidade de Água (SONDA AQUA-X)**. Orientador: Dr. Luiz Sérgio Vanzela. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Brasil, [S. l.], 2019.

KOBIYAMA, M.; GRISON, F.; MOTA, A. A. . **Curso de capacitação em hidrologia e hidrometria para conservação de mananciais**. 3. ed. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/apostila_hidrometria.pdf. Acesso em: 29 set. 2020.

LIMA, Charles B.; VILLAÇA, Marco V. M. **AVR e Arduino: Técnicas de Projeto..** 2. ed. [S. l.: s. n.], 2012. ISBN 978-8591140015.

MACEDO, R. E. O.; NERY, R. N.; LANDAU, E. C. Utilização de microcontroladores Arduino para o envio de dados climáticos via rede sem fio através de radiofrequência. **EMBRAPA**, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/191249/1/ct-229.pdf>. Acesso em: 8 maio 2020.

MARTINELLI, L. A.; KRUSCHE, A. V. **Amostragem em rios**. In: Bicudo, C. E. M.; Bicudo D. C. Amostragem em limnologia. São Carlos: RIMA, 2004. cap.16, p.263-280.

MCROBERTS, M. **Arduíno Básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

MERÇON, F.; GUIMARÃES, P. I. C.; MAINIER, F. B. Corrosão: Um Exemplo Usual de Fenômeno Químico. **QUÍMICA NOVA NA ESCOLA**, [s. l.], ed. 19, Maio 2014. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc19/a04.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.

OLIVEIRA, A. M.; **SYSCIMATE – Sistema de Monitoramento Climático**. Orientador: Luiz Sergio Vanzela. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Brasil - Campus Fernandópolis, [S. l.], 2019. Disponível em: https://universidadebrasil.edu.br/portal/curso.php?id_curso=159. Acesso em: 11 maio 2020.

OLIVEIRA, C. L. V.; ZANETTI, H. A. P.; NABARRO, C. B. M.; GONÇALVES, J. A. V. **Aprenda Arduino: Uma Abordagem Prática**. [S. l.: s. n.], 2018. ISBN 978-85-52946-03-8.

OLIVEIRA, L.; **Papel do monitoramento e da previsão de vazões no gerenciamento de bacias hidrográficas**. 2003. Tese (PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/es/tesis-de-maestria/466-2003/6237-luiza-cristina-krau-de-oliveira>. Acesso em: 16 abr. 2020.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. Medidas de Vazão. In: PINTO, N. L. S. et al - **Hidrologia Básica**. 7a.ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher, 2000. 183-204 p.

PEREIRA, L. M. M.; OLIVEIRA, G. S.; BEZERRA, P. H. R.; SANTOS, F. A.; ARAÚJO, F. M. A.; Robô de competição categoria seguidor de linha utilizando algoritmo pid e plataforma Arduino. **Mostra Nacional de Robótica**, [s. l.], 2018. Disponível em: <http://sistemaolimpo.org/midias/uploads/230c61ca8833329f9ffc867a89566dcd.pdf>. Acesso em: 8 maio 2020.

PORTAL DA TRANSPARÊNCIA (Brasil). Governo Federal. **Lista de Propostas de Itens do Pregão**. [S. l.], 2013. Disponível em: http://compras.dados.gov.br/pregoes/v1/proposta_item_pregao.html?item=12312432&co_pregao=433231. Acesso em: 20 out. 2020.

ROCKWOOD, D. M., 1958 **Columbia basin streamflow routing by computer**, **Journal of Waterways and Harbour Division**, ASCE, 84(1), Paper 1874.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. v. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. **Hidrometria aplicada**. [S. l.: s. n.], 2001. 372 p.

SHIKLOMANOV, I. A. **World Water Resources: A New Appraisal and Assessment for the 21st Century**. Paris: UNESCO, 1998. p. 6.

SILVA, J. L. S.; CAVALCANTE, M. M.; CAMILO, R. S.; GALINDO, A. L. Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35. **SIBGRAPI**, [s. l.], 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305771112_Plataforma_Arduino_integrado_ao_PLX-DAQ_Analise_e_aprimoramento_de_sensores_com_ênfase_no_LM35. Acesso em: 4 maio 2020.

SILVA, J. L. S.; CAVALCANTE, M. M.; VAZ, F. A.; DANTAS, J. R.; VIANA, E. C.; RecArd: Robô baseado na plataforma Arduino como facilitador no processo de ensino-aprendizagem multidisciplinar. **CINTED- Novas Tecnologias na Educação**, [s. l.], 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Joao_Lucas_De_Souza_Silva/publication/305771245_RecArd_Robo_baseado_na_plataforma_Arduino_como_facilitador_no_processo_de_ensino-aprendizagem_multidisciplinar/links/57a0bae308aeef35741b66f8/RecArd-Robo-baseado-na-plataforma-Arduino-como-facilitador-no-processo-de-ensino-aprendizagem-multidisciplinar.pdf. Acesso em: 8 maio 2020.

SPADOTTO, C. A. **Ocupação agrícola: a importância da gestão territorial**. Agroanalysis, Rio de Janeiro, v. 32, n. 9, p. 31. set. 2012.

STUDART, T. M. C. **Hidrologia**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: https://aedmoodle.ufpa.br/pluginfile.php/320841/mod_folder/content/0/Livro%20Hidrogeologia.pdf?forcedownload=1. Acesso em: 20 abr. 2020.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993. v. 2.

VANZELA, L. S. **Qualidade de água para a irrigação na microbacia do córrego Três Barras no município de Marinópolis**, SP. 2004. 91f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.