



# MEDIÇÃO DA VAZÃO UTILIZANDO SOFTSENSOR APLICADO A UMA REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

**Robson Pacífico Guimarães Lima<sup>1</sup>, Juan Moises Mauricio Villanueva<sup>2</sup>, Heber  
Pimentel Gomes<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Coordenação de Automação Industrial, Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia. PE  
60, km14 - Ipojuca, Pernambuco, Brasil

<sup>2,3</sup>Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento,  
Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitaria, João Pessoa, Paraíba, Brasil  
<sup>1</sup>[robsonpacifico@ipojuca.ifpe.edu.br](mailto:robsonpacifico@ipojuca.ifpe.edu.br) <sup>2</sup>[jmauricio@cear.ufpb.br](mailto:jmauricio@cear.ufpb.br) <sup>3</sup>[heberp@uol.com.br](mailto:heberp@uol.com.br)

## RESUMO

Um eficiente sistema de abastecimento de água é fundamental para o acesso a um recurso tão essencial à vida. De maneira geral, esse tipo de sistema é composto por diversos elementos físicos (medidores, válvulas, bombas etc.) e alguns desses elementos que compõem esse cenário possuem custos elevados e/ou instalação complexa. A utilização de uma técnica de medição indireta de uma determinada grandeza hidráulica a partir de uma já conhecida pode ser utilizada como uma alternativa a fim de redução de custos com equipamentos que iriam promover aquela mensuração. Este artigo tem como objetivo o desenvolvimento de um instrumento virtual (*softsensor*), com a utilização de técnicas de redes neurais artificiais, capaz de estimar a vazão em uma planta que emula um sistema de abastecimento de água. A planta, ou rede de tubulações hidráulicas, utilizada para a validação do *softsensor*, está instalada no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (LENHS/UFPB). Testes de laboratório foram realizados promovendo a comparação entre os valores mensurados por meio do *softsensor* versus valores mensurados através de um sensor eletromagnético real de vazão e o maior valor referente ao erro máximo obtido foi de 1,5/s em um dos testes realizados e com Erro Percentual Absoluto Médio inferior a 1%.

## Palavras-Chave

*Softsensor*, Sistemas de Abastecimento de Água, Redes Neurais Artificiais.

## 1. INTRODUÇÃO

Para o processo de automação de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA) faz-se necessária a aquisição de equipamentos (sensores, bombas, controladores, tubulações

## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

etc.), montagem (instalações de tubulações e acessórios) e, ainda, instalações elétricas (proteção de dispositivos, cabeamento etc.) demandando custos materiais e de mão-de-obra especializada. Muitas vezes a aquisição de determinados instrumentos de medição de grandezas fundamentais a um SAA pode elevar ainda mais os custos já citados. Promover técnicas que auxiliem na redução da aquisição de instrumentos de custos elevados, sem comprometer a eficiência referente à mensuração correta das grandezas em um sistema automatizado é de grande relevância. Assim, diferentes tecnologias podem ser utilizadas em medição de grandezas de interesse em SAA. A vazão, por exemplo, é a terceira grandeza mais mensurada nos processos industriais (após pressão e nível de água) e as aplicações são vastas, desde aplicações como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências até medição de gases industriais e combustíveis. Uma das maneiras em se mensurar a vazão em SAA é por intermédio de tecnologias que utilizam princípios eletromagnéticos. Com relação às tecnologias que empregam esses princípios, os equipamentos associados possuem maiores custos de aquisição e instalação, dependendo do diâmetro da instalação e, conseqüentemente, do volume a ser mensurado [1] [2]. Em relação aos instrumentos que utilizam a tecnologia de sinais ultrassônicos não invasivos há, também, a problemática do custo elevado de aquisição desses instrumentos.

Neste trabalho, é proposta a concepção de um instrumento virtual, denominado de *softsensor*, capaz de mensurar (de maneira indireta) a vazão a partir de vários parâmetros de entrada comumente utilizadas em sistemas de abastecimento de água. A bancada experimental utilizada emula um sistema típico de distribuição de água. Assim, objetivou-se com a implementação do *softsensor*, avaliar o desempenho do instrumento virtual com a ação do controle de pressão na rede de abastecimento. De maneira contextual, alguns trabalhos referentes à aplicação de mensuração indireta de grandezas em SAA foram desenvolvidos, como por exemplo, [3] que utilizaram RNAs (Rede Neurais Artificiais) para promover o controle de coagulação em estações de tratamento de água potável. Foi utilizado um sensor virtual constituído por um sistema híbrido incluindo um mapa da região para validação dos dados e reconstrução de dados ausentes. O modelo utilizado foi o *perceptron* de múltiplas camadas (MPL), que serviu para modelar o processo de coagulação. O sistema foi capaz de considerar várias fontes de incerteza, como dados de entrada atípicos, erros de medição e conteúdo de informação limitado do conjunto de treinamento. Em [4], foi proposto um modelo NARX (*Nonlinear Auto-Regressive with Exogenous Inputs*) de RNA para previsão e controle em tempo real em uma aplicação de um SAA. O modelo desenvolvido estimou a demanda de consumo variável no tempo de forma equivalente, explorando os dados operacionais de pressão e vazão como entradas em tempo real e históricos e estabeleceu-se uma relação funcional entre as principais variáveis da rede a partir da pressão. Os resultados demonstraram que o modelo foi considerado aplicável no que concerne ao rastreamento e previsão de falhas na rede. Embora os objetivos da pesquisa foram alcançados segundo os autores, eles não implementaram a técnica com outras variáveis

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

associadas a um SAA e não promoveram um estudo comparativo entre algumas RNAs para verificar a eficiência dentre elas para o propósito do estudo.

Em [5], houve a proposta de uma metodologia para detectar dados falsos e substituir dados ausentes ou falsos (reconstrução de dados segundo os autores) em medições de dados de vazão em um SAA localizado na cidade de Barcelona, Espanha. Utilizando RNA MLP BP (Multicamada *Backpropagation*) e Algoritmos Genéticos, os autores modelaram séries temporais geradas a partir de medições de transdutores de vazão localizados na planta e utilizaram intervalos de confiança (valores dentro de uma faixa pré-estabelecida como aceitáveis) para validar as informações. Estudos realizados por [6] objetivaram a previsibilidade de futuras demandas de água em uma rede de distribuição (localizada na cidade de Laminga na Nigéria). Utilizando RNA, desenvolveram um modelo baseado em registros históricos de demanda de água utilizando 15 nós de demanda de pressão. Os resultados obtidos serviram para o modelo realizar o controle e a supervisão dos parâmetros hidráulicos dos nós de demanda e reduziu o custo de produção da água. Estimadores de pressão foram utilizados como alternativas aos complexos modelos matemáticos e não linearidades encontradas na planta. Em relação a [7] houve a implementação de um *softsensor* para a estimativa da quantidade total de fósforo (TP) e demanda química de oxigênio (DQO) nos córregos e afluentes de uma ETE (estação de tratamento de efluentes) em um pequeno município norueguês. Foi desenvolvido um modelo matemático identificando correlações estatísticas para alimentação dos dados do sensor virtual. Os dados obtidos com as medições virtuais foram comparados com medições físicas das variáveis demonstrando resultados esperados com relação à estimação das grandezas mensuradas.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 MATERIAIS

Foi utilizada uma bancada experimental que emula um típico sistema de abastecimento de água, a qual encontrava-se totalmente instrumentalizada e automatizada, composta por um sistema de monitoramento por meio de um supervisório desenvolvido em plataforma *LabView*, onde é processada as ações de controle e estimativa, em tempo real, da vazão. Essa bancada experimental, encontra-se instalada nas dependências do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba – LENHS, da Universidade Federal da Paraíba UFPB.

O SAA é composto por um conjunto motor-bomba (CMB) que é formado por uma bomba centrífuga acoplada a um motor elétrico, de 5 cv. Essa estrutura é responsável por impulsionar a água de um reservatório para o sistema de distribuição. O sistema de impulsão é acionado com um inversor de frequência, localizado em uma sala de controle ao lado da bancada. Com a utilização do inversor de frequência, foi possível alterar a

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

velocidade de rotação do conjunto CMB e conseqüentemente as vazões na rede. As pressões no sistema são coletadas pelos transdutores de pressão PT-1, PT-2 e PT-3 (esta última fez parte de uma das entradas do estimador virtual de vazão) acoplados a sistemas de aquisição de dados. A vazão no sistema é mensurada pelo medidor de vazão eletromagnético (FT-1) a qual será objeto do desenvolvimento do *softsensor*, e uma válvula de controle (CV-1 ou VRP-CV-1), que atua como um elemento redutor de pressão na rede e corresponde a uma das entradas do estimador virtual de vazão. Para simular a demanda do sistema, foram utilizadas duas válvulas proporcionais auxiliares: CV-2 (ou VRP-CV2) e CV-3 (ou VRP-CV3). O sistema pode ser visualizado através da Figura 1.

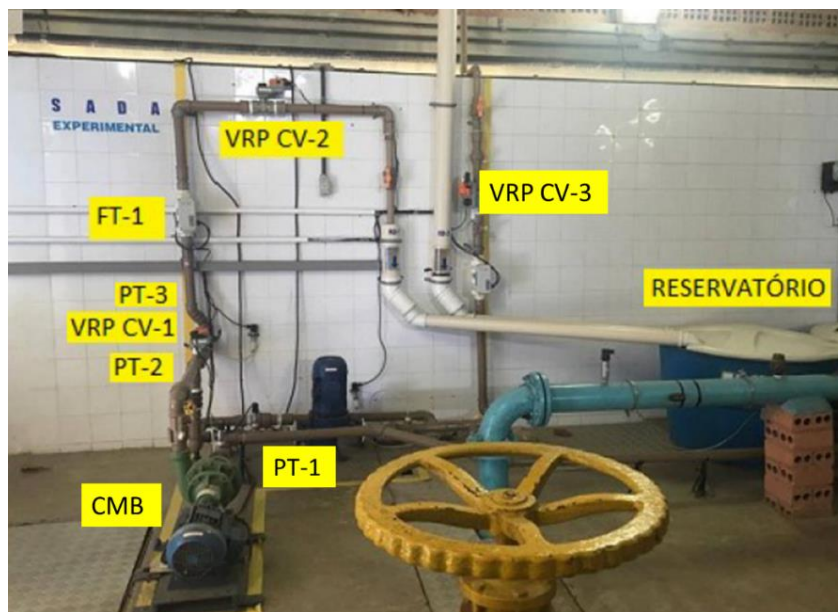


Figura 1. Elementos da bancada experimental.

## 2.2 MÉTODOS

O *softsensor* de vazão foi desenvolvido por meio da implementação de algoritmos computacionais baseados nas Redes Neurais Artificiais (RNAs). O modelo desenvolvido utiliza 03 (três) vetores como parâmetros de entrada: frequência de rotação do CMB, ângulo de abertura ou fechamento da válvula CV-1 e a pressão real mensurada por PT-3. E como parâmetro de saída, tem-se a vazão estimada. A RNA utilizada foi desenvolvida seguindo as topologias *Multi-Layer Perceptron* (MLP) e Recursiva (NARX utilizando a vazão como elemento adicional de entrada). A camada intermediária de cada RNA foi composta por oito neurônios. Assim, a rede completa foi composta por três entradas, oito neurônios na camada intermediária, e uma saída (a vazão estimada). Para a implementação das redes RNA candidatas a exercer o papel do *softsensor*, foi utilizado o software Matlab (versão 2020b) com a função de ativação adotada para a camada oculta sendo a Sigmóide Tangente Hiperbólica (STH) enquanto

**SMART WATER:**

Transição hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

para a camada de saída foi adotada a função linear. Finalmente, o algoritmo de treinamento utilizado foi o Levenberg-Marquardt (LM), para ambas as estruturas. A Figura 2 ilustra uma representação esquemática da topologia do processo utilizada na pesquisa.

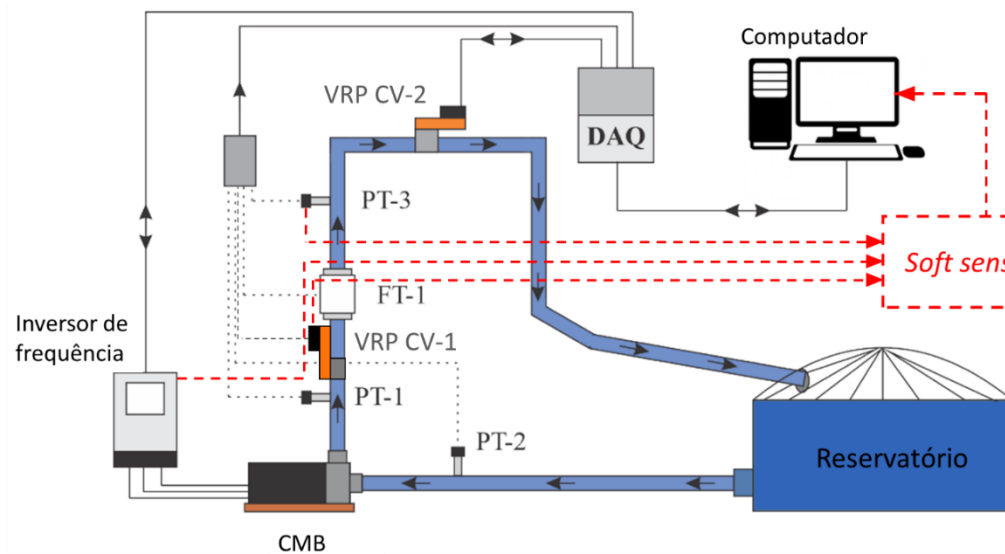


Figura 2. Topologia da bancada experimental e do bloco estimador de vazão.

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1 ENSAIO PARA ESCOLHA DO SOFTSENSOR

O ensaio foi realizado com o objetivo de verificar qual das duas redes (MLP ou NARX) apresenta menor erro no que se refere à estimativa da vazão. A partir desses resultados pôde-se adotar qual rede seria, de fato, o *softsensor*. Para essa condição foram adotadas as premissas para a coleta de dados da planta: o CMB iniciou no estado de repouso (0 Hz) e em seguida sua frequência de rotação sofreu variação em degraus de 30 Hz, 40 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 50 Hz, 40 Hz, e 30 Hz a cada 3 minutos; as válvulas CV-1 e CV-3 permaneceram com seus ângulos de abertura sempre na posição de 45° cada uma, enquanto a válvula CV-2 encontrava-se na posição de 0°; as válvulas CV-2 e CV-3 são válvulas auxiliares por regular o fluxo de água no sistema. Seus sinais coletados não foram considerados entradas do *softsensor* e a pressão (referente ao sensor PT-3) foi mensurada com o sistema experimental atuando em malha aberta. Inicialmente foi examinada a RNA MLP *Backpropagation* para a fase de teste da rede utilizando os dados de entrada: frequência de rotação do CMB, ângulo de CV-1 e pressão mensurada em PT-3. A saída estimada foi a vazão. As Figuras 3 e 4 ilustram, respectivamente, a

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

vazão medida por meio de um sensor eletromagnético de vazão (FT-1) e a vazão estimada resultante da fase de teste para a RNA MLP *Backpropagation*.

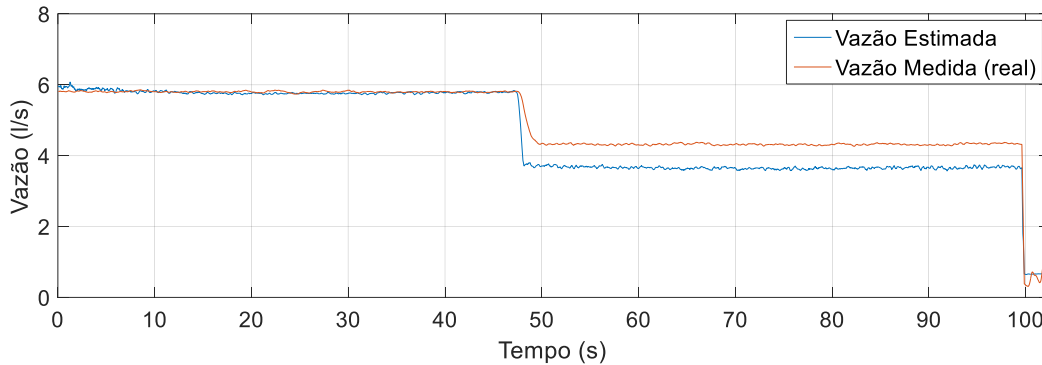


Figura 3. Vazão medida e estimada durante a fase de teste da RNA Multi-layer Feedforward Backpropagation.

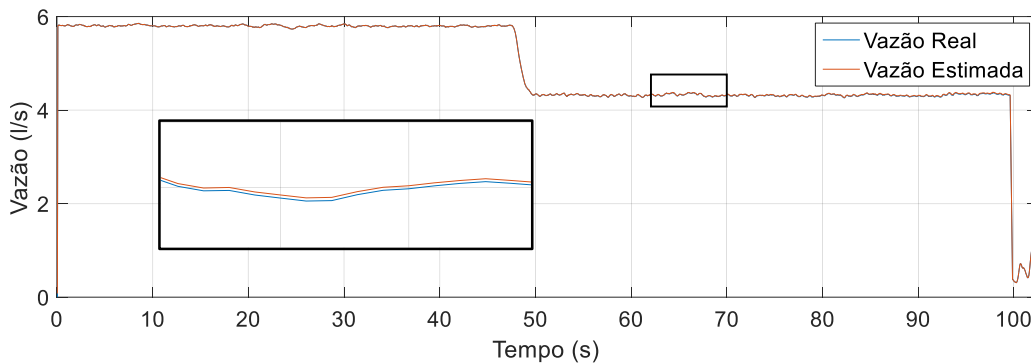


Figura 4. Vazão medida e estimada durante a fase de teste da RNA NARX para o ensaio.

Para fins de quantificação do rastreamento do erro mediante os dados que compuseram os gráficos ilustrados nas Figuras 3 e 4, foram determinadas algumas **Métricas Estatísticas** (MEs) utilizando o critério MSE (*Mean Square Error*), referente às redes MLP e NARX. A Tabela 1 contém a comparação entre as métricas estatísticas obtidas para as duas redes. Assim, diante dos resultados obtidos, foi adotada a rede NARX para exercer a função do *softsensor*.

Tabela 1. Comparação entre o rastreamento do erro obtidos na estimação de vazão utilizando MLP e NARX para o ensaio..

Métricas estatísticas	MLP	NARX	Razão $ME_{(MLP)}$ e $ME_{(NARX)}$
Média do erro absoluto	0,2104	0,0262	8,0305
MAPE (%)	0,1336	0,00045	296,8889
Erro máximo absoluto	1,5002	0,1308	11,4694



## SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Desvio padrão do erro absoluto	0,8731	0,0055	158,7454
--------------------------------	--------	--------	----------

### 3.2 VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO *SOFTSENSOR* NO SISTEMA

O teste teve como objetivo verificar a atuação do *softsensor* estimando a vazão quando o controlador adaptativo, desenvolvido por [8] e utilizado para o controle da pressão no sistema, se encontrava sujeito à mudança no valor desejado (*setpoint*) de pressão, emulando um consumo real em uma determinada localidade. As Figuras 5 e 6 ilustram, respectivamente, a curva controlada de pressão com incrementos e decrementos fixos de *setpoint* e o resultado da comparação entre o valor real da vazão mensurada pelo instrumento eletromagnético FT-1 e o estimado pelo *softsensor*.

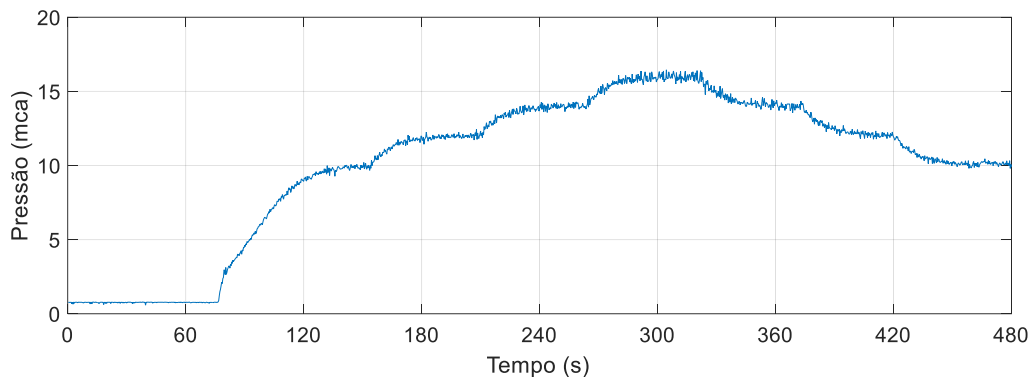


Figura 5. Respostas da planta controlada para diferentes valores desejados da pressão.

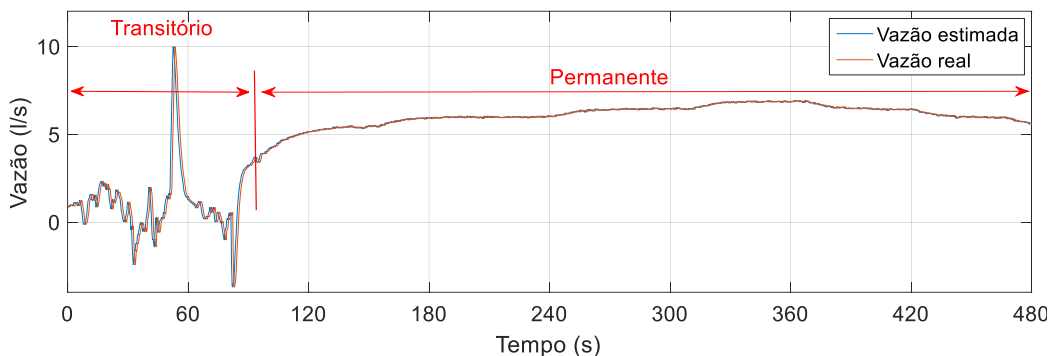


Figura 6. Vazão estimada versus real com a planta controlada para diferentes valores desejados da pressão.

Para o teste, foram consideradas as premissas de que os parâmetros adotados pelo controlador adaptativo foram de  $K_p = K_i = K_d = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0,01$ ; as válvulas CV-2 e CV-3 com ângulos de abertura na posição de  $45^\circ$  (consumo intermediário); a válvula CV-1 com posição de  $0^\circ$ ; o CMB encontrava-se, inicialmente, em repouso (0 Hz) e os valores desejados de pressão foram iguais a 10, 12, 14, 16, 14, 12 e 10 m.c.a.

### SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Como resposta (Figura 6), houve a eficiente mensuração indireta da vazão, até mesmo durante o regime transitório inicial. Para análise quantitativa, foram determinadas algumas MEs relacionadas ao rastreamento do erro quando o sistema atingiu o regime permanente adotado a partir do instante 100s, comparando valores reais (FT-1) e valores via *softsensor*: média do erro absoluto obtida de 0,0339 l/s; MAPE (%) de 0,0042; erro máximo absoluto de 0,4286 l/s e desvio padrão do erro absoluto de 0,0292 l/s. Todas com valores bem inferiores a 1 unidade de erro.

## 4. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi a implementação de um instrumento virtual, denominado *softsensor*, capaz de mensurar a vazão em um sistema de abastecimento de água. Assim, para o escopo do trabalho, foram implementadas RNA candidatas a exercer a função do *softsensor*. A partir da análise dos resultados, foram realizadas as comparações entre a estimação da vazão pelo *softsensor* desenvolvido e um sensor de vazão físico instalado no laboratório, obtendo-se como resultados valores de Erro Máximo Absoluto de 0,4/s, Erro Percentual Absoluto Médio (MAPE) menor do que 1%, dentre outros parâmetros. Esses valores corroboraram com a eficiência da técnica de estimação apresentada neste trabalho.

## AGRADECIMENTO

Este trabalho foi financeiramente apoiado pela FAPESQ/PB – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba, Brasil, através do projeto Eficiência Energética e Controle de Perdas de Água em Sistemas de Abastecimento Urbano.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. Zhao, Y. Sun, Z. Liu, e K. Li. “An engineering-oriented variable water flow air-conditioning system terminal flow rate estimation method based on component flow resistance characteristics”. *Energy Science & Engineering*, vol.9 (6), Dezembro. 2020, pp.843-854.
- [2] M. Cabral, D. Loureiro, M. Almeida, e D. Covas. “Estimation of costs for monitoring urban water and wastewater networks”. *J. Water Supply Res. Technology*, vol 68, Março. 2019, pp. 87-97.
- [3] N. Valentin, e T. Denoeux. “A Neural Network-Based Software Sensor for Coagulation Control in a Water Treatment Plant”. *Intell. Data Anal*, vol..5, Janeiro. 2001 pp. 23-39.
- [4] Z.Xu, J. Yang, H. Cai, Y. Kong, e B. He. “Water distribution network modeling based on NARX”. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, Junho. 2015, pp.72-77.



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [5] H. Rodriguez, V. Puig, J. Flores, e R. Lopez. “Flow Meter Data Validation and Reconstruction Using Neural Networks: Application to the Barcelona Water Network”. In: Eur. Control Conf. (ECC), vol.1, Junho. 2016. pp. 1746-1751.
- [6] B. Gwaivangmin, e J. Jiya.” Water Demand Prediction Using Artificial Neural Network for Supervisory Control”. Niger. J. Technol. Vol. 36. 2017, pp.148-154.
- [7] A. Nair, A. Hykkerud e, H. Ratnaweera. “Estimating Phosphorus and COD Concentrations Using a Hybrid Soft Sensor: A Case Study in a Norwegian Municipal Wastewater Treatment Plant”. Water, vol. 14, Janeiro. 2022, p. 332.
- [8] T. Flores, J. Villanueva, H. Gomes, e S. Catunda. “Adaptive Pressure Control System Based on the Maximum Correntropy Criterion”. Sensors, vol. 21, Julho, 2021.pp. 5156.