

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE VAZÃO DE BAIXO CUSTO COM MONITORAMENTO EM TEMPO REAL PARA MEDIDAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL

Pedro Coelho Tagliaferro¹; Marina Batalini de Macedo²

Abstract: The study aimed to develop a low-cost device for monitoring flow in sustainable urban drainage systems, using Narrow-Band IoT (NB-IoT) technology. They are a Nature-Based Solutions (Nbs) technique applied to the sustainable management of rainwater, and is an alternative to mitigate problems of surface runoff and water pollution in urban areas. The proposal integrates a tilt-type flow sensor with a Hall effect sensor to monitor water flow. The collected data is transmitted via NB-IoT, a communication technology that allows the transfer of information in real time, with low power and long range, ideal for urban contexts.

Resumo: O estudo visou desenvolver um dispositivo de baixo custo para o monitoramento da vazão em sistemas de drenagem urbana sustentável, utilizando a tecnologia Narrow-Band IoT (NB-IoT). A drenagem sustentável é uma técnica de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) aplicada ao manejo sustentável das águas pluviais, sendo uma alternativa para mitigar problemas de escoamento superficial e poluição hídrica em áreas urbanas. A proposta integra um sensor de vazão do tipo basculante com um sensor de efeito Hall para monitorar a vazão de água. Os dados coletados são transmitidos via NB-IoT, tecnologia de comunicação que permite a transferência de informações em tempo real, com baixa potência e longo alcance, ideal para contextos urbanos.

Palavras-Chave – Basculada; NB-IoT; RTM

INTRODUÇÃO

Segundo Mouha (2021), a internet das coisas (Internet of Things ou IoT) é um termo para tecnologias que prometem conectividade entre equipamentos diversos via internet, além da capacidade de análise de dados para uma série de aplicações. Neste contexto, o Narrow-Band Internet of Things (NB-IoT) se refere à um padrão de conectividade para equipamentos IoT. Caracterizado por usar tecnologia de rede licenciada de área ampla e baixo consumo de energia (Low-Power Wide-Area Networks ou LPWAN), sendo um sistema celular baseado em Long-Term Evolution (LTE). Este fator facilita a implementação, já que a rede LTE é amplamente difundida no país.

De acordo com Mwakwata et al. (2019) dispositivos que utilizam esta tecnologia possuem baixo custo energético, podendo suportar grandes períodos de funcionamento com baixa intervenção humana, dependendo de baterias. Isso faz com que tais dispositivos sejam ideais para ambientes de difícil acesso ou sistemas que preveem pouca interação com operadores. Tais dispositivos fazem isso através de modos de economia de energia (Power Saving Mode ou PSM) e técnicas de recepção descontínua de pacotes que fazem o dispositivo checar periodicamente a presença de mensagens. Dados retirados da Teleco (2024), mostram que o NB-IoT é a tecnologia que utiliza LPWAN com

1) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, d2021007929@unifei.edu.br
2) Afiliação: Universidade Federal de Itajubá, marinamacedo@unifei.edu.br

maior cobertura no Brasil, cobrindo 5494 municípios, que corresponde a 99,8% da população, com os serviços sendo fornecidos pela TIM, VIVO e Claro.

O avanço das tecnologias IoT tem permitido o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento em larga escala e baixo custo, otimizando tanto o consumo de recursos quanto a autonomia operacional. Este estudo focou na criação de um equipamento para medir e transmitir dados de vazão em sistemas de drenagem urbana sustentável, utilizando o NB-IoT.

A drenagem sustentável permite o manejo hídrico urbano de forma sustentável e positiva, entretanto, tais soluções são usualmente passivas. Técnicas de manejo ativo dessas soluções podem beneficiar tais sistemas. De forma específica, podemos citar as células de biorretenção, que consistem em áreas de vegetação projetadas para manejar, de forma natural, o volume excedente de chuva. Tudo isso através de mecanismos inerentes de plantas e do solo, além da interação entre eles e outros agentes externos. (DUNNETT; CLAYDEN, 2007). No entanto, o manejo ativo dessas estruturas requer o monitoramento de suas variáveis hidrológicas, sendo a principal a vazão de entrada e saída do sistema. Por serem vazões baixas e em condições de condutos livres, as soluções de monitoramento tradicional são desafiadoras. Dessa forma, esse estudo integrou ao sistema de NB-IoT um medidor de vazão construído com base nos princípios do pluviógrafo basculante, feito em impressora 3D.

Fisicamente, Schwamback et al. (2022) explica que, o pluviógrafo basculante consiste de duas cavidades suportadas por um eixo de livre rotação, tais cavidades possuem simetria reflexiva e repousam sobre o eixo de forma que uma das cavidades aponta para cima, uma vez que o fluxo de água enche uma das cavidades até a capacidade máxima (volume nominal), o centro de gravidade se move para fora do eixo de rotação, ocorrendo a inversão (giro) e, consequentemente, o derramamento a água, permitindo que a cavidade oposta se encha até o volume nominal e repita o processo. Em adição ao arranjo explicado acima, posiciona-se um sensor, geralmente magnético, e um registrador de dados (Data Logger) para monitoramento constante, auxiliando na identificação do inicio, fim e pico do fluxo de água. O sensor acusa a inversão do sistema, com os dados de tempo e quantidade de inversões sendo utilizadas posteriormente para o cálculo da chuva. O pluviógrafo basculante pode ser adaptado para, utilizando o mesmo mecanismo, realizar medição de vazão.

Ao integrar as funcionalidades do sensor de vazão basculante com uma plataforma de transmissão de dados via NB-IoT, espera-se obter um monitoramento eficiente e contínuo dos parâmetros hidrológicos, promovendo a aplicabilidade deste dispositivo em diferentes contextos ambientais e contribuindo para a sustentabilidade hídrica em áreas urbanas. Outro ponto importante é a autonomia do sistema, além de seu custo reduzido.

METODOLOGIA

Medidor de vazão basculante

A báscula teve suas dimensões calculadas de acordo com as requisições de volume do sistema de biorretenção, com a estrutura do medidor de vazão sendo desenvolvida ao redor da báscula.

Para a detecção de pulso foi utilizado um sensor de efeito hall fixado na estrutura em conjunto com um imã de neodímio acoplado à báscula. Este arranjo permite que o microcontrolador receba um sinal de pulso a cada inversão da báscula. Assim, temos a informação temporal da inversão, o que nos permite calcular a vazão de acordo com o volume da báscula.

O medidor de vazão basculante teve seus componentes impressos em uma impressora 3D Creality K1. Foi utilizado o filamento de acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Com exceção do par de básculas, todos os componentes do medidor de vazão foram projetados para serem encaixados e

montados, evitando necessidade fixação permanente de elementos, facilitando o transporte, a montagem e uma eventual modularidade ou manutenção de componentes.

A Tabela 1 mostra os componentes projetados para o medidor de vazão basculante. Além das peças fabricadas, existem elementos comerciais utilizados, tais elementos estão listados na Tabela 2.

Tabela 1: Peças fabricadas para o medidor de vazão basculante

Componente	Função	Quantidade
Haste lateral	Suporte para componentes	2
Báscula	Coleta de água	2
Suporte superior esquerdo	Suporte e controle de vazão	1
Suporte superior direito	Suporte e controle de vazão	1
Suporte inferior esquerdo	Suporte para hastes	1
Suporte inferior direito	Suporte para hastes	1
Espaçadores do eixo	Espaçamento entre haste / báscula	4
Presilha lateral	Fixar suportes direito e esquerdo	4
Limitador de volume	Limitar o volume nominal	2

Tabela 2: Peças comerciais para o medidor de vazão basculante

Componente	Tamanho / Tipo	Quantidade
Rolamento	608	2
Barra roscada	3/8"x 1m	1
Arruela lisa	3/8"	16
Porca da barra	3/8"	20
Sensor efeito hall	44E	1
imã de neodímio	4mm x 1,5mm	1
Parafuso rosca parcial	M8 x 150mm	1
Porca do eixo	M8	1
Arruela lisa do eixo	m8	16

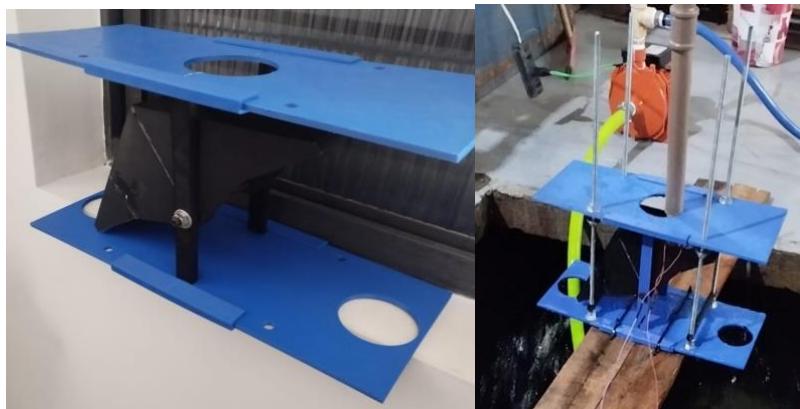
A Figura 1 apresenta o medidor de vazão basculante parcialmente montado e em fase de teste, respectivamente.

Os dados do sensor não apresentam a informação real de vazão, para obter esse valor é necessário fazer um processamento do sinal emitido pelo sensor. Para tal, existe um timer de 30 segundos, neste intervalo, são contados os números de pulsos do sensor de efeito Hall, que é correspondente ao número de inversões que aconteceram. A partir de então, se multiplica o número de inversões pelo volume da báscula e então, divide-se o resultado pelo tempo decorrido. Este valor é então, convertido para a unidade de vazão desejada e exibido para o usuário. O cálculo realizado é apresentado na Equação 2.

$$Q = \frac{E \cdot V}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde Q é a vazão, E é a quantidade de eventos, V é o volume da bascula e Δt é o intervalo de tempo definido.

Figura 1: Medidor de vazão basculante parcialmente montado e em fase de teste

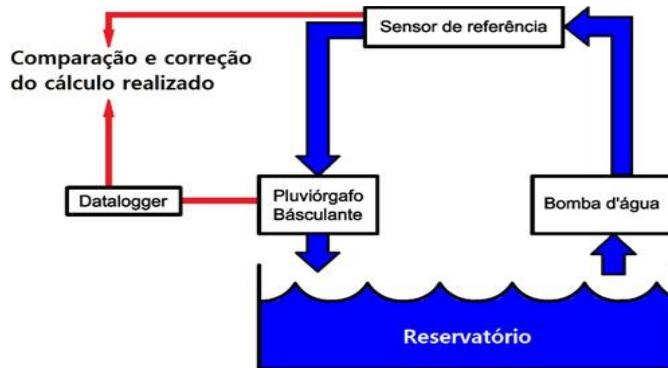


Para fins de teste do medidor de vazão, foi utilizado um Arduino UNO R3 para o processamento do sinal e Data Logger.

Calibração

O processo de teste e calibração, realizado no Laboratório de Etiquetagem de Bombas (LEB) da Universidade Federal de Itajubá, consistiu em uma bomba retirando água de um reservatório e despejando-a no medidor de vazão basculante, em um ponto antes da saída de água foi posicionado um medidor de fluxo previamente calibrado para base de comparação. A Figura 2 apresenta um esquema simplificado do arranjo para teste e calibração.

Figura 2: Representação do arranjo para coleta de dados



Com a comparação dos dados obtidos pelos dois equipamentos, foi possível realizar os ajustes necessários no cálculo embarcado feito pelo sistema. Foram utilizados 25 pontos de medição diferentes com pelo menos 3 amostras por ponto.

Placa e hardware eletrônico

A placa foi projetada por Lucas Noce e tem como objetivo integrar os sensores uteis para o sistema de drenagem sustentável e transmiti-los via NB-IOT com a utilização de baterias, contando com sensores de umidade, pressão e de nível ultrassônico. A Figura 3 apresenta a placa desenvolvida. Os principais subsistemas serão explicados nas seções abaixo.

Figura 3: Layout da placa



Círculo de alimentação

A placa pode ser alimentada de duas maneiras: ou via USB ou via baterias. Devido às diferenças nas tensões entre os dois meios de alimentação, foram implementados dois conversores de tensão. O primeiro converte a tensão de 5,0V (do USB) para 3,3V, enquanto o segundo ajusta a tensão de 0,9V a 1,8V (das baterias) para 3,3V, garantindo a operação adequada da placa.

Além dos conversores, o circuito de alimentação inclui dispositivos de proteção, como filtros contra descargas eletromagnéticas e circuitos para prevenção de polaridade reversa. Há também um seletor de modo de alimentação. Um resistor shunt é utilizado para medir o consumo de corrente em diferentes condições de funcionamento.

Circuito do microcontrolador

O microcontrolador é o núcleo de controle da placa, responsável por executar as instruções e gerenciar as operações. Para garantir seu funcionamento estável, a placa possui uma série de capacitores de desacoplamento, que ajudam a filtrar ruídos elétricos que podem interferir nas operações.

Outros circuitos importantes relacionados ao microcontrolador incluem:

- Circuito do Oscilador (clock): Este circuito define a frequência de operação do microcontrolador.
 - Circuito de Reset: Permite reiniciar o microcontrolador em caso de falhas.
 - Circuito de Inicialização: Garante que o microcontrolador comece a operar corretamente ao ser energizado.
 - Resistores de Pull-up para o protocolo I2C: Esses resistores asseguram que as linhas de dados estejam em um nível lógico adequado durante a comunicação.

Circuito de periféricos

Os periféricos da placa incluem os subcircuitos necessários para a implementação do NB-IoT, bem como sensores e um medidor de carga da bateria. O módulo NB-IoT possui os seguintes componentes:

- Capacitores de Desacoplamento: Utilizados para atender à demanda de corrente durante as transmissões, evitando quedas de tensão.
 - Circuito de Status da Rede: Utiliza um LED para apresentar ao usuário a situação da rede.
 - Antena: Elemento para a transmissão e recepção de sinais NB-IoT.
 - Circuito de Controle do Módulo: Este subcircuito permite que o microcontrolador ligue e desligue o módulo.

- Circuito de Deslocamento de Nível Lógico: Ajusta os níveis de tensão entre o microcontrolador e o módulo NB-IoT, uma vez que o microcontrolador trabalha em 3,3V e o módulo trabalha em 1,8V.
- Circuito para Cartão SIM: Permite a conexão da placa à rede celular por meio de um chip SIM.

Abaixo são apresentados os principais componentes do sistema.

STM32L476RGT6

STM32 é uma família de microcontroladores 32-bits da STMicroelectronics baseado em processadores Arm Cortex®-M. Dentre todos da família, o STM32L476RGT6 é considerado um dispositivo ultra-low-power, sendo mais apropriado para a aplicação proposta.

Este microcontrolador possui 48 pinos de entrada e saída (GPIO), tensão de alimentação de 3.3V, 1MB de memória flash programável, 128kb de memória SRAM e diversas interfaces de comunicação, incluindo USB, I2C e USART.

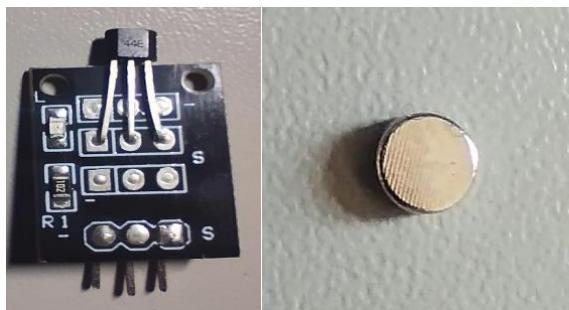
SIM7020E

O SIM7020E, fabricado pela SIMCom, é um módulo LPWA que suporta comunicação sem fio NB-IoT. Ele é compatível com uma série de interfaces e bandas, incluindo as que estão disponíveis no Brasil, além de possuir PSM e modos de recepção descontinua de pacotes (chamadas DRX e eDRX). Apesar dos modos de operação citados diminuírem o consumo de energia, eles aumentam o atraso de comunicação, tornando ideal para utilização com baterias e mensagens esporádicas.

Sensor hall

O sensor de efeito hall escolhido foi o 44E (Figura 4a) por conta de sua característica digital, ou seja, ele responde com nível lógico alto para ausência de campo magnético e nível lógico baixo para a presença de campo magnético. Isso facilita a comunicação com o microcontrolador, que pode ser utilizado com maior praticidade quando comparado com sinais analógicos, comumente visto em sensores dessa natureza. Em conjunto, também foi utilizado um imã de neodímio (Figura 4b) que posteriormente seria acoplado ao corpo da balança.

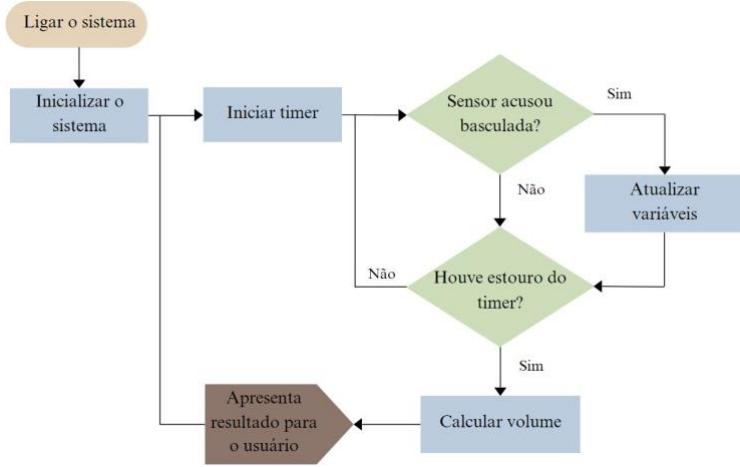
Figura 4: a) Sensor de efeito hall utilizado; b) imã de neodímio



Software

O software desenvolvido teve como objetivo a leitura do sensor basculante. A Figura 5 apresenta um fluxograma do loop empregado. Tal fluxograma se refere à rotina programada no Arduino UNO para aquisição de volume. A implementação desse dado ao NB-IoT seria feito com a placa projetada, utilizando outra rotina.

Figura 5: Fluxograma do programa

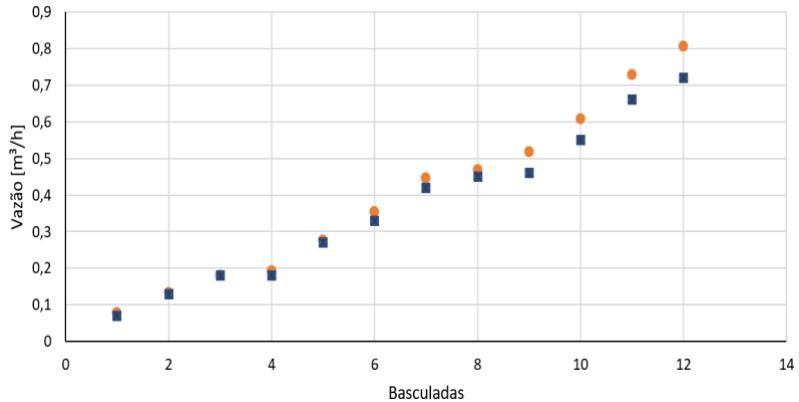


RESULTADOS

Vazão

Após o primeiro teste, foi feito um ajuste da função programada no Arduino, de forma a se obter melhor ajuste dos pontos de vazão observada e medida. A Figura 6 apresenta os resultados pós primeira e segunda calibração. É possível notar que para maiores vazões, a diferença entre o sensor de referência e o medidor de vazão basculante aumenta. Até este ponto foram implementadas apenas funções lineares para chegar no valor de vazão.

Figura 6: Vazão x Basculadas



Com os dados de basculadas e vazão de referência dos três testes, foi possível fazer uma análise de curvas para a implementação no medidor de vazão basculante com aproximações diferentes (potência e polinomial respectivamente), com seus resultados apresentados nas Figuras 7 e 8.

A variação média é de $0,0145 \text{ m}^3/\text{h}$ no caso da aproximação por potência. Já variação média é de $0,0129 \text{ m}^3/\text{h}$ na aproximação polinomial. Para ter uma validação melhor da regressão mais adequada, foi calculado o intervalo de confiança com as funções aproximadas e, posteriormente, o valor do sensor de referência foi comparado com o intervalo. Se observou que, dos 25 pontos coletados, 12 ficam dentro do intervalo de confiança da aproximação por potência, enquanto 14 ficam dentro do intervalo de confiança da aproximação polinomial.

Figura 7: Regressão potencial

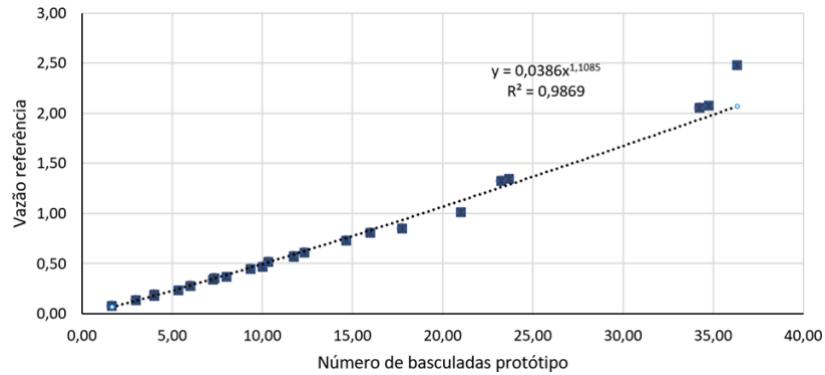
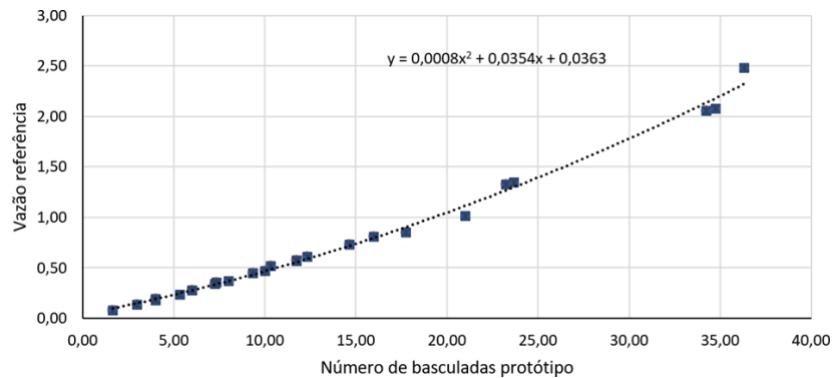
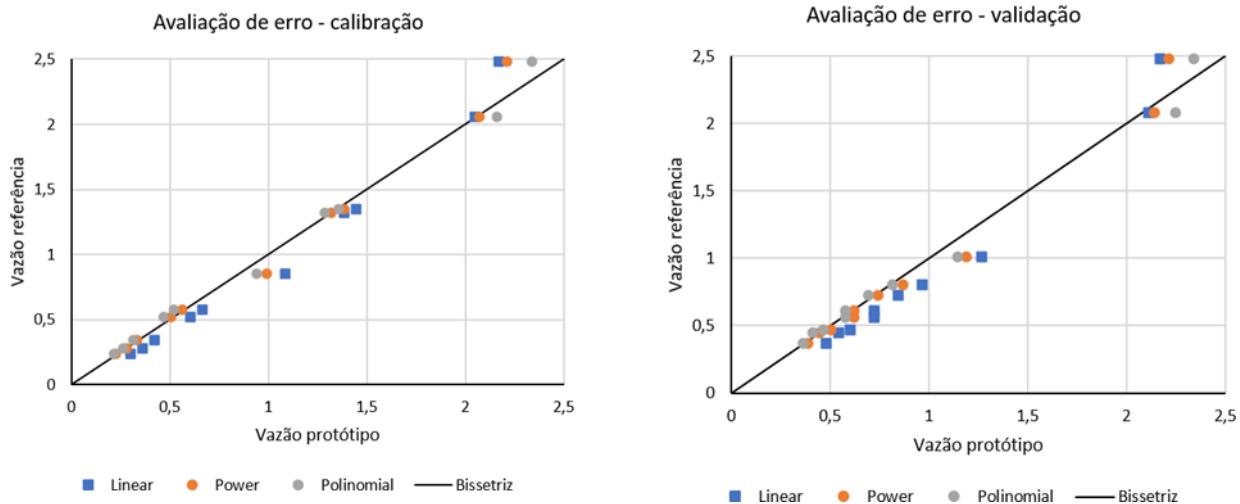


Figura 8: Regressão polinomial



A comparação de pontos aleatórios também mostrou resultados pertinentes. A Figura 9 mostra a comparação de diferentes aproximações. Ambas as análises foram feitas com pontos aleatórios e diferentes para calibração e validação.

Figura 9: Comparação das regressões em calibração e validação



Custo

Em relação ao custo, foram calculados os volumes das peças impressas e consultado o preço do filamento utilizado. Para peças comerciais, utilizou-se o valor descrito na hora da compra, desconsiderando o frete. A Tabela 3 apresenta os valores finais obtidos.

Tabela 3: Preço dos componentes

Componente	Preço (R\$)
Báscula e estrutura impressa	27,65
Ferragens	70,50
Sensor e imã	4,90
Total	103,05

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a viabilidade de um medidor de vazão basculante de baixo custo para monitoramento de vazão em sistemas livres e vazões baixas, simulando previamente as condições operacionais idealizadas para sistemas de drenagem sustentável.

Os dados obtidos analisando a contagem de basculadas por unidade de tempo - que para o presente trabalho totalizou 25 pontos de vazão, onde em cada ponto era realizadas três medidas, mostraram que houve uma aproximação da vazão de um sistema de até $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, considerando a aproximação polinomial, que apresentou melhor resultado em detrimento da regressão linear e potencial.

Foi observado que uma das fontes de erro da medição é a característica discreta bem pronunciada do medidor de vazão tipo basculante. Em pontos de baixas vazões, o erro chegou a 26%, valor não desprezível, que é equivalente a uma vazão de $0,020 \text{ m}^3/\text{h}$. Tal comportamento é esperado, pois em baixas vazões o desvio se torna cada vez mais pronunciado em relação ao total medido. Isso indica que a resolução em baixas vazões pode ser um problema, a depender do rigor e das características da aplicação.

Além disso, nos estudos preliminares da aplicação de um medidor de vazão basculante, notou-se que existe o efeito cinético em altas vazões (limite superior testado), ou seja, agregam-se outros fatores como inércia e momento, afetando as medições. No extremo oposto, a escala do sensor torna-se um impedimento na acurácia dos resultados devido baixa resolução.

Outro aspecto do projeto é que o protótipo faturou-se com valor inferior ao mercado. O preço desse tipo de medidor de vazão varia de três a cinco vezes o valor do protótipo.

Quanto a avaliação da conclusão da placa responsável pela comunicação via NB-IoT entre o medidor de vazão e a internet, considera-se satisfatória a etapa de montagem e validação física, uma vez que, todos os componentes comerciais, de acordo com a disponibilidade, foram comprados e soldados nela. Portanto, a placa está em condições de receber a programação necessária. Vale ressaltar que o seu design é fruto da primeira parte do trabalho, executado por Lucas Noce.

Sendo assim, a integração do medidor de vazão com a placa através da linguagem de programação escolhida e a investigação de sensores com diferentes escalas para resolução dos problemas apresentados em altas e baixas vazões, ficam como sugestões para próximos projetos de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

À fundação de amparo à pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo respaldo financeiro e viabilização do projeto, por meio de bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- DUNNETT, N.; CLAYDEN, A. Rain Gardens: managing water sustainably in the garden and designed landscape. 1. ed. Oregon, Portland, 2007.
- MOUHA, R. Internet of Things (IoT). Journal of Data Analysis and Information Processing. [S. l.: s. n.] v. 9, p. 77-101, 2021. doi: 10.4236/jdaip.2021.92006. Acesso em 18 set. 2024
- MWAKWATA, Collins Burton; MALIK, Hassan; ALAM, Muhammad Mahtab; MOULLEC, Yannick Le; PARAND, Sven; MUMTAZ Shahid. Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. Sensors, Tallin, Estonia, v. 19, n. 11: 2613. <https://doi.org/10.3390/s19112613>. Acesso em 23 out. 2024
- NOCE, Lucas A. IC-level-sensor.[S. l.], 6 ago. 2023. Disponível em: <https://github.com/lucasnoce/IC-LevelSensor>. Acesso em 10 abr. 2024
- NOCE, Lucas A. IC-level-sensor_v2.[S. l.], 1 dez. 2023. Disponível em: https://github.com/lucasnoce/IC-LevelSensor_v2. Acesso em 10 abr. 2024
- SCHWAMBACK, Dimaghi; ANACHE, Jamil A. A.; WENDLAND, Edson C. Calibration and error investigation of large tipping bucket flow meters. CATENA, Holanda. v. 209, Part 2, Fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105834>. Acesso em: 23 set. 2024.