



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MÁDILO LAGES VIEIRA PASSOS

**PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS EM FUNÇÃO DA QUALIDADE
DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO**

FORTALEZA

2022

MÁDILO LAGES VIEIRA PASSOS

PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA
ÁGUA DE IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P322p Passos, Mádilo Lages Vieira.
Predição de retrolavagem de filtros em função da qualidade da água de irrigação / Mádilo Lages Vieira Passos. – 2022.
88 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa.

1. Agricultura Irrigada. 2. Inteligência Computacional. 3. Filtragem. I. Título.

CDD 630

MÁDILO LAGES VIEIRA PASSOS

PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS EM FUNÇÃO DA QUALIDADE DA
ÁGUA DE IRRIGAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em 28/01/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

PhD. Adunias dos Santos Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Adail e Analí.

Ao amigo e professor Edmilson Igor Bernardo
Almeida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa, pela orientação e profissionalismo durante o curso de mestrado.

Ao PhD. Adunias dos Santos Teixeira pela receptividade e colaboração com o presente trabalho.

Aos colegas de mestrado, em especial: Antônio Bruno, Nicholas, Naara Iorrana, José Bonifácio, Luciana, Gilbenes, Francisco Hugo e David, pela troca de conhecimentos.

Aos colegas de grupo de pesquisa: Arthur e Ronney Mendes, pela colaboração.

Aos profissionais e estagiários do Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), pela amizade e suporte nas análises.

Aos amigos e funcionários do Laboratório de Hidráulica e Irrigação, em especial, Arnaldo Gomes e Luiz Xavier.

Aos amigos de moradia Francisco Mardones, Juvenaldo, Luilson e Rodolfo pela convivência compartilhada em Fortaleza-CE.

À família Ribeiro, em especial: Taciana e Eduardo, por todo apoio, diálogo e carinho.

Aos meus pais Adail e Analí, e irmão Ádilo, pela amizade, carinho e confiança.

À Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), pelo suporte de material.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Dividida em dois capítulos, esta pesquisa aborda aspectos técnicos do emprego de águas de qualidade inferior em sistemas de irrigação. No primeiro capítulo, objetivou-se a construção de uma sonda mutiparamétrica com hardware e software acessíveis, protocolos e pressuposições básicas da IoT (do inglês, Internet of Things) e desempenho segundo conceitos de lógica fuzzy. A sonda foi baseada na plataforma Arduino modelo Nano. Os sensores utilizados foram: sensor de pH (potencial hidrogeniônico), turbidez e o sensor de sólidos totais dissolvidos. Para transmissão de dados implementou-se o Bluetooth clássico (módulo HC-06) e o padrão 802.11 g/b/n, módulo ESP8266 (ESP-01). O padrão Wi-Fi (IEEE 802.11 g/b/n), via ESP8266 versão 01, apresentou os melhores resultados de consistência e eficiência de transmissão de informações, segundo a modelagem fuzzy. No segundo capítulo, averiguou-se tecnicamente a influência da qualidade da água na necessidade de limpeza em sistemas de filtragem com retrolavagem. Para tanto, a modelagem da pressão de retrolavagem foi realizada em função da qualidade da água e da carga de pressão na entrada de filtros de tela, via redes neurais artificiais. As variáveis de qualidade de água foram mensuradas pela sonda multiparamétrica. As redes neurais artificiais do tipo multilayer perceptron feedforward com arquitetura 2-4-1, exprimiram boa precisão na modelagem da evolução temporal da carga de pressão no sistema de filtragem de tela (120 mesh). O modelo para carga de pressão, a partir das características de qualidade da água pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura, expressou baixo desempenho.

Palavras-chave: agricultura irrigada; inteligência computacional; filtragem.

ABSTRACT

Divided into two chapters, this research addresses technical aspects of using inferior quality water in irrigation systems. In the first chapter, the objective was the construction of a multiparametric probe with accessible hardware and software, protocols and basic assumptions of IoT (Internet of Things) and performance according to fuzzy logic concepts. The probe was based on the Arduino Nano model platform. The sensors used were: pH sensor (hydrogen potential), turbidity and total dissolved solids sensor. For data transmission, classic Bluetooth (HC-06 module) and 802.11 g/b/n standard, ESP8266 module (ESP-01) were implemented. The Wi-Fi standard (IEEE 802.11 g/b/n), via ESP8266 version 01, presented the best results for consistency and efficiency of information transmission, according to the fuzzy modeling. In the second chapter, it was technically investigated the influence of water quality on the need for cleaning in filtering systems with backwash. For this purpose, backwash pressure modeling was expressed as a function of water quality and pressure load at the entrance of screen filters, via artificial neural networks. Water quality variables were measured using a multiparameter probe. Feedforward multilayer perceptron artificial neural networks with 2-4-1 architecture, expressed good precision in modeling the temporal evolution of pressure load in the screen filtering system (120 mesh). The pressure load model based on the water quality characteristics pH, turbidity, total dissolved solids and temperature, expressed poor performance.

Keywords: irrigated agriculture; computational intelligence; filtering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Placa Arduino modelo Nano V3.0	27
Figura 2 – Sensor pH módulo PH4502C com eletrodo sonda plugue BNC	28
Figura 3 – Sensor de turbidez modelo TSW30 com placa de interface	28
Figura 4 – Sensor de qualidade água sólidos dissolvidos totais	29
Figura 5 – Componentes auxiliares: (A) Secure Digital SD; (B) RTC; e (C) LCD 16x2 com interface I2C de dados	31
Figura 6 – Bateria selada vrla 12v 9,0ah	32
Figura 7 – Módulo Bluetooth clássico modelo HC-06 V2.0 + EDR	32
Figura 8 – Tempo de execução do aplicativo DTblue: (A) serviços; e (B) monitoramento de dados	33
Figura 9 – Módulo ESP8266 modelo ESP-01 com Wi-Fi V3.0 padrão IEEE 802.11 g/b/n	34
Figura 10 – Tempo de execução do Webservice DT4.0: (A) Página principal; (B) visualização, exclusão e adição de canais pelo usuário; (C) formulário para cadastro de novos canais de monitoramento; e (D) consulta de leituras, exportação e limpeza da base de dados	35
Figura 11 – Somatório dos erros quadráticos de cada cluster, método do “cotovelo”	38
Figura 12 – Centroides e clusters obtidos para a eficiência percentual: (A) subgrupo 1,0 h; (B) subgrupo 2,0 h; (C) subgrupo 4,0 h; e (D) subgrupo 8,0 h	38
Figura 13 – Sonda multiparamétrica: (A) esquemático de componentes; e (B) montagem final	41
Figura 14 – Estrutura hidráulica para filtração e retrolavagem	56
Figura 15 – Filtro de disco 120 mesh 1”	56
Figura 16 – Módulo de controle de válvulas de fluxo de filtração e retrolavagem: (A) esquemático; e (B) montado	57
Figura 17 – Medidor de vazão tipo parshall	57
Figura 18 – Retorno do fluxo de retrolavagem	58
Figura 19 – Amostra da água utilizada: (A) Vista lateral; e (B) vista superior	58
Figura 20 – Sensor de temperatura DS18B20	59
Figura 21 – Acompanhamento em tempo real da qualidade da água	59
Figura 22 – Filtro de tela 120 mesh para retrolavagem	60

Figura 23 – Sensor transdutor de pressão	60
Figura 24 – Aferição da pressão manométrica na saída do filtro	61
Figura 25 – Filtro de tela de 120 mesh com tomada de pressão manométrica	61
Figura 26 – Estrutura hidráulica para calibração	62
Figura 27 – Placa utilizada durante todos os ensaios com o sensor transdutor de pressão: (A) frente; e (B) verso	63
Figura 28 – Data logger para condições atmosféricas	63
Figura 29 – Montagem da curva da bomba: (A) sensor pressão; e (B) sensor de vazão.....	64
Figura 30 – Averiguação de vazão: (A) vazão 5,0 m ³ h-1; e (B) vazão 0,50 m ³ h-1.....	65
Figura 31 – Curva da bomba carga de pressão versus vazão.....	66
Figura 32 – Carga de pressão filtro de tela: (A) vazão 1,5 m ³ h-1; (B) vazão 2,0 m ³ h-1; (C) vazão 2,5 m ³ h-1; e (D) vazão 3,0 m ³ h-1	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do desempenho segundo o índice de confiança “c”	30
Tabela 2 – Estatísticas dos testes de Durbin-Watson, Breusch-Pagan, Kolmogorov Smirnov e tamanho amostral (n) das equações de calibração linear simples.....	41
Tabela 3 – Modelos (\hat{y}) da relação entre os valores de pH, Turbidez e STD com a tensão (x, volts)	43
Tabela 4 – Estatísticas do teste t de significância para os coeficientes ‘b’ e ‘a’.....	43
Tabela 5 – Estatísticas de desempenho dos modelos, raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c)	44
Tabela 6 – Qualidade de transmissão (Bit-Error Rate, BER), eficiência (E_f), tamanho amostral (N) e desempenho para o Bluetooth clássico, durante 8,0 horas de monitoramento e intervalo de 1,0 min de envio	45
Tabela 7 – Qualidade de transmissão (Bit-Error Rate, BER), eficiência (E_f), tamanho amostral (N) e desempenho para o Wi-Fi, durante 8,0 horas de monitoramento e intervalo de 1,0 min de envio	46
Tabela 8 – Pressão de saída da bomba, carga de pressão no filtro de tela, pressão atmosférica local (P_{atm}), temperatura do ar (T_{ar}), temperatura da água ($^{\circ}C$), umidade relativa (%) e tamanho amostral (n)	64
Tabela 9 – Pressão atmosférica local (P_{atm}), temperatura do ar (T_{ar}), temperatura da água ($^{\circ}C$), umidade relativa (%) e tamanho amostral (n)	66
Tabela 10 – Estatísticas do teste t, raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c)	68
Tabela 11 – Pressão atmosférica (P_{atm}), temperatura do ar (T_{ar}), temperatura da água ($T_{\acute{a}gua}$), umidade relativa (U_r), erro padrão e tamanho amostral (n)	69
Tabela 12 – Média de tensão pH, turbidez e sólidos totais dissolvidos (STD) para as vazões de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 $m^3 h^{-1}$	69
Tabela 13 – Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação	71
Tabela 14 – Tempo necessário para iniciar a retrolavagem	72
Tabela 15 – Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação do ajuste de Carga de pressão e tempo em função características de qualidade da água	73

Tabela 16 – Componentes principais, autovalores e porcentagem da variância explicada pelos componentes	73
Tabela 17 – Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação do ajuste de Carga de pressão e tempo em função dos componentes principais (01 e 02)	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Agricultura irrigada	15
2.2	Qualidade da água para irrigação	15
2.3	Filtração e retrolavagem de filtros	16
2.4	Lógica Fuzzy	17
2.5	Redes neurais artificiais	19
2.6	Referências	20
3	MODELAGEM FUZZY APLICADA A QUALIDADE DE DADOS MONITORADOS REMOTAMENTE POR SONDA MULTIPARAMÉTRICA	24
3.1	Introdução	25
3.2	Material e métodos	26
3.2.1	<i>Local e data de desenvolvimento</i>	27
3.2.2	<i>Plataforma de prototipagem e sensores</i>	27
3.2.3	<i>Calibração dos sensores</i>	29
3.2.4	<i>Dispositivos acessórios</i>	31
3.2.5	<i>Conectividade Bluetooth e Wi-Fi</i>	32
3.2.6	<i>Avaliação da sonda e modelagem fuzzy</i>	36
3.3	<i>Resultados e discussão</i>	40
3.3.1	<i>Sonda multiparamétrica e calibração dos sensores</i>	40
3.3.2	<i>Avaliação da sonda e modelagem fuzzy</i>	44
3.4	Conclusões	47
3.5	Referências	48
4	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS DE TELA PARA IRRIGAÇÃO	53
4.1	Introdução	54
4.2	Material e métodos	55
4.2.1	<i>Local e data de desenvolvimento</i>	55
4.2.2	<i>Estrutura hidráulica</i>	55
4.2.3	<i>Qualidade física da água</i>	58

4.2.4	<i>Avaliação da necessidade de limpeza</i>	59
4.2.5	<i>Calibração do sensor transdutor de pressão</i>	62
4.2.6	<i>Caracterização das condições experimentais</i>	64
4.2.7	<i>Ajuste perceptron de múltiplas camadas</i>	66
4.3.	Resultados e discussão	68
4.3.1	<i>Calibração do sensor</i>	68
4.3.2	<i>Resumo descritivo da qualidade de água</i>	69
4.3.3	<i>Retrolavagem e predição de limpeza</i>	70
4.4	Conclusões	76
4.5	Referência	76
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A população mundial é cerca de 7,2 bilhões de habitantes, em 2024 será superior a 8 bilhões de pessoas e, em 2050 poderá superar 9,5 bilhões (SAATH; FACHINELLO, 2018). Esse aumento populacional demanda investimentos no setor agrícola para incrementar a produção de alimentos e garantir a segurança alimentar.

A prática da irrigação representa uma das estratégias para aumentar a produção agrícola. Entretanto, para atender a demanda hídrica das culturas pode-se utilizar grande quantidade de água. De fato, sabe-se que a agricultura é um dos segmentos que mais utilizam recursos hídricos e equivale a cerca de 69% do uso de água (MENEZES, 2012).

A utilização de águas de qualidade inferior surge como uma alternativa às questões de esgotamento das fontes hídricas e, quando destinadas à agricultura, possibilitam, indiretamente, a ampliação da oferta de água para consumo humano. Contudo, ressaltam-se cuidados especiais relativos ao efeito dos constituintes da água sobre o funcionamento hidráulico do sistema de irrigação que a conduzirá. Nesse aspecto, o monitoramento constante de parâmetros de qualidade da água se faz necessário.

Para viabilizar o uso de águas de qualidade inferior nos sistemas de irrigação, é necessário a utilização de sistemas de filtragem. Os filtros de tela são os mais utilizados em sistemas de irrigação localizada (OLIVEIRA, 2005). No entanto, requerem limpeza frequente do elemento filtrante. A limpeza pode ser realizada quando as obstruções ocasionam uma determinada perda de carga no filtro, sendo executada mediante retrolavagem manual ou automatizada. Esta última, classicamente, faz uso de atuadores (válvulas) e sensores transdutores de pressão para quantificação do diferencial manométrico entre os pontos de entrada e saída dos filtros.

Entre outros fatores, a obstrução do filtro dependerá da carga de impurezas da água em filtração. Nesse sentido, o processo de limpeza via retrolavagem automática, pode se basear em algum modelo ajustado à perda de carga estimada pelo monitoramento contínuo de características da água. Equipamentos para determinação da qualidade da água, como os medidores multiparâmetros, estão disponíveis no mercado a um custo variado. Tais equipamentos são bem-conceituados, de alta confiabilidade e precisão estão presentes em laboratórios onde geralmente amostras de água são avaliadas. No entanto, manifestam limitações quanto às aplicações em automação de processos, que normalmente exigem armazenamento e análise de extenso conjunto de dados, tomadas de decisões programadas

segundo esse conjunto e com operações executadas, dependendo da situação, em curto espaço de tempo.

Os sensores com finalidade equivalente, porém destinados aos microcontroladores e/ou em plataformas computacionais embarcadas a baixo custo constituem-se em alternativas promissoras para o trabalho em campo e viabilização da automação de processos. Ressalva-se que, sua implementação está sujeita a testes rigorosos, haja vista a relevância da temática. Nesse aspecto, pode ser satisfatória a inferência a partir de algoritmos computacionais sofisticados construídos especialmente para o tratamento de massivas e variadas informações.

Para avaliação, optou-se por dividir esta pesquisa em dois tópicos gerais. O primeiro, intitulado “MODELAGEM FUZZY APLICADA A QUALIDADE DE DADOS MONITORADOS REMOTAMENTE POR SONDA MULTIPARAMÉTRICA”. Se destinou a construção de uma sonda multiparamétrica acessível, com transmissão dos dados por Bluetooth clássico e Wi-Fi. Os sensores de pH (potencial hidrogeniônico), de turbidez (TSW30) e um sensor de sólidos totais dissolvidos, foram avaliados na mensuração da qualidade da água.

Já, no segundo tópico intitulado “REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS NA PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS DE TELA PARA IRRIGAÇÃO”. Houve implementação de um sistema de filtragem de tela, dotado de filtração e retrolavagem automáticos baseados em carga de pressão e qualidade de água.

Para tanto, de modo geral, objetivou-se a utilização de algoritmos computacionais na avaliação da qualidade de dados de água, bem como da definição de patamares ótimos de limpeza via retrolavagem de filtros de tela para irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura irrigada

No planeta, a área irrigada ocupa em torno de 307,6 milhões de hectares (17% de toda a terra agricultável). A retirada anual de água para irrigação em 165 países e 2 territórios foi de cerca de 2,67 milhões km³, representando 5,1% dos recursos hídricos renováveis do planeta segundo dados de Frenken & Gillet (2012). Tais números fazem com que a agricultura irrigada responda pela produção de mais de 40% de todo o alimento consumido no mundo (PAULINO *et al.*, 2011).

Desde 1960 até 1995/96 a área irrigada aumentou de 0,45 milhões de hectares para 3,1 milhões de hectares, com cerca de 90% dessas áreas desenvolvidas pela iniciativa privada, e os 10% por projetos públicos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009).

Assim como na média geral mundial, no Brasil o consumo de água na agricultura é o mais extensivo (CARMO *et al.*, 2007). Cada hectare irrigado equivale a três de sequeiro em produtividade física e a sete em produtividade econômica (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2004).

A expansão da agricultura justifica-se devido à crescente demanda por alimentos (OLIVEIRA, 2005). Avaliações de projetos de irrigação indicam que mais da metade da água pode se perder antes de chegara região radicular dos cultivos (SILVA; SILVA; PIRES, 2014).

2.2 Qualidade da água para irrigação

A qualidade da água é afetada pelo uso e da ocupação do solo na sua bacia de contribuição; pelos componentes presentes na água e que alteram a sua qualidade. Essa qualidade é classificada em função das características físicas, químicas e biológicas (LEMOS FILHO, 2009). As características físicas são definidas pelos sólidos (totais, dissolvidos e suspensos) presentes na água. As químicas pelos materiais orgânicos e inorgânicos presentes na água. As biológicas pelos organismos e microorganismos vivos presentes na água (GASTALDINI; MENDONÇA, 2003).

Segundo Ayers e Westcot (1999), a qualidade da água para a irrigação é uma ferramenta importante para definir para que tipo de cultura ela pode ser usada, evitando problemas com o equipamento de irrigação devido à obstrução.

Os sistemas de irrigação localizada de alta frequência, principalmente gotejamento e microaspersão, são os mais afetados pelos problemas de contaminação da água. O caso do gotejamento é mais crítico, haja vista que a água, conduzida pela rede de tubos instalados, passa através de gotejadores cujo orifício é de pequeno tamanho e forma complexa (espiral ou labirinto), para produzir a perda de carga suficiente para gotejar e baixas vazões de descarga (ALMEIDA, 2009).

2.3 Filtração e retrolavagem de filtros

Os sistemas de filtragem para irrigação fazem uso, em sua grande maioria, de filtros de areia, tela e disco. Os filtros de tela são largamente empregados. Estes, removem de forma eficiente partículas muito finas de areia e pequenas quantidades de algas (KELLER; BLIESNER, 1990). Este tipo de filtro é constituído por um corpo geralmente de forma cilíndrica que aloja em seu interior o elemento filtrante, composto de um suporte perfurado metálico ou plástico recoberto por uma tela (LOPEZ *et al.*, 1992).

As telas são universalmente definidas pelo seu número de malha (nº de mesh), o qual representa o número de aberturas em uma polegada de tela (RODRIGUES, 2006). O tamanho dos filtros bem como os seus números de mesh são definidos conforme a necessidade, de acordo com as partículas que deverão ser removidas e o tipo de emissor utilizado.

Muitos emissores disponíveis no mercado requerem filtros com telas de malhas finas de 100 ou 200 mesh (150 ou 75 µm), a grossas de 30 mesh (600 µm), requerendo limpeza e inspeção de rotina, de modo a assegurar a operação satisfatória do sistema de irrigação localizada (SOCCOL, 2003). Uma tela com 200 mesh, tem pequenos tamanhos de orifícios, são normalmente utilizados em filtros de irrigação localizada para reter apenas parte da areia muito fina.

O fator determinante para a obstrução dos filtros é o diâmetro das partículas de areia fina, pois bloqueiam diretamente a área dos poros, ao passo que as partículas de areia grossa necessitam preencher todo o volume do elemento filtrante para que ocorra o mesmo efeito (PHILLIPS, 1993). Considerando que os filtros possuem dois modos básicas de operação: filtração e a retrolavagem, esta última utilizada para a limpeza da camada filtrante (SALCEDO; TESTEZLAF; MESQUITA, 2011).

A retrolavagem é definida como a passagem da água através do filtro em sentido contrário ao fluxo de filtração com o objetivo de remover partículas orgânicas e inorgânicas retidas no meio filtrante (ASABE, 1994).

Os filtros de tela normalmente são instalados posteriormente aos de areia, ou seja, são complementares ao sistema de filtração. Entretanto, há tendência de eliminar o filtro de areia e utilizar somente o filtro de tela, desde que possuam sistemas automáticos de limpeza, dado que águas com significativos contaminantes orgânicos não podem ser completamente limpas com um filtro de tela que contenha sistema de limpeza manual (RODRIGUES, 2006).

Os filtros com limpeza automática (retrolavagem) são mais efetivos, contudo terão capacidade de filtração limitada na presença de grande quantidade de matéria orgânica na água de irrigação; nestes, a limpeza pode ser realizada abrindo uma válvula, ou porta de saída, que permita que um jato de água lave o interior do filtro, expulsando os contaminantes acumulados, assim, o fluxo de água através da tela se dá de dentro para fora do filtro (RODRIGUES, 2006).

Nessa direção, diversos autores têm implementado e avaliado o desempenho de sistemas de filtração de tela dotados de limpeza automática. Duran-Ros *et al.* (2009) construíram e avaliaram o desempenho de um sistema de filtração de tela (120 μm) e a eficiência de retrolavagem automática em pressões de entrada de 300 e 500 kPa. Os autores controlaram a limpeza por perda de carga, através de transmissores de pressão.

Zong *et al.* (2015) também implementaram um sistema de filtração dotado de retrolavagem para analisar as perdas de carga em filtros de tela de 178 μm e 124 μm . Os autores mediram as perdas de carga em diferentes taxas de fluxo usando dois medidores de pressão e as vazões usando medidor ultrassônico.

Kumar *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de filtração de tela (120 μm) para avaliar o seu desempenho e a eficiência de retrolavagem em pressões de entrada de 250 e 400 kPa. O sistema era composto por sensores transmissores de pressão e medidor de volume. Os autores relataram aumento no número de retrolavagens eficientes na maior pressão de entrada, sendo que os sensores foram fundamentais para monitorar o diferencial de pressão no filtro e, assim, controlar a limpeza.

2.4 Lógica Fuzzy

A teoria de conjuntos fuzzy foi introduzida por Lotfi Asker Zadeh, em 1965, como uma teoria matemática aplicada a conceitos difusos (PONCIANO *et al.*, 2011). Diferente da

Lógica Booleana que admite apenas valores booleanos, ou seja, verdadeiro ou falso, a lógica difusa ou fuzzy, trata de valores que variam entre 0 e 1 (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011). Assim, enquanto nos conjuntos clássicos o elemento pode assumir apenas dois valores de pertinência (aspecto bivalente) 0 ou 1, em que o meio é excluído (PONCIANO *et al.*, 2011), nos conjuntos fuzzy, ocorre a flexibilização do intervalo de pertinência, na qual a transição entre pertinência é gradual (SCHIASI *et al.*, 2008). O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor 0 indica uma total exclusão e um valor 1 representa completa pertinência. Assim, uma pertinência de 0,5 pode representar meio verdade, logo 0,9 e 0,1, representam quase verdade e quase falso, respectivamente (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

Sistemas fuzzy, são sistemas capazes de trabalhar com informações imprecisas e transformá-las em uma linguagem matemática de fácil implementação computacional (Ferreira, 2009). Schiassi *et al.* (2008) explicam que um sistema fuzzy é constituído por variáveis de entrada e saída. Para cada variável, são atribuídos conjuntos fuzzy que as caracterizam, sendo que, para cada conjunto fuzzy, é criada uma função de pertinência, ou seja, quanto que um elemento pertence a um conjunto (PONCIANO *et al.*, 2011).

As variáveis de entrada sofrem uma “fuzzificação”, o processo que converte as variáveis de entrada do sistema em conjuntos fuzzy em seus respectivos domínios, por meio de especialistas ou de uma base de dados (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011). As variáveis e suas classificações linguísticas são modeladas em conjuntos fuzzy. Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Sua principal função é fornecer uma maneira sistemática de aproximação de fenômenos complexos ou mal definidos (ZADEH, 1975).

A lógica fuzzy é amplamente empregada para análise multivalorada (SÁ; WEN, 2019). Deste modo, possui aplicações em diversas áreas do conhecimento. Na agricultura irrigada, Lima *et al.* (2010) desenvolveram um sistema de controle inteligente fuzzy, para definir o momento de irrigação, pela manutenção do potencial matricial de água no solo. O controle era realizado pela alteração velocidade de rotação do motor de acionamento da bomba, por meio de um inversor de frequência variável, comandado por sinal elétrico fornecido por um computador, cujo valor dependia das condições e características do solo.

Mousa *et al.* (2014) propuseram um sistema de irrigação eficiente manejado com base na evapotranspiração (ET) e da quantidade de irrigação necessária usando inferência fuzzy, de acordo com os requisitos de cada cultura e à mudança de parâmetros climatológicos.

Os autores relataram que o algoritmo não permitiu ocorrência de estresse hídrico, porque o modelo proíbe o esgotamento da umidade do solo.

2.5 Redes neurais artificiais

Uma rede neural artificial (RNA) é um processador maciçamente paralelo distribuído constituído de unidades de processamento simples, que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para o uso (HAYKIN, 1999). Essas unidades são chamadas de neurônios artificiais e são capazes de computar funções matemáticas que na maioria dos casos são não lineares (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2007). Em síntese, as RNAs consistem em elementos de processamento altamente interconectados (LEONE FILHO, 2006).

As redes neurais artificiais são especificadas pela topologia ou arquitetura, características dos neurônios, e regras de treinamento. A arquitetura pode ser especificada em termos de números de entradas, números de camadas intermediárias, números de neurônios em cada camada intermediária, número de saídas e nas maneiras como são feitas as conexões entre os neurônios (LEONE FILHO, 2006).

Para Haykin (2001) pode-se identificar três classes de arquitetura de redes diferentes:

- Redes feedforward com camada única;
- Redes feedforward com múltiplas camadas;
- Redes Recorrentes.

A rede feedforward com camada única alimentada pode resolver problemas multivariáveis, mas por serem de camada única possuem limitações quando à capacidade de generalização (LAZZARIN, 2019). Uma rede feedforward de múltiplas camadas é semelhante ao caso anterior, mas camadas neuronais adicionais possibilitam maior capacidade de aproximação (BELOTTI, 2019).

O principal representante da classe de redes feedforward com múltiplas camadas, é o perceptron de múltiplas camadas (MLP - do inglês multilayer perceptron). A rede MLP é uma das mais importantes arquiteturas de RNAs. É constituída por um conjunto de neurônios artificiais dispostos em várias camadas de modo que o sinal de entrada se propaga adiante através da rede, camada por camada (BELOTTI, 2019).

As redes MLP são compostas por camadas sucessivas, com a primeira delas denominada camada de entrada ou input layer, uma ou mais camadas intermediárias ou hiddenlayers e a camada de saída, também denominada output layer (HAYKIN, 2009). A camada de entrada, como o nome sugere, recebe os sinais de entrada, a camada de saída entrega o resultado obtido e entre elas podem existir quantas camadas ocultas forem necessárias (HAYKIN, 2009). Na MLP os neurônios de camadas disjuntas se conectam, enquanto neurônios de uma mesma camada não se comunicam, o que confere à rede a condição feedforward (LAZZARIN, 2019).

Apesar das MLPs poderem conter diversas camadas intermediárias, em aplicações práticas é comum que empregue apenas uma (HAYKIN *et al.*, 2009). Esta rede é totalmente treinada e pode aproximar qualquer mapeamento, sendo adequada a problemas de previsão, clusterização, equalização de canais, dentre outros (SIQUEIRA *et al.*, 2012; 2014). Deste modo, são amplamente utilizadas em várias áreas da ciência e engenharia (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Rocha Neto *et al.* (2015) utilizaram a rede MLP para determinar o tempo de irrigação da cultura da melancia, com base no Balanço Hídrico Volumétrico (BHV) como padrão de comparação do manejo efetuado pela implementação proposta com a MLP. Os autores reportaram que o manejo via RNA pode substituir o BHV como uma estratégia.

Ainda no contexto do manejo de irrigação, Meneses *et al.* (2020) aplicaram a rede MLP para estimar a evapotranspiração de referência baseada no método Penman-Monteith (ETPPM), para facilitar a utilização deste, uma vez que o mesmo exige uma grande quantidade de elementos meteorológicos. Os autores concluíram que as redes neurais artificiais podem ser utilizadas para a estimativa da ETPPM diária com inputs de temperaturas do ar.

2.6 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Agricultura irrigada**: estudo técnico preliminar. Brasília: ANA, 2004, 107p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009**. Brasília: ANA, 2009. 204p.

ALMEIDA, O. Á. **Entupimento de emissores em irrigação localizada**. 1. ed. Cruz das Almas: Embrapa, 2009. 61p.

ASABE. **ANSI/ASAE S539**: media filters for irrigation – testing and performance reporting. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1994.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de: GHEYI, R.S.; MEDEIROS, J.F.; DEMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29).

BELOTTI, J.T. **Previsão de vazões afluentes utilizando redes neurais artificiais e ensembles**. 2019. 139f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007. 248p.

CARMO, R.L. do; OLIVEIRA, A.L.R. de; OJIMA, R.; NASCIMENTO, T.T. do. Água virtual, escassez e gestão: O Brasil como grande “exportador” de água. **Ambiente & Sociedade**, Campinas v. X, n.1, p.83-96, 2007.

DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ, C.F. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems. **Biosystems Engineering**, n.103, v.1, p.35-42, 2009.

FERREIRA, L. Aplicação de sistemas fuzzy e neuro-fuzzy para predição da temperatura retal de frangos de corte. 2009. 56f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FRENKEN, K.; GILLET, V. **Irrigation water requirement and water withdrawal by country**. Rome: FAO, 2012. 262 p. (FAO AQUASTAT Reports).

GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceito para a avaliação da qualidade da água. *In*: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.1, p.3-13.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Londres: Pearson, 2009. 936p.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. New Jersey: PrenticeHall, 1999. 842p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 902p.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 625p.

KUMAR, J.; YADAV, M.; SRIVASTAVA, S. Performance and Backwashing Efficiency of Screen, Disc and Sand Filters in Micro-Irrigation Systems. *Trends in Biosciences*, v.10, n.12, p.2172-2178, 2017.

LAZZARIN, L. N. A. **Método ensemble baseado em redes neurais artificiais para estimação de internações por doenças respiratórias**. 2019. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

LEMOS FILHO, M.A.F. **Sistema com Aeração, Decantação e Filtragem para Melhoria da Qualidade da Água para Irrigação Localizada**. 2009. 55f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

LEONE FILHO, M. A. **Previsão de carga de curto prazo usando ensembles de previsores selecionados e evoluídos por Algoritmos Genéticos**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2006.

LIMA, F.M.C.; SILVA, S.A.; FILGUEIRA, H.J.A.; GOMES, H.P. **Controle do potencial matricial da água no solo por meio de Lógica Fuzzy**. *Irriga*, v. 15, n. 4, p. 431-442, 2010.

LOPEZ, J.R.; HERNANDEZ, J.M. A.; REGALADO, A.P.; HERNANDEZ J.F.G. 2. Ed. **Riego Localizado**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 430p.

MOUSA, A.K.; CROOCK, M.S.; ABDULLAH, M.N. Fuzzy based Decision Support Model for Irrigation System Management. **International Journal of Computer Applications**, v.14, n.9, p.14-20, 2014.

MENESES, K.C.; APARECIDO, L.E.O.; MENESES, K.C.; FARIAS, M.F.F. Estimating Potential Evapotranspiration in Maranhão State Using Artificial Neural Networks. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p.675-682, 2020.

OLIVEIRA, C.F. **Perda de carga em filtros de tela e de discos utilizados na irrigação localizada**. 2005. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C. A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; JOSÉ, J.V. Situação da Agricultura Irrigada no Brasil de Acordo com o Censo Agropecuário 2006. **Irriga**, v. 16, n. 2, p. 163-176, 2011.

PHILLIPS, K.P. Filtration’s Role in water Quality: Polishing Water Fro Low – Volume Irrigation. **Irrigation journal**, v.43, n.4, p.8 – 12, 1993.

PONCIANO, P.F.; LOPES, M.A.; YANAGI JUNIOR, T.; FERRAZ, G.A.S. **Análise do ambiente para frangos por meio da Lógica Fuzzy: uma revisão**. **Arch. Zootec.**, v.60, n.R, p.1-13, 2011.

RIGNEL, D.G.S.; CHENCI, G.P.; LUCAS, C.A.L. UMA INTRODUÇÃO A LÓGICA FUZZY. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, v.01, n.01, p.17-28, 2011.

ROCHA NETO, O.D.; TEIXEIRA, A.S.; BRAGA, A.S.; SANTOS, C.C.; LEÃO, R.A.O. Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. **Eng. Agríc.**, v.35, n.2, p.266-279, 2015.

RODRIGUES, G.A. **Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de filtro de tela autolimpante**. 2006. 39p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1226-1237, 2011.

SCHIASSI, L.; YANAGI JUNIOR, T.; FERREIRA, L.; DAMASCENO, F.A.; YANAGI, S.N.M. Metodologia fuzzy aplicada à avaliação do aumento da temperatura corporal em frangos de corte. **Engenh. Agric.**, v.16, p.180-191, 2008.

SILVA, I. N. da; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas** - curso prático. 1. ed. São Paulo: ARTLIBER, 2010. 399p.

SILVA, W. R.; SILVA, M.R.; PIRES, T.B. O Uso Sustentável e a Qualidade da Água na Produção Animal. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.11, n.05, p.3617-3636, 2014.

SIQUEIRA, H. V.; BOCCATO, L.; ATTUX, R., LYRA, C. Unorganized Machines for Seasonal streamflow series forecasting. **International Journal of Neural Systems**, v. 24, n.3, p. 1430009-1430016, 2014.

SIQUEIRA, H. V.; BOCCATO, L.; ATTUX, R.; LYRA, C. Echo state networks and extreme learning machines: A comparative study on seasonal streamflowseries prediction. **Lecture Notes in Computer Science**, v.7664, n.2, p.491–500, 2012.

SOCCOL, O.J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. 89p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ZADEH, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. **Information sciences**, v.8, p.199-249, 1975.

ZONG, O.; LIU, Z.; LIU, H.; YANG, H. Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems. **PLOS ONE**, v.14, n.2, p.1-18, 2019.

3 MODELAGEM FUZZY APLICADA A QUALIDADE DE DADOS MONITORADOS REMOTAMENTE POR SONDA MULTIPARAMÉTRICA

RESUMO

A análise da qualidade da água para irrigação auxilia na solução de problemas com equipamentos de irrigação, como a obstrução em sistemas localizados, sendo fundamental na irrigação de precisão. Objetivou-se o desenvolvimento e avaliação de uma sonda multiparamétrica acessível, bem como o desempenho na transmissão remota dos dados por Bluetooth clássico e Wi-Fi. A sonda foi baseada na plataforma Arduino modelo Nano. Os sensores foram: sensor de pH (potencial hidrogeniônico), sensor de turbidez (TSW30) e um sensor de sólidos totais dissolvidos. Para transmissão sem fio, implementou-se o Bluetooth clássico (módulo HC-06) e o módulo ESP8266 (ESP-01). Para avaliação do desempenho de envio de dados, empregou-se um sistema inferência fuzzy, para tanto adotou-se duas variáveis Bit-Error Rate (BER) e eficiência percentual (Ef). A sonda multiparamétrica a baixo custo permitiu a mensuração do pH, turbidez e sólidos totais dissolvidos. O padrão Wi-Fi (IEEE 802.11 g/b/n), via ESP8266 versão 01, apresentou os melhores resultados de consistência e eficiência de transmissão de informações, segundo a modelagem fuzzy.

Palavras-chave: arduino; internet das coisas; bluetooth; wi-fi.

ABSTRACT

The analysis of water quality for irrigation helps to solve problems with irrigation equipment, such as obstruction in localized systems, being essential in precision irrigation. The objective was the development and evaluation of an accessible multiparametric probe, as well as the performance in remote data transmission via classic Bluetooth and Wi-Fi. The probe was based on the Arduino Nano model platform. The sensors were: pH sensor (hydrogen ionic potential), turbidity sensor (TSW30) and a total dissolved solids sensor. For wireless transmission, classic Bluetooth (HC-06 module) and ESP8266 module (ESP-01) were implemented. To evaluate the performance of sending data, a fuzzy inference system was used, for this purpose, two variables were adopted: Bit-Error Rate (BER) and percentage efficiency (Ef). The low cost multiparameter probe allowed the measurement of pH, turbidity and total dissolved solids. The

Wi-Fi standard (IEEE 802.11 g/b/n), ESP8266 version 01, presented the best results for consistency and efficiency of information transmission, according to the fuzzy modeling.

Keywords: Arduino; internet of things; bluetooth; wi-fi.

3.1 Introdução

A análise de adequação da água para irrigação não é muito comum em países em desenvolvimento, embora tenha impacto significativo nas lavouras (SINGH *et al.*, 2021). Para Allende e Monaghan (2015) a água agrícola representa um dos principais fatores de risco de contaminação de alimentos, sobretudo em culturas folhosas ingeridas cruas na forma de saladas.

Também pode acarretar problemas com o equipamento de irrigação, como a obstrução em sistemas localizados (AYERS; WESTCOT, 1999). A sensibilidade ao entupimento depende de características do emissor e a qualidade da água em termos físicos, químicos e biológicos (SILVA *et al.*, 2012). As variáveis físicas e químicas associadas ao risco de obstrução são: os sólidos suspensos e dissolvidos, pH, ferro total e manganês (BUCKS; NAKAYAMA, 1980).

Para mensurar a qualidade da água, tem-se equipamentos laboratoriais e de campo (sondas multiparamétricas). Mendonça *et al.* (2017) preconizaram o uso de sondas pois permitem a obtenção automática dos dados mediante contato com os corpos d'água, não necessitando de coleta de amostra, nem a realização do transporte para análises em laboratórios, além de resultados exibidos em tempo quase real. Como limitação, ressalta-se seu alto custo, manuseio cuidadoso e instalação em local seguro.

Nessa direção, Cunha *et al.* (2020) enfatizaram a necessidade do desenvolvimento de medidores multiparâmetros baseados em plataformas e sensores mais acessíveis e com suporte a tecnologias de comunicação que viabilizem a coleta de dados e acesso aos seus resultados em tempo real remotamente. É frequente o uso dessas plataformas microcontroladas embarcadas e sensores de baixo custo com conectividade baseada em pressuposições básicas da conhecida Internet das Coisas (do inglês Internet of Things, IoT), na agricultura irrigada (OGIDAN *et al.*, 2019; PANDIT *et al.*, 2019; GARCÍA *et al.*, 2020). De modo geral, a arquitetura dessas ferramentas envolve conceitos da IoT, sensores e transdutores conectados a um microcontrolador com transmissão sem fio para um banco de dados local ou em nuvem (remoto) que transforma os dados brutos em informações úteis (ZAFAR *et al.*, 2018).

A construção de equipamentos baseados em plataformas acessíveis e IoT, são recorrentes na literatura (TYAGI *et al.*, 2017; KUMAR *et al.*, 2018). Contudo, são escassos trabalhos que abordem o desempenho das variadas arquiteturas de comunicação existentes, com ênfase em suas potencialidades e limitações em diferentes situações de transferência de informações. Nesse sentido, para a inferência concisa, a aplicação de métricas de qualidade de transmissão são indispensáveis. Para tanto, há indicadores como a taxa de erro de bit (do inglês error-bit rate, BER), indicação de força do sinal recebido (received signal strength indication, RSSI), verificação de erro de cabeçalho (header error check, HEC) e taxa de erro de pacote (packet error rate, PER) (CONTI *et al.*, 2003; WEL; YAN, 2007). Além disso, Chiasserini e Rao (2003) ressaltaram que para inferência satisfatória, a apreciação conjunta e simultânea dessas métricas como uma combinação inteligente, é preponderante.

Para aplicações em análise multivalorada, como sistemas de apoio à decisão e controladores são amplamente suportados em lógica fuzzy (nebulosa) (SÁ; WEN, 2019; VERONEZ *et al.*, 2019). Um sistema de inferência fuzzy (método de estimativa aproximado) pode ser usado para modelar o comportamento de um processo mesmo com informações incompletas e incertas (MOUSA *et al.*, 2014). Assim, possivelmente pode auxiliar na avaliação das informações trafegadas pelos protocolos de comunicação sem fio.

Em função do exposto, objetivou-se o desenvolvimento e avaliação de uma sonda multiparamétrica acessível, bem como o desempenho na transmissão remota dos dados por Bluetooth clássico e Wi-Fi.

3.2 Material e métodos

A sonda multiparamétrica voltou-se para a análise automática das variáveis físico-químicas de qualidade da água a partir dos sensores de pH (potencial hidrogeniônico), Turbidez e Sólidos Dissolvidos Totais.

Para o desenvolvimento do módulo de monitoramento dos sensores, baseada em plataforma de prototipagem acessível, foram construídas placas universais para os componentes embarcados. Ao passo que para a conectividade, isto é, a aquisição remota dos dados transferidos em tempo real, optou-se pelos protocolos Bluetooth clássico e Wi-Fi, sendo criada uma aplicação móvel para comunicação Bluetooth e outra Web, suportada por comunicação e requisições via protocolo HTTP, além de ser projetada para ser executada em qualquer navegador Desktop ou *mobile*.

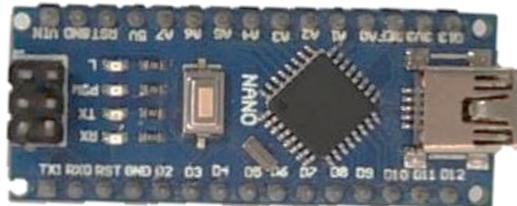
3.2.1 Local e data de desenvolvimento

Realizou-se a construção e avaliação do módulo de sensores de monitoramento da qualidade da água em área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Campus de Fortaleza – CE, no período de outubro de 2020 a maio de 2021.

3.2.2 Plataforma de prototipagem e sensores

A plataforma de prototipagem escolhida para desenvolvimento foi a Arduino®, pois é baseada em hardware e software de código aberto de simples aplicação, acessível e com uma gama de sensores disponíveis no mercado. Desse modo, possui funcionalidades apropriadas à finalidade da pesquisa proposta. O modelo de hardware selecionado foi o Arduino Nano (Figura 1) e o software IDE (Integrated Development Environment) exclusivo para este tipo de desenvolvimento.

Figura 1 - Placa Arduino modelo Nano V3.0



Fonte: elaborado pelo autor.

O Arduino Nano é uma placa pequena (45 x 18 mm), completa e compatível com placa de ensaio, baseada no ATmega328 (Arduino Nano 3.x) (ARDUINO, 2021). Além do mais, o Arduino Nano pode ser utilizado em interface serial com módulos de conectividade Bluetooth e Wi-Fi.

Com relação aos sensores, o pH (potencial hidrogeniônico) foi mensurado através do módulo sensor PH4502C e eletrodo tipo sonda conector plugue BNC (Figura 2). O módulo eletrônico é responsável por condicionar o sinal, isto é, regular e transformar a voltagem a ser utilizada no sensor de pH para uso com o microcontrolador, pois este atua em baixa voltagem. O módulo eletrônico emite um sinal de tensão entre 0 e 5 volts conforme valor de pH.

Figura 2 - Sensor pH módulo PH4502C com eletrodo sonda plugue BNC

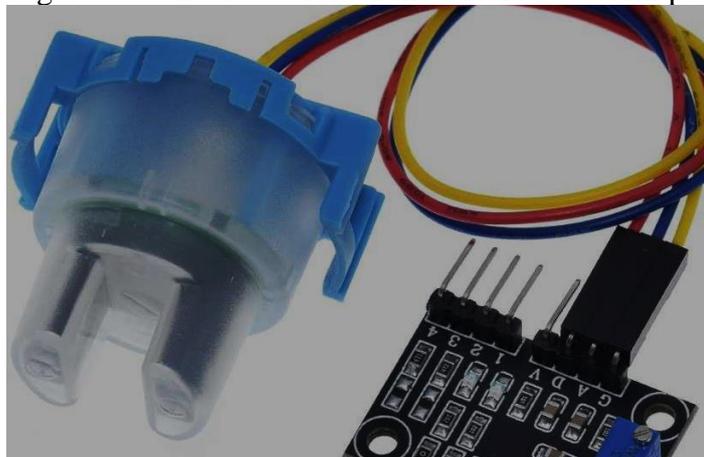


Fonte: elaborado pelo autor.

Segundo o fabricante, o módulo sensor pH possui as seguintes características: tensão de aquecimento de $5 \pm 0,2$ volts (AC/DC), corrente de operação de 5 a 10 mA, faixa de temperatura de 0 a 60°C e saída analógica, para medições na faixa de pH 0,0 a 14,0.

Para quantificação da turbidez, empregou-se o sensor de turbidez modelo TSW30 da TZT teng Official Store com placa de interface e condicionamento de sinal (Figura 3). Conforme o fabricante, este possui um emissor de luz infravermelha, imperceptível a visão humana, e um receptor em suas extremidades. Em tese, pode detectar partículas em suspensão na água, pela transmitância de luz e da taxa de dispersão, isto é, do nível de atenuação da intensidade da radiação emitida e recebida, que é condicionada a quantidade de sólidos suspensos totais. O mesmo, apresenta as seguintes especificações: tensão de 5 Vdc, corrente máxima de 30 mA, saída analógica de 0 a 4,5 Vdc ou digital (alto – 5 V e baixo – 0 V) e temperatura de operação de -20 a 90 °C. A faixa de medição é de 0,0 a 1000 ± 30 NTU.

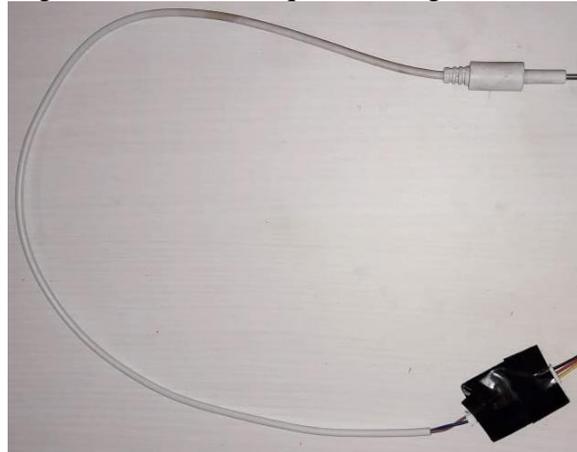
Figura 3 - Sensor de turbidez modelo TSW30 com placa de interface



Fonte: elaborado pelo autor.

Também foi utilizado o sensor de sólidos totais dissolvidos (STD) (Figura 4) que indica a quantidade de miligramas de sólidos solúveis existentes em um litro de água. Opera até a temperatura máxima de 55,0 °C, voltagem de entrada na faixa de 3,3 a 5,5V e de saída com 0 a 2,3V de sinal analógico e compatível com controladores que usam 5 ou 3,3V, conforme informa o fabricante. A faixa de medição indicada está entre 0,0 e 1000,0 ppm (partes por milhão) ou 0,0 a 1000,0 mg L⁻¹.

Figura 4 - Sensor de qualidade água sólidos dissolvidos totais



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3 Calibração dos sensores

A metodologia utilizada para calibração do módulo sensor PH4502C foi a direta a partir de soluções padrão de pH, isto é, previamente conhecidos (pH=1,79; pH=4,5; pH=6,88; pH=12,13; pH=13,99) e quantificados por pHmetro de bancada. Ao passo que para o sensor de turbidez, empregou-se o método indireto. Para tanto, foi necessário um turbidímetro digital portátil modelo Digimed DM-TU previamente calibrado em Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU) e soluções obtidas de água + solo em diferentes concentrações, de forma que tanto o sensor em calibração como o medidor portátil atuavam nas mesmas amostras. Ao todo, oito soluções foram usadas e estimaram turbidez média de 1,3, 158,0, 255,4, 315,2, 427,4, 571,5, 632,8 e 713,0 NTU.

Para obtenção da equação de calibração do sensor de sólidos totais dissolvidos (STD), aplicou-se o método direto por meio de soluções com condutividade elétrica conhecida (0,50, 1,0 e 2,0 dS m⁻¹). Embora a condutividade elétrica expresse a capacidade da água em conduzir corrente elétrica, sendo uma medida direta para a concentração de espécies iônicas dissolvidas, principalmente inorgânicas, esse parâmetro é muito relacionado com a

concentração de sólidos totais dissolvidos, em mg L^{-1} (LEAL, 2012; PIÑEIRO DI BLASI *et al.*, 2013). Assim, a estimativa de STD, em mg L^{-1} , foi o produto da condutividade elétrica, em mS cm^{-1} , pela constante 640, conforme Ribeiro e Paterniani (2013).

No método de calibração dos sensores de turbidez e STD, eram mensurados dez valores para uma mesma solução (com os sensores), em intervalos de tempo de uniformes de cinco segundos. Para o sensor de pH, optou-se por seguir os passos descritos por Lima (2018).

Para as equações de calibração de todos os sensores, o modelo de regressão linear simples foi escolhido, cujos coeficientes foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (do inglês Ordinary Least Squares, OLS). Diferentes pressupostos precisam ser satisfeitos para que a análise de regressão de mínimos quadrados ordinários possa ser adequadamente utilizada, produzindo o Melhor Estimador Linear Não-Viesado (do inglês Best Linear Unbiased Estimator, BLUE). As principais premissas são: resíduos independentes entre si, média nula, variância constante e igual a σ^2 (homocedasticidade) e distribuição normal. A verificação de independência foi feita através do teste de Durbin-Watson, a homocedasticidade pelo teste de Breusch-Pagan e a normalidade dada por Kolmogorov-Smirnov. Todos os testes foram empregados a 5% de significância.

A significância do modelo de regressão (equação de ajuste) se deu mediante a utilização do teste t de Student de significância para o coeficiente angular (b) e linear (a). A hipótese nula (H_0), b e a não diferem estatisticamente de zero, é rejeitada quando o valor de t calculado é maior, em valor absoluto, que o valor crítico (t_0) tabelado, para n-2 graus de liberdade e determinada significância (5%).

Para a avaliação do desempenho estatístico dos modelos, empregou-se os indicadores de raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d) de Willmott *et al.* (1985) e o índice de confiança ou desempenho (c).

O índice de confiança (c), foi classificado de acordo com Camargo e Sentelhas (1997), os valores desse índice variam de 0.0 para nenhuma concordância a 1.0 para concordância perfeita entre os dados. A Tabela 1 apresenta os critérios para a classificação.

Tabela 1 - Classificação do desempenho segundo o índice de confiança “c”

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível

0,41 a 0,50
 $\leq 0,40$

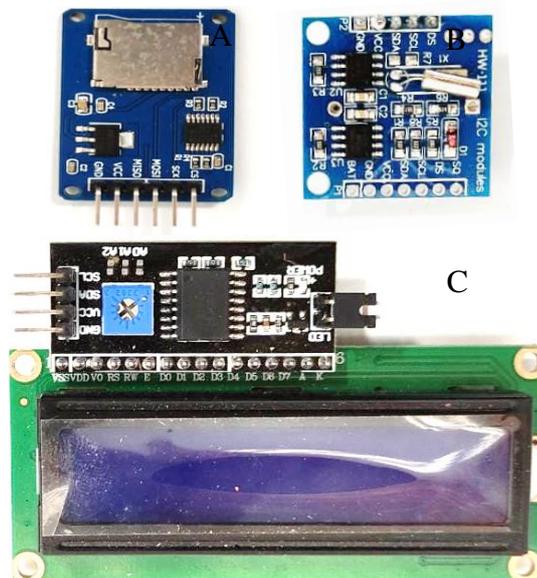
Ruim
 Pésimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

3.2.4 Dispositivos acessórios

A sonda projetada possuía diversos componentes auxiliares (Figura 5, A, B e C). Um cartão Micro SD HC e módulo de cartão Secure Digital SD (Figura 5A) para o armazenamento dos dados coletados, no sentido de backup e segurança das informações em caso de problemas com o hardware de conectividade ou ausência de suporte as plataformas Bluetooth e Wi-Fi. Relógio RTC (Real Time Clock) (Figura 5B) para gravar a data e horário das leituras, criando-se um Datalogger. Os dados são gravados em arquivo de texto (.txt). Além disso, utilizou-se um visor LCD (Liquid Crystal Display) 16x2 para acompanhamento das leituras, com interface I2C integrado para o uso de apenas 4 conexões da interface I2C (Figura 5C).

Figura 5 - Componentes auxiliares: (A) Secure Digital SD; (B) RTC; e (C) LCD 16x2 com interface I2C de dados



Fonte: elaborado pelo autor.

A alimentação do circuito foi dada por bateria 12,0 V 9,0 AH (Figura 6). Para rebaixar a tensão a 5,0 V, empregou-se o módulo regulador de tensão Step Down XL4005.

Figura 6 - Bateria selada vrla 12v 9,0ah



Fonte: Unipower (2021).

3.2.5 *Conectividade Bluetooth e Wi-Fi*

A sonda multiparamétrica foi construída para suportar transmissão sem fio dos dados coletados por sensores a partir das plataformas de conectividade Bluetooth e Wi-Fi, tecnologias essas que são compatíveis com Arduino.

O Bluetooth é usado na Wireless Personal Area Network (WPAN), operando na frequência de rádio de onda em banda não licenciada ISM (Industrial, Científica e Médica, na sigla em inglês) entre 2,4 e 2,485 GHz, baseado no padrão IEEE 802.15.1 (MAHMOOD; JAVAID; RAZZAQ, 2015; ARAB; ASHRAFZADEH; ALIDADI, 2018). Pode ser classificado em dois grupos: Bluetooth clássico que se divide em Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), versões 2.0 e anteriores e o Bluetooth High Speed (HS), versão 3.0; e o Bluetooth Low Energy (BLE), versão 4.0 ou superior. Implementou-se o Bluetooth clássico pelo módulo HC-06 (Figura 7). Segundo o *Datasheet*, o HC-06 é um módulo Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) para Bluetooth V2.0 + EDR (Enhanced Data Rate), que atua somente como escravo.

Figura 7 - Módulo Bluetooth clássico modelo HC-06 V2.0 + EDR



Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados coletados pelos sensores conectados ao Arduino são transferidos para o módulo Bluetooth HC-06, a partir da interface Aduino/HC-06 que utiliza comunicação serial. Em seguida, para um aplicativo mobile em um smartphone. A comunicação entre o módulo Bluetooth HC-06 e o dispositivo móvel, via aplicativo, usa o Perfil de Porta Serial (do inglês

Serial Port Profile, SPP). Assim sendo, para recebimento dos dados foi criada a aplicação mobile, que atua como mestre e o módulo como escravo.

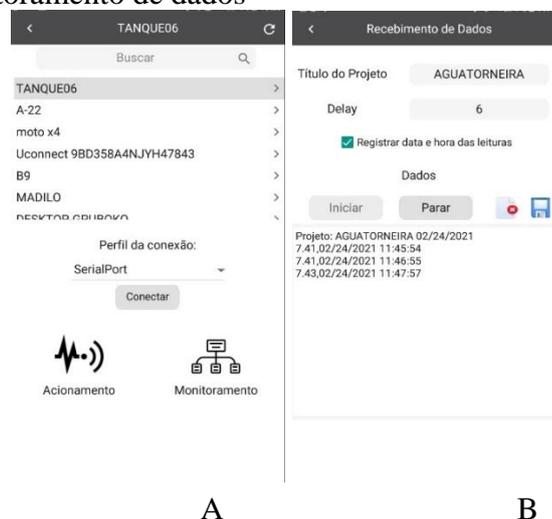
A base de rotinas do aplicativo foi programada em linguagem Delphi, baseado no conceito “Object Pascal”. O IDE utilizado foi o Rad Studio Rio 10.3.2 da Embarcadero®. A tecnologia de Sockets via Bluetooth clássico é possibilitada através do componente nativo Delphi da classe TBluetooth. Segundo a Embarcadero (2020) esse componente apresenta as seguintes características:

- Útil para aplicativos com fluxo de dados, pois alcança maior rendimento;
- Taxa de transferência de dados: 2 Mbps;
- Alto consumo de energia;
- Tecnologia baseada em perfis Bluetooth padrão (SPP, DUN, PAN);
- Limitado a 7 escravos.

O aplicativo foi compilado para a plataforma *Android*, porém utilizou-se o framework FireMonkey que possui caráter multi-plataforma. Assim, pode rodar em Windows, Mac (OS X), *Android*, iOS e Linux Server *, usando a mesma base de código nativa. A versão confeccionada no presente estudo está disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=br.com.madilopassos.DTblue>. Já o manual do usuário em: <https://dt04.com.br/dtblue/manual.pdf>.

O software mobile foi denominado DTblue (Figura 8, A e B). Ao acessar o módulo de serviços, são exibidos detalhes sobre os dispositivos pareados, juntamente aos perfis de conexão disponíveis e modo de operação: acionamento (controle) e monitoramento (Figura 8A). O sistema de controle não foi necessário.

Figura 8 - Tempo de execução do aplicativo DTblue: (A) serviços; e (B) monitoramento de dados

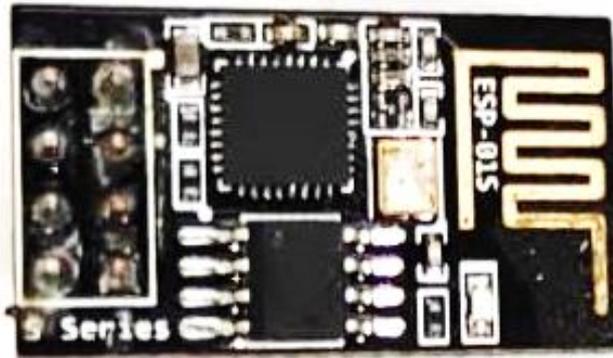


Fonte: elaborado pelo autor.

Estabelecida a conexão com o HC-06 (TANQUE06), ao ser escolhida a operação de monitoramento tem-se opções para título do projeto, delay, exibição dos dados e exclusão/salvamento destes (Figura 8B).

Com relação a conectividade via wireless fidelity (Wi-Fi), usada na Wireless Local Area Network (WLAN), foi utilizado o padrão IEEE 802.11 g/b/n, a partir do módulo ESP8266 modelo ESP-01 com Wi-Fi V3.0 (Figura 9).

Figura 9 - Módulo ESP8266 modelo ESP-01 com Wi-Fi V3.0 padrão IEEE 802.11 g/b/n.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os módulos ESP8266 são plataformas de baixo custo, fornecidas numa ampla variedade de modelos, numerados de ESP-01 a ESP-12, com CPU de 32 Bits rodando a 80MHz. A programação base é feita usando LUA, porém há possibilidade de usar a IDE Arduino, a qual foi preferida no presente estudo. O módulo foi usado como Ponte Serial-WiFi em interface com o Arduino Nano V3. Nessa conexão, o ESP-01 atuou como mestre solicitando dados do Arduino (escravo).

Para monitoramento dos dados trafegados, foi construído um Webservice próprio para o armazenamento das informações, com visualização em tempo real por qualquer dispositivo (computador e smartphone) conectado à Internet. Para desenvolvimento do front-end, empregou-se a linguagem de marcação HTML (HyperText Markup Language) e os estilos (cores, fontes, espaçamento, etc.) pelo CSS (Cascading Style Sheets). Para o back-end, utilizou-se o PHP Hypertext Preprocessor linguagem de scripts adequada para desenvolvimento Web. Para a transferência de informações, empregou-se o protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol).

Para a programação do Webservice, em máquina local, aplicou-se o XAMPP v3.2.4 um pacote de instalação com os principais servidores de código aberto, FTP, banco de dados MySQL e Apache com suporte às linguagens PHP e Perl. O Sistema Gerenciador de Banco de

Dados (SGBD) empregado foi o MySQL, código aberto mais popular do mundo. Todo o código fonte foi escrito no editor Sublime Text v3, gratuito que dá suporte a linguagens de programação e de marcação.

Construído o Webservice, os dados eram enviados pelo ESP8266 através da conexão Wi-Fi e requisições HTTP e armazenados no banco de dados MySQL. As solicitações foram do tipo GET onde as informações foram contidas no cabeçalho da URL (Uniform Resource Locator). A URL era gerada automaticamente, segundo um sistema de controle de usuários criado para o gerenciamento de diferentes aplicações potenciais da plataforma.

A cada novo registro de utilizador, o mesmo recebe uma página pessoal onde tem flexibilidade de criação de canais de monitoramento e acionamento, este último não foi necessário. A versão inicial do projeto protótipo de interface Web, para os testes de monitoramento, foi intitulada DT4.0, isto é, dados para agricultura 4.0 (Figura 10, A, B, C e D). O mesmo foi hospedado na Umblor® e pode ser consultado através do endereço eletrônico <http://dt04.com.br/>.

Figura 10 - Tempo de execução do Webservice DT4.0: (A) Página principal; (B) visualização, exclusão e adição de canais pelo usuário; (C) formulário para cadastro de novos canais de monitoramento; e (D) consulta de leituras, exportação e limpeza da base de dados

A

B

C

D

id	sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	data
1	25.70	25.70	25.70	25.70	25.70	2020-10-10 14:25:43
2	80.40	80.40	80.40	80.40	80.40	2020-10-10 14:26:43

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao acessar o Webservice do sistema, através de navegador de Internet (Android ou Desktop), tem-se: a página principal (Figura 10A), onde o usuário visualiza trabalhos desenvolvidos pelos utilizadores da plataforma, links de acesso a outras páginas do sistema e a possibilidade inserir suas credenciais. Quando logado (Figura 10B), a seção “Minha página” apresenta os projetos criados pelo usuário (canais), com opções para visualização, exclusão e adição de canais. A Figura 10C, mostra as funções do formulário para cadastro de novos projetos. Na visualização (Figura 10D), o usuário pode consultar leituras em tempo real e/ou anteriormente realizadas, exportação das informações da base de dados e limpeza do canal.

3.2.6 Avaliação da sonda e modelagem fuzzy

Após a montagem da sonda e construção das ferramentas, executou-se cinco testes com todos os sensores operando ao mesmo tempo para uma averiguação da consistência dos dados de qualidade da água. O pH foi avaliado por água com adição de vinagre e/ou bicarbonato de sódio. O sensor de turbidez foi avaliado por solução de água e solo em diferentes concentrações. Ao passo que se avaliou os sólidos totais dissolvidos em diferentes proporções de água e cloreto de sódio.

O Arduino foi programado para enviar os coletados a cada 1,0 minuto durante 8,0 horas em duas distâncias 1,0 e 10,0 metros, pelos protocolos de transmissão Bluetooth clássico e Wi-Fi, módulos HC-06 e ESP-01, respectivamente. Deste modo, cada banco de dados deveria ser constituído por um total de 480 valores por sensor.

Para a criação dos conjuntos fuzzy e a classificação de desempenho, adotaram-se duas variáveis Bit-Error Rate (BER) e eficiência percentual (Ef). A BER é uma métrica de rede importante que reflete o desempenho de aplicações, com respeito a consistência (qualidade de transmissão). Em um canal sem fio, é a proporção do número de bits recebidos por um receptor com erro pelo total de bits recebidos, expressa como uma potência negativa de dez (WEL; YAN, 2007). A BER foi calculada conforme Equação 1.

$$BER = \frac{N_e}{N_{bits}} \quad (1)$$

Onde N_e : é o numero de bits recebidos com erro; e N_{bits} : é o número total de bits recebidos.

A medida de Ef, foi calculada para analise quanto a eficiencia na transmissão de dados, isto é, registrados a cada solicitação durante o tempo de envio. Foi estimada como a razão entre a quantidade de valores recebidos pela quantidade que seria enviada caso não houvessem erros (Equação 2).

$$Ef = \frac{Nr}{N} * 100 \quad (2)$$

Onde Nr: é o numero de valores recebidos; e N: número total de valores enviados (480,0 para 8,0 horas a cada 1,0 minuto).

Definidas as variáveis de entrada, executou-se a classificação de desempenho baseada em sistema inferência fuzzy. A sua arquitetura consistiu de 3 módulos: a fuzzificação, a inferência e a defuzzificação. Na primeira etapa, modelou-se as variáveis de entrada (valores nítidos) por conjuntos fuzzy através de quantificadores linguísticos associados aos conjuntos por funções de pertinência. As variáveis de entrada BER e Ef foram constituídas de três funções de pertinência com formatos triangular e trapezoidal, e termos linguísticos Baixa, Média e Alta. As funções de pertinência triangular ou trapezoidal foram escolhidas pela simplicidade de construção.

Para escrever a BER em termos de variáveis linguísticas, bem como a construção de seu universo de discurso, adotou-se a classificação proposta por Anderson (2011). Por outro lado, definiu-se a eficiência percentual após alguma experimentação. Para ambas as variáveis, recorreu-se a abordagem encontrada em Touati *et al.* (2013). Ao passo que para a eficiência percentual, como não foi encontrada uma classificação, na tentativa de discriminar grupos e nortear a escrita em termos linguísticos, recorreu-se a abordagem de clusterização. Para tanto, os dados Ef para as plataformas Bluetooth e Wi-Fi foram utilizados no algoritmo k-means, o qual não exige um supervisor para definir previamente os padrões a serem gerados. A sua função objetivo é definida pela Equação 3.

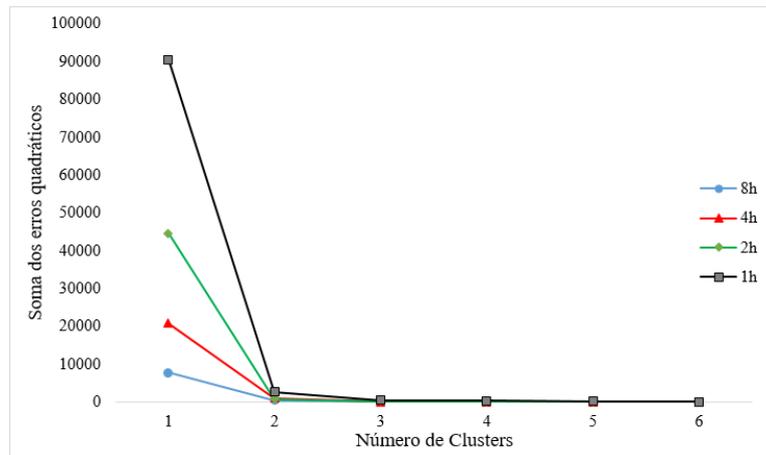
$$\text{Minimizar } J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^j - c_j\|^2 \quad (3)$$

Onde $\|x_i(j) - c_j\|$: é a distância euclidiana entre um vetor de dados $x_i(j)$ e o centro do agrupamento c_j , indicando a distância de n pontos dos dados para os centros dos k agrupamentos.

Para identificação do número de clusters, foram testados valores de k a fim de aplicar o método visual denominado “cotovelo” (do inglês – elbow) (HAN *et al.*, 2011). A quantidade de clusters foi determinada pelo ponto de máxima curvatura do gráfico. Para execução da metodologia, foram calculadas eficiências percentuais para os dados transmitidos por bluetooth e Wi-Fi, em grupos de 8,0 horas (total) e subgrupos de 4, 2 e 1 hora.

A Figura 11 exibe os atributos correspondentes ao somatório dos erros quadráticos das instâncias de acordo com a quantidade de cluster, para a eficiência percentual.

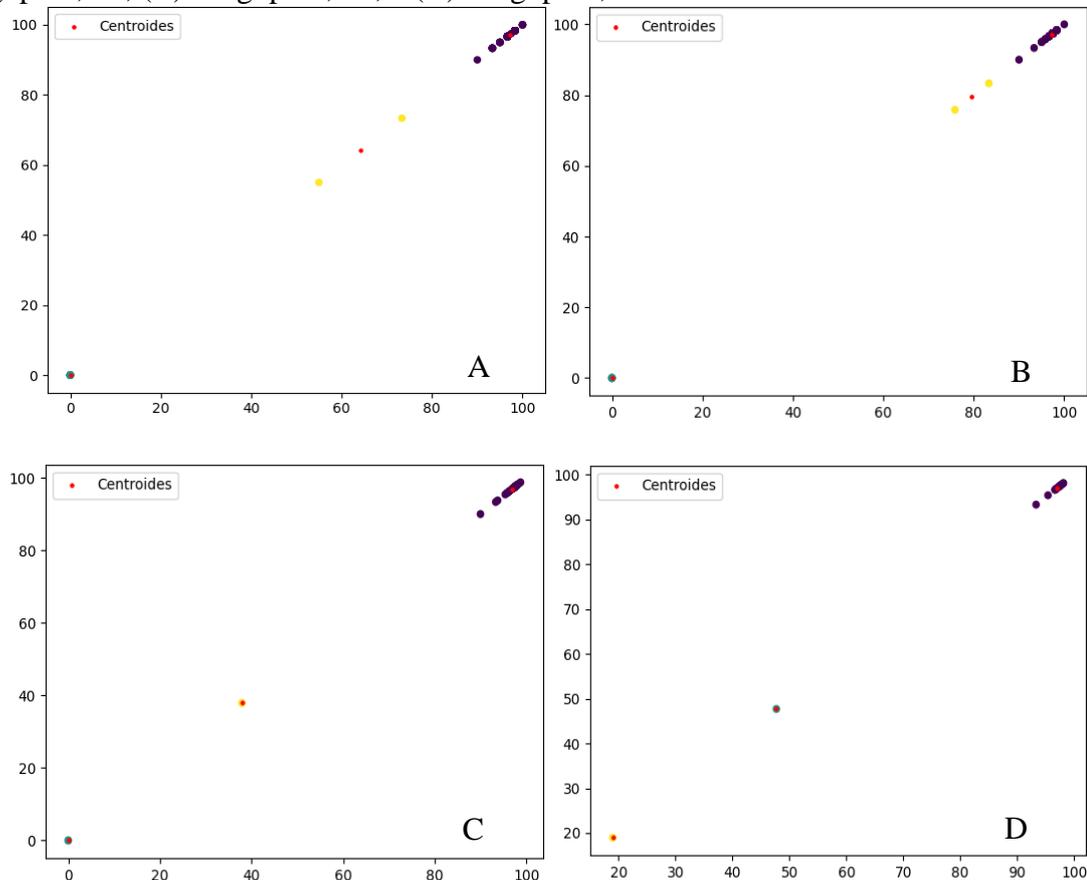
Figura 11 - Somatório dos erros quadráticos de cada cluster, método do “cotovelo”



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o auxílio do método do “cotovelo” e após alguma experimentação, o número de clusters foi fixado em 3. A Figura 12 (A, B, C e D) exhibe os centroides e clusters gerados pelo k-means para os grupos de 1,0, 2,0, e 4,0 horas, bem como para o total (8,0 horas).

Figura 12 - Centroides e clusters obtidos para a eficiência percentual: (A) subgrupo 1,0 h; (B) subgrupo 2,0 h; (C) subgrupo 4,0 h; e (D) subgrupo 8,0 h



Fonte: elaborado pelo autor.

Deste modo, a partir dos centroides observados (Figura 12) foram definidos os termos linguísticos para a Ef. Os números triangulares e trapezoidais, para a BER (a) e Ef (b), são destacados pelas funções de pertinência e seus respectivos intervalos, como se segue:

(a) Termos Linguísticos: baixa, média e alta;

- i. Baixa: $[0 \ 0 \ 10^{-5} \ 10^{-5}]$
- ii. Média: $[10^{-6} \ 10^{-4} \ 10^{-3}]$
- iii. Alta: $[10^{-4} \ 10^{-3} \ 1 \ 1]$
- iv. Universo: 0,00 a 1,00.

(b) Termos Linguísticos: baixa, média e alta;

- v. Baixa: $[0 \ 0 \ 50 \ 60]$
- vi. Média: $[50 \ 70 \ 80]$
- vii. Alta: $[70 \ 80 \ 100 \ 100]$
- viii. Universo: 0,00 a 100,00 %.

A saída (c) correspondeu a porcentagens que classificaram o desempenho da tecnologia de transmissão. Foi associada a cinco funções de pertinência cujos termos linguísticos foram péssimo, ruim, médio, bom e excelente, conforme descritos abaixo:

(c) Termos Linguísticos: péssimo, ruim, médio, bom e excelente;

- ix. Péssimo: $[0 \ 0 \ 20 \ 20]$
- x. Ruim: $[20 \ 30 \ 40]$
- xi. Médio: $[30 \ 45 \ 60]$
- xii. Bom: $[45 \ 70 \ 80]$
- xiii. Excelente: $[75 \ 90 \ 100 \ 100]$
- xiv. Universo: 0,00 a 100,00 %.

Com relação ao mecanismo de inferência, foram estabelecidas nove regras controle relacionando as três funções de pertinência da BER, com as três da Ef. A quantidade de regras foi calculada pela Equação 4.

$$N = p^n \quad (4)$$

Onde n: é o número de variáveis de entrada; e p: é o número de conjuntos linguísticos de cada uma.

O conjunto de regras elaboradas foram interpretadas pelo método de inferência Mamdani, também conhecido como controlador Mamdani (MAMDANI, 1973). Para a

composição de cada regra de controle e a relação entre elas, empregou-se a composição máximo dos mínimos (max-min) onde a agregação do conjunto de regras é dada pelo operador união.

Para o método de defuzzificação, o qual gera a saída do sistema de inferência, escolheu-se o centróide ou centro de gravidade. A metodologia emprega o cálculo da área composta pela união da conclusão de todas as regras, segundo as forças de disparo. Deste modo, favorece a regra com saída de maior área. Assim, melhor representa a solução do problema estudado, isto é, a saída de maior pertinência sugere a classificação de desempenho. Sendo, ainda, de maior predominância na literatura.

Para desenvolvimento do modelo, implementação da lógica fuzzy e análise de agrupamentos foi utilizada a linguagem de programação Python, em particular, as bibliotecas scikit-fuzzy e scikit-learn.

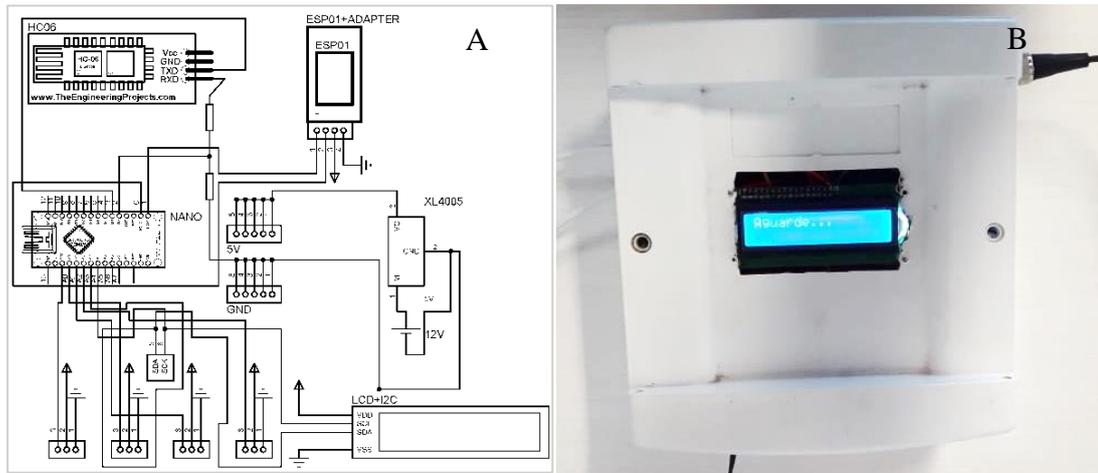
3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Sonda multiparamétrica e calibração dos sensores

Após a confecção da sonda multiparamétrica de qualidade de água acessível, verificou-se que o custo da mesma, com todos os sensores e componentes acessórios, ficou em torno de US \$ 42,82, calculado na data 22/06/2021.

A Figura 13 (A e B) apresenta uma visão geral da sonda multiparamétrica obtida, onde são visualizadas as conexões para os 3 sensores destacáveis, plataforma Arduino Nano, ESP-01, módulo Bluetooth clássico (HC-06) e display LCD (Figura 13A). A Figura 13B mostra a sonda em caixa de montagem com uma saída BNC (sensor de pH) e as restantes para os demais sensores e alimentação.

Figura 13 - Sonda multiparamétrica: (A) esquemático de componentes; e (B) montagem final



Fonte: elaborado pelo autor.

É recorrente a prototipagem de sondas multiparamétricas a baixo custo, para finalidades diversas, como se observa nos trabalhos de Ungureanu *et al.* (2010), Faustine *et al.* (2014), Lima (2018), Jorge Junior (2019), Leal Junior (2019) e Win *et al.* (2019). Contudo, Cunha *et al.* (2020) ressaltaram que os autores inferem acerca da estabilidade na transmissão remota, ruído, custo reduzido e portabilidade, sem a validação das informações coletadas ou modelos.

A avaliação dos modelos de calibração pelos testes de Durbin-Watson, Breusch-Pagan e Kolmogorov-Smirnov, na verificação das premissas de independência, homogeneidade de variância e normalidade dos resíduos, para os sensores de pH, turbidez e STD, são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatísticas dos testes de Durbin-Watson, Breusch-Pagan, Kolmogorov-Smirnov e tamanho amostral (n) das equações de calibração linear simples

Sensor	Durbin-Watson	Breusch-Pagan	Kolmogorov-Smirnov	n
pH	0,3755 ^{NS}	1,1921*	0,1290*	50
Turbidez	0,3932 ^{NS}	12,3608 ^{NS}	0,09123*	80
STD	0,2936 ^{NS}	11,1543 ^{NS}	0,3111 ^{NS}	30

*, ^{NS} – Significativo e não significativo a 5%, respectivamente.

Fonte: elaborado pelo autor.

Observou-se que a premissa de ausência de autocorrelação entre os casos, para as equações de calibração de todos os sensores não foi atendida, conforme teste de Durbin-Watson (Tabela 2). A dependência entre os termos de erro, pode ainda produzir coeficientes de estimativa não-viesados, porém testes de significância e intervalos de confiança não são totalmente confiáveis uma vez que a variância dos erros é incorreta (KUTNER *et al.*, 2004).

A presença de correlação entre os erros gerados pelos modelos ajustados já era esperada e justifica-se em virtude da forma de coleta dos dados de calibração. Uma vez que, dez leituras com os sensores eram tomadas de uma mesma amostra (soluções), configurando-se em um ensaio com medidas repetidas no tempo que, por conseguinte, fornece informações correlacionadas.

Constatou-se heterogeneidade de variância dos termos de erro para os ajustes de turbidez e sólidos totais dissolvidos e, ainda, não normalidade este último. A suposição da homocedasticidade é uma das principais e mesmo que os coeficientes de mínimos quadrados continuem a ser não-viesados, os testes de significância e intervalos de confiança estão errados (LEWIS-BECK; LEWIS-BECK, 2015). A presença de erros de mensuração nas variáveis independentes é uma das causas de heterocedasticidade (FIGUEIREDO FILHO *et al.*, 2011). Já com o distanciamento da normalidade para os resíduos, segundo o teorema de Gauss-Markov, os coeficientes obtidos são viesados e ineficientes.

Deste modo, é possível inferir que para as equações de calibração dos sensores de pH, turbidez e STD o método dos mínimos quadrados ordinários não produziu o Melhor Estimador Linear Não-Viesado, uma vez que pelo menos uma premissa foi não atendida.

É importante ressaltar ainda que, dos medidores avaliados, somente modulo sensor PH4502C o qual possui compensação automática para a temperatura ambiente não proporcionou relaxamento das premissas de heterogeneidade de variância ou ausência de normalidade dos resíduos.

Leal (2012) ressaltou que a temperatura da água é um fator muito importante a ser medido, pois a mesma influencia vários outros parâmetros como o pH, condutividade elétrica etc. Pinto *et al.* (2011) afirmaram que a diferença de potencial gerada entre os eletrodos de indicação e de referência, além de ser função do pH da solução é, também, sensível a mudanças de temperatura. De fato, a temperatura da amostra interfere na leitura de pH, sendo que maior a temperatura o pH também aumenta (PRATAMI *et al.*, 2020). Nessa direção, Pereira (2016) preconizou que para conseguir-se as leituras mais precisas de pH, a temperatura do líquido a ser medido deve ser transmitida ao circuito, através de um sensor de temperatura (PATIL *et al.*, 2015; PEREIRA, 2016). Toledo (2021) explica que para análises mais precisas, o medidor de pH deve ser calibrado pelo menos uma vez por dia ou no início de cada série de medições, pois o eletrodo de vidro não fornece uma força eletromotriz reprodutível durante longos períodos de tempo.

O medidor de pH do presente estudo possui sensor de temperatura para compensação automática integrado ao módulo PH4502C. Porém, a temperatura do líquido não é aferida. Salienta-se que, embora não se tenha mensurado a temperatura das soluções, a sonda multiparamétrica desenvolvida possui suporte para um sensor de temperatura e, assim, efetuar a devida compensação, sendo possível utilizar o DS18B20 para esta finalidade

Com relação as medidas de turbidez, ressalta-se que parte da dispersão temporal das leituras pode ser devida as soluções de água + solo utilizadas para calibração, uma vez que com o depósito do material em suspensão na base do recipiente havia redução da turbidez. Além disso, o fabricante reporta correlação de temperatura com as leituras fornecidas pelo sensor. Gillett e Marchiori (2019) também ressaltaram que após um certo período de uso pode haver necessidade de calibragem periódica.

Em que se refere ao Sólidos Totais Dissolvidos (STD), condutividade dos íons na água depende da temperatura da água (POISSON, 1980). Os íons se movem mais rápido quando a água está quente e, portanto, a condutividade aparente é aumentada quando a água atinge uma temperatura mais alta (RIETMANM *et al.*, 1985).

Os modelos lineares ajustados para os sensores de pH, Turbidez e STD, são expostos pela Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos (\hat{y}) da relação entre os valores de pH, Turbidez e STD com a tensão (x, volts)

Sensor	Equação
pH	$\hat{y} = -22,785 * x + 74,348 *$
Turbidez	$\hat{y} = -436,40 * x + 1811,4 *$
STD	$\hat{y} = 604,89 * x - 339,79 *$

* Significativo a 5% pelo teste t para os coeficientes angulares (“b”) e interceptos (“a”).

Fonte: elaborado pelo autor.

As estatísticas do teste t de significância para os coeficientes angulares (“b”) e interceptos (“a”) das regressões para todos os sensores podem ser consultadas pela Tabela 4.

Tabela 4 - Estatísticas do teste t de significância para os coeficientes ‘b’ e ‘a’

Sensor	Estatística teste t de Student	
	a	b
pH	29,1250*	-26,1044*
Turbidez	43,7981*	-34,9831*
STD	-3,4783*	11,8405*

* Significativo a 5%.

Fonte: elaborado pelo autor.

As medidas de desempenho raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c), para os ajustes dos sensores de pH, turbidez e STD são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Estatísticas de desempenho dos modelos, raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c)

Sensor	REQM	R^2	r	d	c	Desempenho
pH	1,1750	0,9342	0,9665	0,9827	0,95	Ótimo
Turbidez	56,9850	0,9401	0,9696	0,9843	0,95	Ótimo
STD	165,1435	0,8335	0,9130	0,9538	0,87	Ótimo

Fonte: elaborado pelo autor.

As equações de calibração para turbidez e pH apresentaram a maior precisão com desempenho semelhante, conforme coeficiente de determinação (R^2) de 0,9401 e 0,9342, respectivamente. Ao passo que a STD obteve o menor R^2 (0,8335) na estimativa.

Cunha *et al.* (2020) implementaram um sistema integrado (hardware e software) para análise de águas superficiais e encontraram boa precisão nas estimativas de pH com R^2 entre 0,996 e 0,998 quando comparado as leituras com equipamentos disponíveis no mercado. Já Gillett e Marchiori (2019) desenvolveram quatro sensores monitores de turbidez contínua de baixo custo, calibrados na faixa de 0 a 100 NTU, e com os mesmos anexados no exterior de um cano transparente em ângulos de 90 e 180 graus, obtiveram R^2 flutuando entre 0,9934 e 1,0000 para um ajuste linear múltiplo. Já Jorge Junior (2019) para o resultado da calibração do sensor de turbidez SKU modelo SEN0189, observou $R^2 = 0,995$.

Em que concerne ao índice de confiança “ c ”, todos os ajustes ofereceram o mesmo desempenho, classificado como “Ótimo”.

3.3.2 Avaliação da sonda e modelagem fuzzy

Os resultados obtidos para os parâmetros de qualidade de transmissão (BER), eficiência (E_f) e desempenho (lógica fuzzy), para o monitoramento dos dados nas distâncias de 1,0 e 10,0 metros com a tecnologia de comunicação Bluetooth clássico (BT), são exibidos pela Tabela 6. O BT, entre outras, compreende as tecnologias de transferência de curto alcance (LIA; XUB; ZHAO, 2018) em velocidades iniciais de 1mbps a 2mbps, implementando o conceito de multiplexação por divisão de frequência, isto é, adota um esquema de espalhamento espectral

de salto de frequência (do inglês frequency-hopping spread spectrum - FHSS) com intervalo de tempo baseado em técnica de codificação Forward Error Correction (FEC) (CONTI *et al.*, 2003; NIKITHA *et al.*, 2018).

Tabela 6 - Qualidade de transmissão (Bit-Error Rate, BER), eficiência (Ef), tamanho amostral (N) e desempenho para o Bluetooth clássico, durante 8,0 horas de monitoramento e intervalo de 1,0 min de envio

Ensaio	Bluetooth clássico (1 metro)				
	BER	Ef (%)	N	Desempenho	Pertinência
01	0,00	97,50	468	Excelente	1,00
02	0,00	97,92	470	Excelente	1,00
03	0,036	98,12	471	Ruim	1,00
04	0,00	97,29	467	Excelente	1,00
05	0,00411	97,71	469	Boa	0,96
Ensaio	Bluetooth clássico (10 metros)				
	BER	Ef (%)	N	Desempenho	Pertinência
01	$1,00 \times 10^{-3}$	47,71*	229	Ruim	0,67
02	0,00	97,50	468	Excelente	1,00
03	$3,26 \times 10^{-3}$	97,50	468	Boa	0,75
04	0,00	96,87	465	Excelente	1,00
05	0,00	18,96*	91	Ruim	1,00

* Dispositivo desconectado.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para os ensaios 01, 02 e 04, na distância 1,0 metro, não houveram inconsistências nos pacotes enviados (BER = 0,00), somente na eficiência de envio (Ef) e, combinadas, representaram desempenho “Excelente” com pertinência 1,00. No conceito de pertinência, um elemento pertence ao conjunto com um grau de pertinência, isto é, um elemento pode pertencer parcialmente a mais de um conjunto ao mesmo tempo (PESSOA *et al.*, 2020).

Para os ensaios 03 e 05 o padrão IEEE 802.15.1 forneceu bits com ruído, BER de $3,60 \times 10^{-2}$ e $4,11 \times 10^{-3}$, respectivamente. Embora da alta eficiência de transmissão, o teste 03 apresentou classificação “Ruim” (pertinência 1,00) e “Boa” para o 05. Para os testes a 10,0 metros, nos ensaios 02, 04 e 05 não foi constatado perda de informações (BER = 0,00), apenas atraso no envio, com desempenho “Excelente” para o 02 e 04 e “Ruim” para 01 e 05.

Enfatiza-se ainda que houve perda de conexão entre o dispositivo móvel e o módulo Bluetooth, possivelmente associada a distância, uma vez que, segundo o fabricante, o alcance máximo do sinal é de aproximadamente 10,0 metros. Além do mais, é importante ressaltar que foi observado o não envio de dados somente para os ensaios 03 e 01 nas distâncias de 1,0 e 10,0 metros, respectivamente.

Shin (2002) reportou que o acesso irrestrito ao espectro ISM (Industrial, Científica e Médica) expõe os dispositivos Bluetooth a um alto nível de interferência, classificadas em

duas categorias. A primeira atrelada a dispositivos não Bluetooth, como as PANs wireless IEEE 802.15 e HomeRF operam na banda de 2,4 GHz e IEEE 802.11 também nesta banda para LAN wireless. A segunda categoria é devida a outras conexões Bluetooth (autointerferência), uma vez que essas redes adotam topologia ad-hoc chamada de piconet e scatternet que permite muitos dispositivos Bluetooth possam coexistir nas vizinhanças. Assim, caso existam pessoas nas proximidades com uma conexão Bluetooth aberta, pode resultar em interferências.

Com relação as problemáticas associadas a dispositivos não Bluetooth, as falhas observadas durante os testes (Tabela 5) podem ser justificadas pela presença dos módulos HC-06 (IEEE 802.15.1) e ESP-01 (802.11 g/b/n) operando de forma simultânea na mesma placa. De fato, Mathew *et al.* (2010) destacaram que, por operarem na mesma banda ISM de 2,4 GHz, ocorre em interferência mútua, problema já abordado por Conti *et al.* (2003), Golmie *et al.* (2003) e Wel e Yang (2007). Chiasserini e Rao (2003) relataram que influências entre 802.11 e BT ocorrem sempre que a energia de interferência é suficiente para causar uma diminuição da relação sinal-interferência no receptor e as duas transmissões do sistema se sobrepõem tanto na frequência quanto no tempo.

Conti *et al.* (2003) enfatizaram que uma avaliação criteriosa deveria levar em consideração a presença de ruído térmico, impedimentos de propagação, interferências, distância relativa entre os sistemas interferentes, formatos de modulação e técnicas de codificação, bem como saltos de frequência, estruturas de pacotes e cargas de tráfego.

Na Tabela 7 constam os resultados para as leituras nas distâncias de 1,0 e 10,0 metros com a plataforma Wi-Fi (ESP-01) padrão 802.11 g/b/n. Não ocorreram falhas nos pacotes transferidos (BER = 0,00) para todos os ensaios nas duas distâncias. Assim, a distância não teve significado sobre a BER.

Tabela 7 - Qualidade de transmissão (Bit-Error Rate, BER), eficiência (Ef), tamanho amostral (N) e desempenho para o Wi-Fi, durante 8,0 horas de monitoramento e intervalo de 1,0 min de envio.

Ensaio	Wi-Fi (1 metro)				
	BER	Ef (%)	N	Desempenho	Pertinência
01	0,00	95,42	458	Excelente	1,00
02	0,00	97,71	469	Excelente	1,00
03	0,00	98,12	471	Excelente	1,00
04	0,00	96,87	465	Excelente	1,00
05	0,00	97,29	467	Excelente	1,00
Ensaio	Wi-Fi (10 metros)				
	BER	Ef (%)	N	Desempenho	Pertinência
01	0,00	93,33	448	Excelente	1,00
02	0,00	97,50	468	Excelente	1,00
03	0,00	96,66	464	Excelente	1,00

04	0,00	96,87	465	Excelente	1,00
05	0,00	96,66	464	Excelente	1,00

Fonte: elaborado pelo autor.

A Ef, por sua vez, de modo semelhante aos testes com Bluetooth, teve seus resultados influenciados por atrasos na transmissão. Além do mais, manifestou maior magnitude a 1,0 m (98,12%) e menor a 10,0 m. (93,33%). No mais, o sistema de inferência fuzzy aplicado, produziu saída “Excelente” em todos os ensaios e com grau de pertinência 1,00.

Como descrito anteriormente, os padrões Wi-Fi e Bluetooth se influenciam reciprocamente. Porém, o padrão IEEE 802.11 define um meio físico (PHY) e protocolos de camada de controle de acesso médio (MAC) (GOLMIE *et al.*, 2003). Quando um nó que usa IEEE 802.11b como padrão sem fio deseja enviar um pacote pela rede, ele usa o protocolo de detecção de portadora rodando na camada de controle de acesso ao meio (MAC) para determinar se o meio está ocupado ou ocioso e usa seu conhecimento da atividade de 802.11 e BT para prever colisões (CHIASSERINI; RAO, 2003; MATHEW *et al.*, 2010).

Challoo *et al.* (2012) estudaram a interferência entre o Wi-Fi principalmente como um agressor no Bluetooth e ZigBee e concluíram que IEEE 802.15.4 tem um pequeno impacto no desempenho do IEEE 802.11, ao passo que o IEEE 802.11 pode ter grande significado no desempenho do ZigBee e do Bluetooth.

No mais, instabilidades na conexão e atenuação do sinal podem influenciar no desempenho. Estudando as potencialidades e limitações da automação com plataforma de baixo custo, Correia *et al.* (2016) desenvolveram um protótipo para monitoramento e controle automático da irrigação, com acionamento remoto via aplicativo WEB. Os autores relataram que na distância entre o roteador e o módulo de 10 m em linha reta, o sinal sofreu atenuação devido às paredes, móveis e eletrodomésticos dispostos entre os dispositivos.

3.4 Conclusões

As plataformas de baixo custo (hardware) possibilitaram o desenvolvimento da sonda multiparamétrica por um total de US \$42,82.

Na avaliação dos sensores da sonda, observou-se que a calibração experimental deve ser bastante criteriosa pois pode prejudicar inferências estatísticas quanto aos ajustes e, portanto, no monitoramento dos parâmetros de qualidade da água.

O sistema de inferência fuzzy aplicado foi satisfatório e permitiu as avaliações de desempenho de acordo com as condições do estudo proposto, conseguindo captar as distinções

entre os protocolos averiguados, a partir das dos parâmetros de qualidade de transmissão (BER) e eficiência (Ef).

Entre as tecnologias de comunicação suportadas pela sonda, a plataforma para comunicação Wi-Fi (IEEE 802.11 g/b/n), via ESP8266 versão 01, apresentou os melhores desempenhos, comparativamente ao Bluetooth clássico (IEEE 802.15.1) pelo módulo HC-06 V2.0 + EDR.

3.5 Referências

ALLENDE, A.; MONAGHAN, J.; Irrigation Water Quality for Leafy Crops: A Perspective of Risks and Potential Solutions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.12, n.1, p. 7457-7477, 2015.

ANDERSON, G. **Bit-Error-Rate and Capacity Estimation in Wireless Networks**. 2011. 80f. Tese (Doctored of Philosophy) - Drexel University, Philadelphia, 2011.

ARAB, S.; ASHRAFZADEH, H.; ALIDADI, A. Internet of Things: Communication Technologies, Features and Challenges. **International Journal of Engineering Development and Research**, v.6, n.2, p.733-742, 2018.

ARDUINO. ARDUINO NANO. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: 13 maio 2021.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução: GHEYI, R.S.; MEDEIROS, J.F.; DEMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29).

BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v.2, n.2, p.149-162, 1979.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

CHALLOO, R.; OLADEINDE, A.; YILMAZER, N.; OZCELIK, S.; CHALLOO, L. An Overview and Assessment of Wireless Technologies and Coexistence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi Devices. **Procedia Computer Science**, v. 12, p.386 – 391, 2012.

CHIASSERINI, C.F.; RAO, R.R. Coexistence Mechanisms for Interference Mitigation in the 2.4-GHz ISM Band. **IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS**, v.2, n.5, p.964-975, 2003.

CONTI, A.; DARDARI, D.; PASOLINI, G.; ANDRISANO, O. Bluetooth and IEEE 802.11b Coexistence: Analytical Performance Evaluation in Fading Channels. **IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS**, v. 21, n. 2, p.259- 269, 2003.

CORREIA, G.T.; ROCHA, H.R.O.; RISSINO, S.D. Automação de sistema de irrigação com monitoramento via aplicativo web. **Engenharia na agricultura**, v.24, n.4, p.314-325, 2016.

CUNHA, R.A.; SILVA, A.G.; NASCIMENTO, L.D.; LIMA, L.S.; BANDEIRA, M.L.F.S. Polypus: sonda de baixo custo para análise de parâmetros físico-químicos em águas superficiais. **R. gest. sust. ambient.**, v. 9, n. 4, p. 653-671, 2020.

EMBARCADERO. **Using Bluetooth**. Disponível:

http://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Rio/en/Using_Bluetooth. Acesso em: 25 set. 2020.

FAUSTINE, A.; MVUMA, A.N.; MONGI, H.J.; GABRIEL, M.C.; TENGE, A.J.; KUCCEL, S.B. Wireless sensor networks for water quality monitoring and control within lake victoria basin: Prototype development. **Wireless Sensor Network**, v. 6, n. 12, p.281-289, 2014.

FIGUEIREDO FILHO, D.; NUNES, F.; ROCHA, E.C.; SANTOS, M.L.; BATISTA, M. SILVA JÚNIOR, J.A. O que Fazer e o que Não Fazer com a Regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). **Revista Política Hoje**, v. 20, n. 1, p.44 – 99, 2011.

GARCÍA, L.; PARRA, L.; JIMENEZ, J.M.; LLORET, J.; LORENZ, P. IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. **Sensors**, v.20, n.1042, p.1-48, 2020.

GILLETT, D.; MARCHIORI, A. A Low-Cost Continuous Turbidity Monitor. **Sensors**, v.19, n.14, p.2-18, 2019.

GOLMIE, N.; VAN DYCK, R.E.; SOLTANIAN, A.; TONNERRE, A.; RÉBALA, O. Interference Evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b Systems. **Wireless Networks**, v.9, p.201–211, 2003.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques**. 3. ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, p.770, 2011.

JORGE JUNIOR, J.A. Desenvolvimento de sonda multiparâmetro dinâmica de qualidade de água (sonda aqua-x). 2019. 59p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, 2019.

KUMAR, G.R.; GOPAL, T.V.; SRIDHAR, V.; NAGENDRA, G.N. SMART IRRIGATION SYSTEM. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v.119, n. 15, p.1155-1168, 2018.

KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; NETER, J.; LI, W. **Applied linear statistical models**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 1396p.

LEAL JUNIOR, W.B. **Modelagem de um sistema multiparâmetro para monitoramento da qualidade da água utilizando internet das coisas**. 2019. 69f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, 2019.

LEAL, D.C.M. **Plataforma de Aquisição de Dados para Monitoramento Ambiental de Reservatórios Hídricos**. 2012. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

LEWIS-BECK, C.; LEWIS-BECK, M.S. **Applied Regression: an introduction**. Series (Quantitative Applications in the Social Sciences). 2.ed. eBook Kindle: SAGE, 2015. 115p.

LIA, S.; XUB, L.D.; ZHAO, S. 5G Internet of Things: A Survey. **Journal of Industrial Information Integration**, v.10, p.1-9, 2018.

LIMA, E.L. **Módulo de sensores para monitoramento da qualidade da água com transmissão sem fio utilizando plataforma de prototipagem**. 2018. 79f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2018.

MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S. A review of wireless communications for smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, n.1, p.248-260, 2015.

MAMDANI, E.H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proc. IEE*, v.121, n.12, p.1585-1588, 1973.

MATHEW, A.; CHANDRABABU, N.; ELLEITHY, K.; RIZVI, S. INTERFERENCE OF 802.11B WLAN AND BLUETOOTH: ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION. **International journal of Computer Networks & Communications**, v.2, n.3, p.140-150, 2010.

MENDONÇA, A.M.; FORGIARINI, F.R.; SILVEIRA, G.L.; CRUZ, J.C. Confiabilidade dos parâmetros monitorados em águas por sonda multiparâmetros. **REGA**, v.14, n.3, p.1-11, 2017.

MOUSA, A.K.; CROOCK, M.S.; ABDULLAH, M.N. Fuzzy based Decision Support Model for Irrigation System Management. **International Journal of Computer Applications**, v.104, n.9, p.0975 – 8887, 2014.

NIKITHA, S.; NANDHINI, T.; PAVITHRA, K.; KINOL, A.M.J. A BLUETOOTH BASED AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v.05, n.03, p.587-590, 2018.

OGIDAN, O.K.; ONILE, A.E.; ADEGBORO, O.G. Smart Irrigation System: A Water Management Procedure. **Agricultural Sciences**, v.10, n.1, p.25-31, 2019.

PANDIT, A.P.; CHAVAN, S.A.; BDGAR, P.V.; SANAP, V.R.; PAWAR, M.D. IOT based Smart Irrigation System. **IJARIE**, v.5, n.3, p.1025-1031, 2019.

PATIL, K.; PATIL, S.; PATIL, S.; PATIL, V. Monitoring of Turbidity, PH & Temperature of Water Based on GSM. **INTERNATIONAL JOURNAL FOR RESEARCH IN EMERGING SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v.2, n.3, p.16-21, 2015.

PEREIRA, B.D.A. **Medidor de pH com calibração de pH e compensação automática de temperatura**. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2016.

- PESSOA, M.A.R.; SOUZA, F.J.; DOMINGOS, P.; AZEVEDO, J.P.S. Índice fuzzy de qualidade de água para ambiente lótico — IQAFAL. **Eng Sanit Ambient**, v.25, n.1, p.21-30, 2020.
- PIÑEIRO DI BLASI, J. I.; MARTÍNEZ TORRES, J.; GARCÍA NIETO, P. J.; ALONSO FERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ MUÑIZ, C.; TABOADA, J. Analysis and detection of outliers in water quality parameters from different automated monitoring stations in the Miño river basin (NW Spain). **Ecological Engineering**, v.60, p. 60–66, 2013.
- PINTO, M. F.; CAMARGO, A.P.; ALMEIDA, A.C.S.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.211–217, 2011.
- POISSON, A. Conductivity/salinity/temperature relationship of diluted and concentrated standard seawater. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.5, n.1, p.41-50, 1980.
- PRATAMI, L.W.D.; ARISWATI, H.G.; TITISARI, D. Effect of Temperature on pH Meter Based on Arduino Uno With Internal Calibration. **Journal of Electronics, Electromedical, and Medical Informatics**, v.2, n.1, p.23-27, 2020.
- RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S. Comparação de elementos filtrantes no grau de obstrução em irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.3, p.488-500, 2013.
- RIETMANM, A.; KAPLAN, M.L.; CAVA, R.J. Lithium ion-poly (ethylene oxide) complexes. I. Effect of anion on conductivity. **Solid State Ionics**, v.17, n.1, p.67-73, 1985.
- SÁ, Y.V.A.; WEN, T.C. A Inteligência Artificial (Lógica Fuzzy) para cálculo de estoque de segurança local em empresas multinacionais. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v.14, n.4, p.1-10, 2019.
- SHIN, S.Y. Performance Evaluation of Interference Between Bluetooth Networks using Bit Error Rate. *In: Winter Workshop*, 15., 2002, Kushu. **Anais...** 2002, 6p.
- SILVA, L. P.; SILVA, M. M.; CORREA, M. M.; SOUZA, F. C. D.; SILVA, E. F. F. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.480-486, 2012.
- SINGH, S.K.; BHAROSE, R.; NEMČÍČ-JUREC, J.; RAWAT, K.S.; SINGH, D. Irrigation water quality appraisal using statistical methods and WATEQ4F geochemical model. *In: SRIVASTAVA, P.K.; GUPTA, M.; TSAKIRIS, G.; QUINN, N.W. Agricultural Water Management: Theories and Practices*. Bristol: Academic Press, 2021, p.101-138.
- TOLEDO, M. **A Guide to pH Measurement - the theory and practice of laboratory pH applications**. Disponível em: https://www.mt.com/dam/LabDiv/NVC/xpage/downloads/ph-theory-guide/ph_theory_guide_EN.pdf. Acesso em: 14 maio 2021.
- TOUATI, F.; AL-HITMI, M.; BENHMED, K.; TABISH, R. A fuzzy logic-based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.98, p. 233-241, 2013.

TYAGI, A.; NAVANI, J.P.; GUPTA, N. TIWARI, R.; GUPTA, A. Smart Irrigation System. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v.3, n.10, p.9-12, 2017.

UNGUREANU, F.; LUPU, R.G.; STAN, A.; CRACIUN, I.; TEODOSIU, C. Towards real time monitoring of water quality in river basins. **Environmental Engineering and Management**, v.9, n.9, p.1267-1274, 2010.

UNIPOWER. **Bateria-12v**. Disponível em: <https://unipower.com.br/wp-content/uploads/2017/09/UP1213-3-450x450.jpg>. Acesso em: 20 maio 2021.

VERONEZ, A.C.C.S.; SANTO, A.F.; SOUZA, C.C.; REIS NETO, J.F. Classificação de Frutas e Legumes Utilizando Lógica Fuzzy. **Rev. Cienc. Gerenc.**, v. 23, n. 37, p. 52-56, 2019.

WEL, J.; YAN, M. Bit error rate analysis of Wi-Fi and bluetooth under the interference of 2.45 GHz RFID. **THE JOURNAL OF CHINA UNIVERSITIES OF POSTS AND TELECOMMUNICATIONS**, v. 14, n.1, p.89-93, 2007.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WIN, T.T.N.; BOGAARD, T.; GIESEN, N.V. A Low-Cost Water Quality Monitoring System for the Ayeyarwady River in Myanmar Using a Participatory Approach. **Water**, v.11, n.10: p.1-16, 2019.

ZAFAR, S.; MIRAJ, G.; BALOCH, R.; MURTAZA, D.; ARSHAD, K. An IoT Based Real-Time Environmental Monitoring System Using Arduino and Cloud Service. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v.8, n.4, p. 3238-3242, 2018.

4 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS NA PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS DE TELA PARA IRRIGAÇÃO

RESUMO

A implementação criteriosa do sistema de filtragem é indispensável na manutenção do funcionamento do sistema de irrigação. Objetivou-se realizar a modelagem da pressão para retrolavagem em função da qualidade da água e da carga de pressão de entrada em filtros, via redes neurais artificiais. O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. Utilizou-se sensor de pH (potencial hidrogeniônico), sensor de turbidez, sensor de sólidos totais dissolvidos (STD) e sensor de temperatura para aferir as características da água. Utilizou-se sensor transdutor de pressão para quantificação da perda de carga e necessidade de limpeza dos filtros. Para predição da necessidade de limpeza dos filtros para irrigação, construiu-se uma estrutura hidráulica com sistema de filtragem do tipo tela com número de malha (mesh) de 120 e limpeza mediante retrolavagem. A necessidade de limpeza estimada pelas redes neurais artificiais do tipo multilayer perceptron feedforward com arquitetura 2-4-1, apresentaram bom desempenho na modelagem da evolução temporal da carga de pressão no sistema de filtragem de tela (120 mesh). Já o ajuste da carga de pressão a partir das características de qualidade da água pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura, teve baixo desempenho.

Palavras-chave: arduino; sensores; limpeza; carga de pressão; multilayer perceptron.

ABSTRACT

The careful implementation of the filtration system is essential to maintain the functioning of the irrigation system. The objective was to perform the pressure modeling for backwash as a function of water quality and inlet pressure load in filters, via artificial neural networks. The experiment was conducted at the Hydraulics and Irrigation Laboratory of the Federal University of Ceará, Fortaleza – CE. A pH sensor (hydrogen ionic potential), turbidity sensor, total dissolved solids sensor (STD) and temperature sensor were used to measure the water characteristics. A pressure transducer sensor was used to quantify the head loss and the need to clean the filters. To predict the need for cleaning the filters for irrigation, a hydraulic structure

was built with a screen-type filtering system with a mesh number of 120 and cleaning by backwashing. Feedforward multilayer perceptron artificial neural networks with 2-4-1 architecture presented good performance in modeling the temporal evolution of pressure load in the screen filtering system (120 mesh). On the other hand, the pressure load adjustment based on the water quality characteristics pH, turbidity, total dissolved solids and temperature, had poor performance.

Keywords: arduino; sensors; cleaning; pressure head; multilayer perceptron.

4.1 Introdução

As obstruções ocorridas em partes constituintes de sistemas de irrigação podem prejudicar o fluxo de água e a sua distribuição ao longo da linha principal, de derivação e principalmente nas laterais, reduzindo, por conseguinte a eficiência do sistema (RIBEIRO, 2008).

A dissolução da problemática de obstrução é ainda mais pertinente devido ao aumento da escassez de água de boa qualidade para fins de irrigação, necessitando-se de alternativas tecnológicas que viabilizem a utilização de água de baixa qualidade (LEMOS FILHO *et al.*, 2011).

Moura, Hernandez e Vanzela (2007) destacaram que o entupimento dos emissores, além de relacionado a qualidade da água, é influenciado pela eficiência do sistema de filtragem. O filtro de tela é o mais utilizado em sistemas de filtragem para irrigação localizada (SOCCOL, 2003). Onde são apropriados, os filtros de tela se constituem num meio simples e eficiente de filtragem da água (KELLER; BLIESNER, 1990). No entanto, a obstrução desses filtros é mais rápida que nos de areia, por essa razão a limpeza é mais frequente (OLIVEIRA, 2005).

A limpeza pode ser realizada automaticamente quando as obstruções ocasionam uma determinada perda de carga. Os filtros com limpeza automática (retrolavagem) são mais efetivos, sendo a limpeza promovida com inversão do fluxo de água através da tela, isto é, de dentro para fora do filtro (RODRIGUES, 2006).

No procedimento de retrolavagem automática de um filtro de tela, monitora-se a pressão na entrada e na saída do filtro e através do diferencial de pressão são programados o acionamento de válvulas solenoides promovendo a limpeza. Quando o filtro está limpo, a perda de carga é da ordem de 1 a 3 m.c.a, quando obstruído atinge valores da ordem de 4 a 6 m.c.a,

devendo-se proceder a limpeza (CABELLO, 1996). Para valores superiores a estes, a eficiência de filtração diminui e poderá, até mesmo, ocorrer rompimento do elemento filtrante (OLIVEIRA, 2005). O tempo necessário para se atingir esses valores depende da qualidade de água, vazão de filtração e da espessura da camada filtrante (TESTEZLAF, 2008).

Assim sendo, por meio do monitoramento da qualidade da água, de parâmetros do escoamento sob pressão e das características construtivas do elemento filtrante, pode-se modelar a perda de pressão e subsidiar a definição de patamares ótimos de manutenção. Nesse aspecto, pode ser satisfatória a inferência a partir de algoritmos computacionais, como de redes neurais artificiais. Essas redes possuem arquiteturas variáveis, em termos de números de camadas e parâmetros de entradas e como são feitas as conexões entre estas, tornando-as aplicáveis em diversas situações.

Com o uso de redes neurais é possível prever o melhor momento para a realização da retrolavagem, com base no monitoramento da qualidade da água e a perda de cargas nos filtros. Dessa forma, objetivou-se realizar a modelagem da pressão para retrolavagem em função da qualidade da água e da carga de pressão de entrada em filtros, via redes neurais artificiais.

4.2 Material e métodos

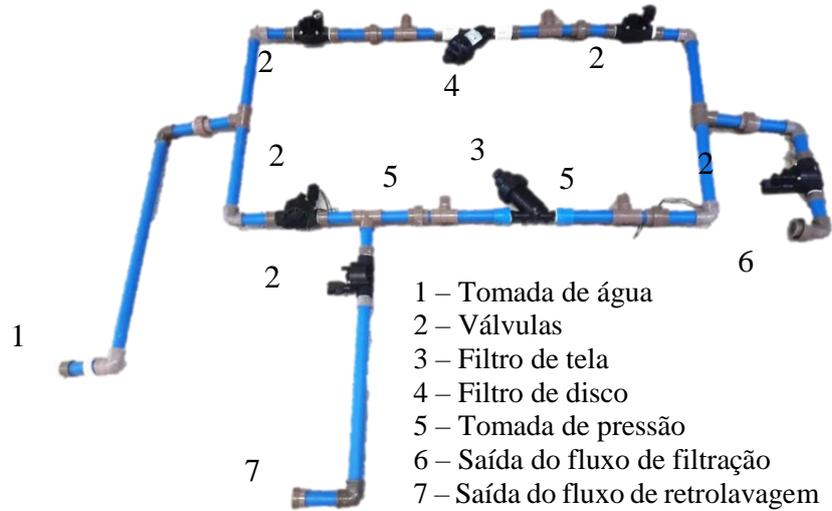
4.2.1 Local e data de desenvolvimento

A pesquisa foi conduzida em área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Campus de Fortaleza – CE, no período de outubro de 2020 a junho de 2021.

4.2.2 Estrutura hidráulica

A estrutura hidráulica construída para avaliação do sistema de filtração pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 - Estrutura hidráulica para filtração e retrolavagem



Fonte: elaborado pelo autor.

O sistema era composto por tubulações de 32 mm de diâmetro, um filtro de tela de 120 mesh (1”), um filtro de disco de 120 mesh (1”) e duas formas de operação: filtração e retrolavagem. Na filtragem o fluxo se dava através do filtro de tela. Ao passo que no processo de limpeza automática, a vazão de filtração se dava no filtro de disco, sendo que havia inversão no sentido do fluxo através da tela. O filtro de disco Irritec, possuía rosca 1 polegada, vazão nominal máxima $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, pressão nominal máxima 8 bar e área filtrante de 100 cm^2 (Figura 15).

Figura 15 - Filtro de disco 120 mesh 1”

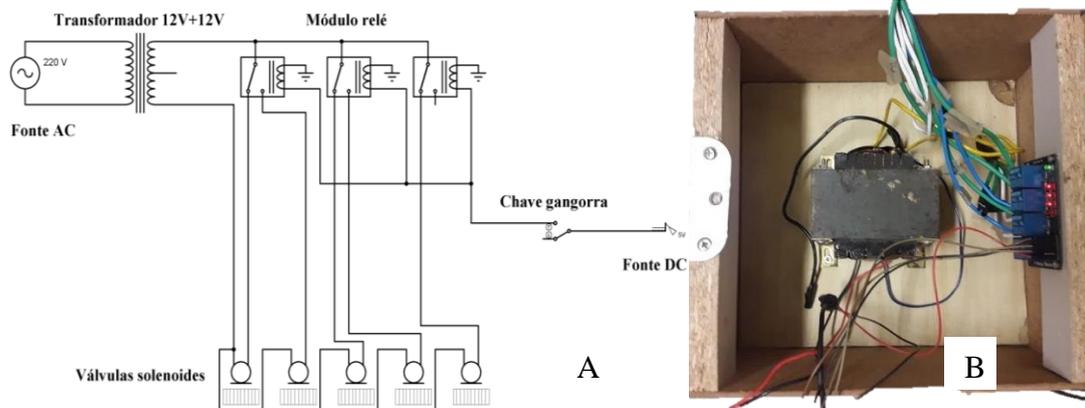


Fonte: elaborado pelo autor.

As formas de operação do sistema era regulada por intermedio de cinco válvulas elétricas de 1" HV 24,0 vac Rain bird. Para tanto, foi montado um modulo de controle (Figura

16) constituído de um transformador 5A 12+12 vac, um módulo relé 3 canais 5v 10a e uma chave gangorra com 3 terminais.

Figura 16 - Módulo de controle de válvulas de fluxo de filtração e retrolavagem: (A) esquemático; e (B) montado



Fonte: elaborado pelo autor.

Para controle da vazão de filtração inicial, a estrutura foi montada sobre um sistema dotado de medidor parshall parcialmente visualizado pelas Figuras 17 e 18.

Figura 17 - Medidor de vazão tipo parshall



Fonte: elaborado pelo autor.

Para controle da vazão de filtração inicial, a estrutura foi montada sobre um sistema dotado de medidor parshall. A sucção era dada a partir de um reservatório de 512 L de capacidade. Assim, quando da filtração, o fluxo se dava da sucção até o sistema hidráulico de filtragem e retornava ao reservatório através do medidor parshall. Ao passo que na retrolavagem o retorno se dava por tubulação específica (Figura 18).

Figura 18 - Retorno do fluxo de retrolavagem

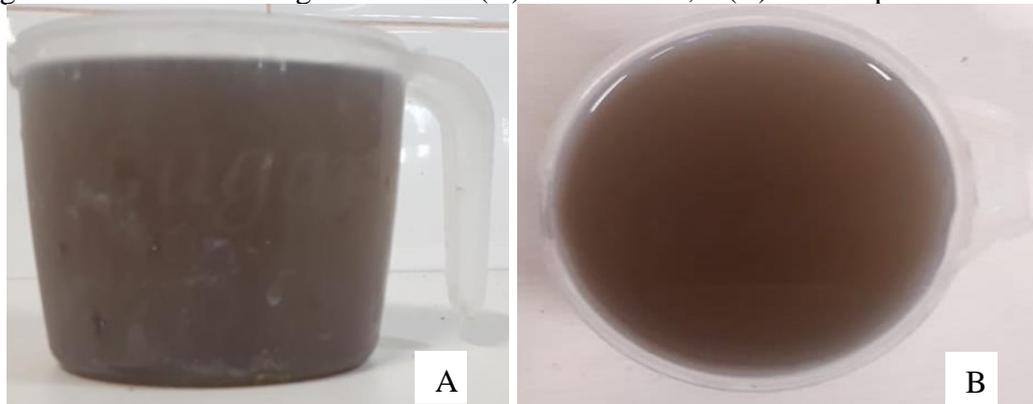


Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.3 Qualidade física da água

Para obtenção de água com qualidade inferior, optou-se por aumentar o seu conteúdo de matéria orgânica com Humus de Minhoca. A proporção utilização foi de 500 g para 264 L de água ($1,89 \text{ g L}^{-1}$). A Figura 19 (A e B) mostra a solução obtida.

Figura 19 - Amostra da água utilizada: (A) Vista lateral; e (B) vista superior



Fonte: elaborado pelo autor.

Durante os testes com filtração, a qualidade da água era mensurada cada cinco segundos por meio da sonda multiparamétrica de baixo custo (Figura 4, A e B) adicionada de sensor de temperatura da água DS18B20, que possui tensão de operação de 3 a 5,5V; faixa de medição de temperatura $-55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+125 \text{ }^{\circ}\text{C}$; precisão: $\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+85 \text{ }^{\circ}\text{C}$; e cabo de 108 cm de comprimento (Figura 20).

Figura 20 - Sensor de temperatura DS18B20



Fonte: elaborado pelo autor.

Deste modo, as características registradas foram: pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura. Os dados eram enviados para o Webservice (DT04) e visualizados em tempo real por smartphone (Figura 21).

Figura 21 - Acompanhamento em tempo real da qualidade da água



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.4 Avaliação da necessidade de limpeza

Para avaliação da necessidade de limpeza e, posteriormente, da modelagem da perda de carga, a operação de retrolavagem foi aplicada somente para o filtro de tela Irritec, com tela inox de 120 mesh, rosca 1 polegada, vazão nominal máxima $5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, pressão nominal máxima 8 bar e área filtrante de 100 cm^2 (Figura 22).

Figura 22 - Filtro de tela 120 mesh para retrolavagem



Fonte: elaborado pelo autor.

Para definição do ponto de retrolavagem, foram instalados sensores transdutores de pressão (Figura 23) na entrada e saída do ponto de acoplamento do filtro. Segundo o fabricante, o sensor apresenta as seguintes especificações: tensão de operação de 5 Vdc, corrente máxima de 30 mA, saída analógica de 0,5 a 4,5 Vdc, temperatura de operação de -40 a 100 °C e pressão de ruptura 3 vezes o limite superior. A faixa de medição é de 0,0~0,40 a 6,0 bar.

Figura 23 - Sensor transdutor de pressão



Fonte: elaborado pelo autor.

A perda de carga é dada pela diferença entre as leituras dos dois sensores. No entanto, verificou-se que a pressão manométrica na saída do filtro estava muito próxima a zero, para as vazões avaliadas, logo não era possível atribuir a variação dos valores observados no sensor (conforme limite inferior da faixa de medição), à pressão no extremo do filtro (Figura 24). Ressalta-se que tal fenômeno pode estar associado a posição da saída do fluxo de filtração a qual estava muito próxima do filtro e aberta para a atmosfera.

Figura 24 - Aferição da pressão manométrica na saída do filtro



Fonte: elaborado pelo autor.

Assim sendo, o monitoramento da pressão se restringiu a entrada do filtro. Com vista a segurança, juntamente ao sensor transdutor de pressão existia um Manômetro de glicerina 0 a 6 bar (Figura 25).

Figura 25 - Filtro de tela de 120 mesh com tomada de pressão manométrica



Fonte: elaborado pelo autor.

De todo modo, era acionada a retrolavagem após um incremento de 6 m.c.a da pressão mensurada do início da filtração. As vazões de filtração, bem como de limpeza, avaliadas foram: 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹. Sendo que para estas, o tempo de operação em retrolavagem foi fixado em 1,0 minuto.

Em cada vazão era contabilizada o aumento de pressão na entrada do filtro, assim como as características de qualidade da água (pH, turbidez, STD e temperatura) do reservatório

e enviados para o Webservice, em canais diferentes, a cada cinco segundos. Uma vez que a plataforma registra a data de inclusão dos dados, foi possível contabilizar o tempo necessário para atingir a pressão de retrolavagem. Deste modo, a partir da carga de pressão na entrada do filtro foi modelado o tempo de limpeza. Já a partir das características de qualidade da água era buscado o valor da pressão na entrada do filtro, acompanhado do tempo na respectiva carga hidráulica.

4.2.5 Calibração do sensor transdutor de pressão

A calibração foi realizada em escala de metros de coluna de água (m.c.a) no intervalo de 0,0 a 30,0 m.c.a. Para tal, construiu-se uma estrutura que contém o sensor e um manômetro aferido (Figura 26). O manômetro padrão tinha a escala de 0 a 4 kgf cm^{-2} em intervalos de 0,02 kgf cm^{-2} e foi previamente aferido no LAMETRO, UFC.

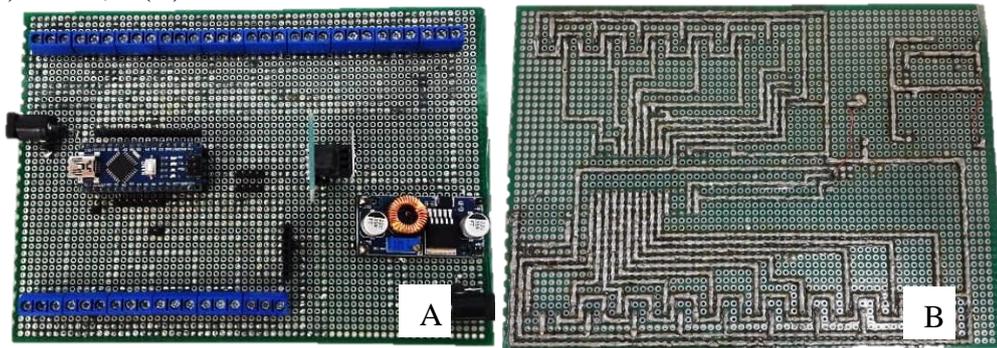
Figura 26 - Estrutura hidráulica para calibração



Fonte: elaborado pelo autor.

As pressões foram aferidas de 0,0 a 3 kgf cm^{-2} (30,0 m.c.a) com variações de 0,01 kgf cm^{-2} (1,0 m.c.a). Eram mensurados dez valores repetidos, em número digital na resolução de 10 bits (0 a 1023) para uma mesma pressão. Também foi utilizado o Webservice DT04 para armazenamento dos dados, os quais eram transferidos a cada cinco segundos. Para calibração do sensor, bem como do monitoramento de pressão durante o estudo, construiu-se uma placa impressa baseada na plataforma Arduino modelo Nano, conforme Figura 27.

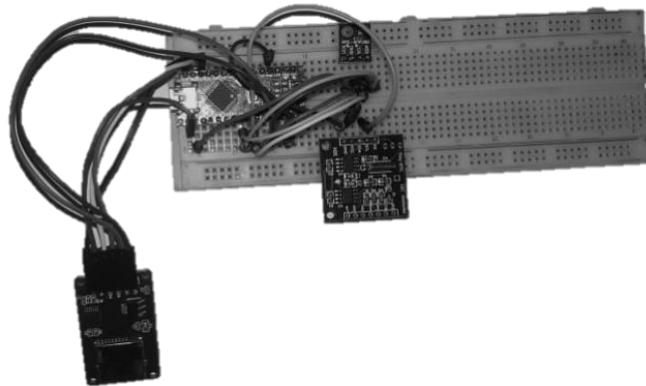
Figura 27 - Placa utilizada durante todos os ensaios com o sensor transdutor de pressão: (A) frente; e (B) verso



Fonte: elaborado pelo autor.

Concomitantemente, era registrada a temperatura da água pelo sensor DS18B20. A pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar pelo sensor BME280. As condições do ar ambiente foram registradas por um *data logger* constituído do Arduino Nano, BME280, módulo micro SD Card e RTC DS1307 (Figura 28).

Figura 28 - Data logger para condições atmosféricas



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a equação de calibração do sensor, o modelo de regressão linear simples foi escolhido, cujos coeficientes foram estimados pelo método dos mínimos quadrados ordinários (do inglês Ordinary Least Squares, OLS). A significância do modelo de regressão se deu pelo teste t de Student para o coeficiente angular (b) e linear (a), a 5% de probabilidade.

Para a avaliação do desempenho estatístico dos modelos, empregou-se os indicadores de raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância (d) de Willmott *et al.* (1985) e o índice de confiança ou desempenho (c). O índice de confiança (c), foi classificado de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

4.2.6 Caracterização das condições experimentais

Após a calibração do sensor transdutor de pressão, realizou-se uma caracterização das condições experimentais. Para tanto, foram mensuradas as cargas de pressão na saída da bomba e na entrada do filtro de tela, para as vazões de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹. As médias das pressões de saída da bomba, a pressão atmosférica local (Patm), temperatura do ar (Tar), temperatura da água (°C), umidade relativa (%) e tamanho amostral (n), para as vazões supracitadas, são apresentadas pela Tabela 8.

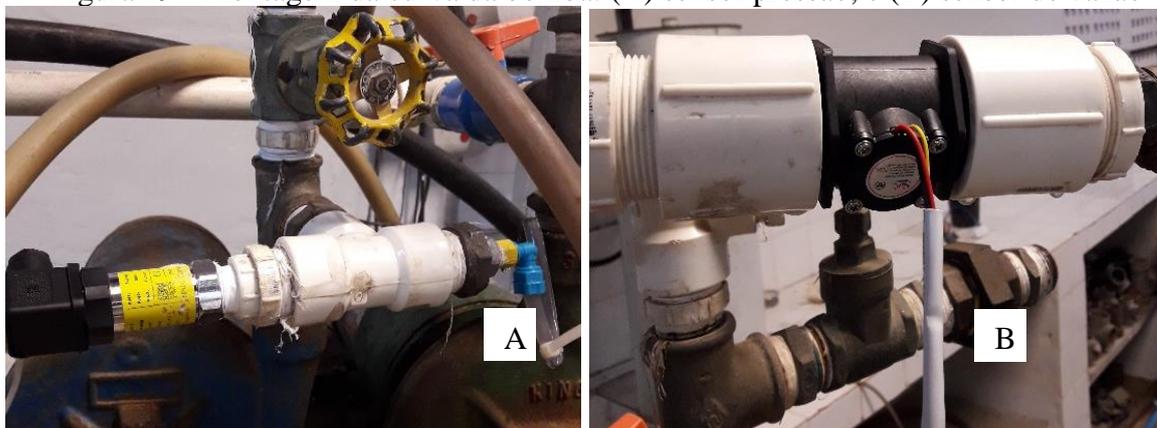
Tabela 8 - Pressão de saída da bomba, carga de pressão no filtro de tela, pressão atmosférica local (Patm), temperatura do ar (Tar), temperatura da água (°C), umidade relativa (%) e tamanho amostral (n)

Variável	Vazão (m ³ h ⁻¹)			
	1,5	2,0	2,5	3,0
Carga pressão saída (mca)	21,55±0,262	20,49±0,382	19,06±0,225	18,12±0,428
Carga de pressão filtro (mca)	3,28±0,0368	4,27±0,0196	5,04±0,0225	5,65±0,0386
Tágua (°C)	26,29±0,009	26,39±0,009	26,50±0,000	26,63±0,000
Patm (hPa)	1010,38±0,005	1010,42±0,009	1010,38±0,006	1010,31±0,006
Tar (°C)	31,68±0,003	31,87±0,007	32,03±0,002	32,04±0,002
Ur (%)	44,15±0,029	43,38±0,035	42,07±0,036	41,96±0,024
n	10	10	10	10

Fonte: elaborado pelo autor.

Também foi realizada a curva característica da bomba pressão versus vazão. Para tanto, o sensor transdutor de pressão foi instalado na saída da bomba (Figura 29A) e um sensor de vazão YF - DN40 (Figura 29B).

Figura 29 - Montagem da curva da bomba: (A) sensor pressão; e (B) sensor de vazão



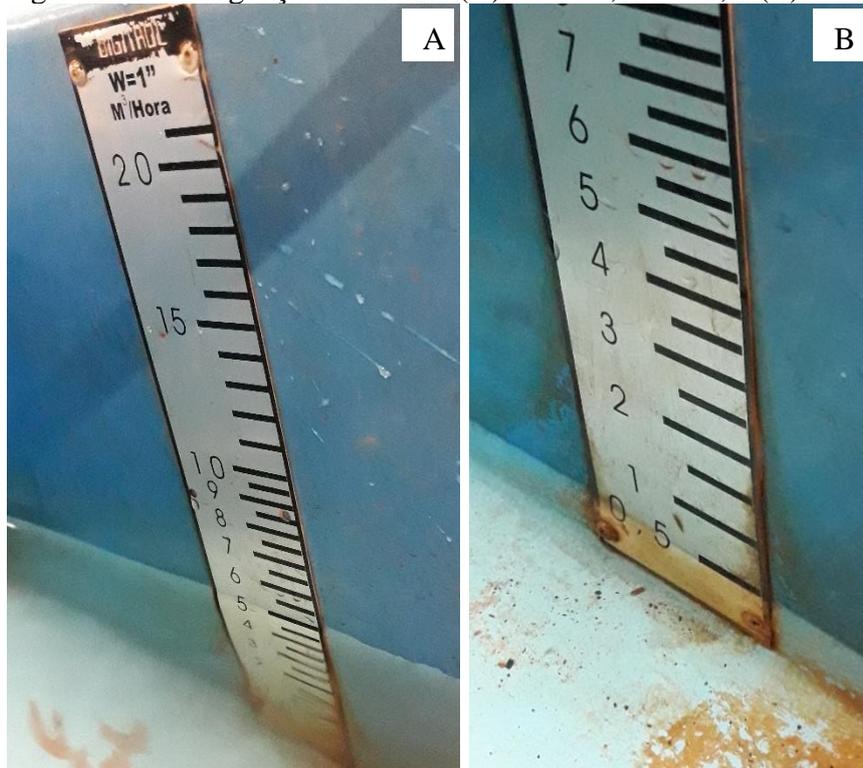
Fonte: elaborado pelo autor.

O sensor de fluxo possuía as seguintes especificações: intervalo de medição de 5 a 150 L min⁻¹, tensão de funcionamento dc 5 a 24 V, temperatura de trabalho -25 a + 80 °C, pressão máxima de trabalho 1,75 MPa e diâmetro 1 1/2". Tendo a seguinte relação entre frequência (f, Hz) e vazão (q, L min⁻¹): $f = 0,45q$.

No sentido de somente averiguar o desempenho na estimativa de vazão, pelo sensor, foi comparado o valor indicado pelo mesmo àquele do medidor parshall, para o fluxo máximo e mínimo conseguidos durante a construção da curva da bomba.

A vazão inferior ficou em torno de 0,5 m³ h⁻¹ e superior 5,0 m³ h⁻¹, conforme observou-se no medidor parshall Figura 30A e 30B, respectivamente. Para os mesmos valores, o sensor indicava o valor médio (de 10 vazões) de 6,67 L min⁻¹ (0,40 m³ h⁻¹) e 86,22 L min⁻¹ (5,17 m³ h⁻¹). Portanto, constatou-se boa precisão para medições no intervalo avaliado.

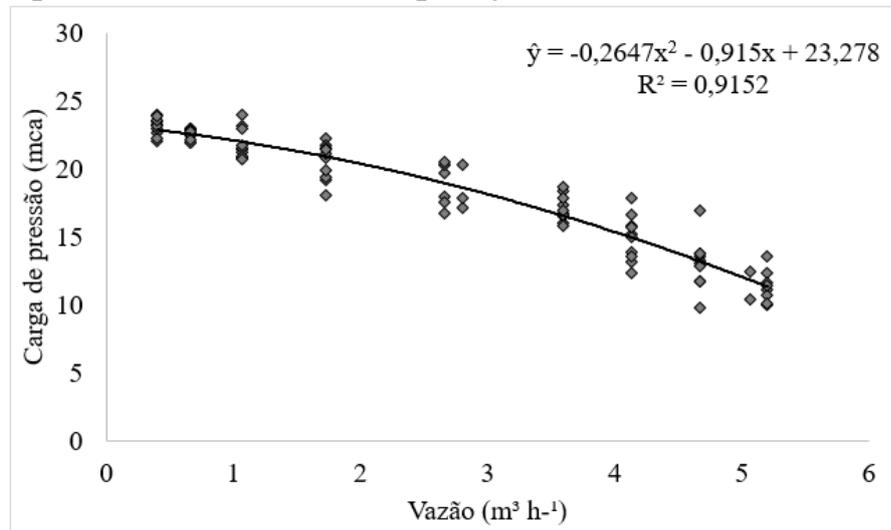
Figura 30 - Averiguação de vazão: (A) vazão 5,0 m³ h⁻¹; e (B) vazão 0,50 m³ h⁻¹



Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de carga de pressão e vazão eram enviados ao Webservice a cada cinco segundos. O modelo obtido é apresentado pela Figura 31.

Figura 31 - Curva da bomba carga de pressão versus vazão



Fonte: elaborado pelo autor.

As condições atmosféricas e da água também foram aferidas e podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Pressão atmosférica local (Patm), temperatura do ar (Tar), temperatura da água (°C), umidade relativa (%) e tamanho amostral (n)

Estatística	Variável			
	Patm (hPa)	Tar (°C)	Tágua (°C)	Ur(%)
Média	1008,82±0,0052	29,44±0,014	26,51±0,013	59,64±0,094
Mínimo	1008,68	29,22	26,25	58,67
Máximo	1008,90	29,74	26,69	62,66
C.V(%)	0,0048	0,44	0,48	1,50
n	90	90	90	90

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.7 Ajuste perceptron de múltiplas camadas

Após a realização dos ensaios, para cada vazão, obtendo-se o conjunto de dados contendo a variação da carga de pressão na entrada do filtro, ao longo do tempo, assim como as condições de qualidade de água, foram realizadas previsões com a rede neural artificial perceptron de múltiplas camadas (MLP - do inglês multilayer perceptron) com uma camada oculta.

Foram ajustados os modelos de previsão para estabelecimento do tempo de limpeza em cada vazão de filtração a partir das variáveis carga de pressão na entrada (variável dependente) e tempo de filtração (variável independente).

Ao passo que também se realizou o ajuste com as características de qualidade da água. Assim, considerou-se como variável independente (predita) a pressão na entrada do filtro e o tempo acumulado até atingir tal pressão (segundos) e 4 variáveis de entrada (independentes): pH, turbidez, STD e temperatura. À exceção da temperatura, optou-se por usar as leituras tomadas pelos sensores de qualidade de água em unidades de tensão (Volt).

Além disso, objetivando remover qualquer correlação, bem como a redução da dimensionalidade das variáveis de entrada, com menor perda possível de informação, executou-se um ajuste por meio da transformação por componentes principais. Para a determinação do número de componentes, observou-se aqueles que tinham autovalores > 1 ($\lambda > 1$) (FRAGA, *et al.*, 2015), bem como a porcentagem de explicação, isto, cerca de 80% da variação total (JOHNSON; WICHERN, 1998). Também foi considerado o critério adotado por Jolliffe (1972, 1973) que sugere descartar componentes cuja variância é inferior a 0,7.

Com relação a rede MLP feedforward para estimativa do tempo de limpeza (carga de pressão x tempo), a arquitetura escolhida possuía uma camada de entrada com dimensão $p = 2$ (1 mais o termo de bias), uma camada escondida com q neurônios e uma camada de saída com $m = 1$ neurônio. Já a MLP feedforward para as características de qualidade de água, a arquitetura possuía uma camada de entrada com dimensão $p = 5$ (4 mais o termo de bias), uma camada escondida com q neurônios e uma camada de saída com $m = 2$ neurônios. Para a MLP com os dados transformados via componentes principais, a camada de entrada tinha dimensão $p = 3$ (2 mais o termo de bias), q neurônios ocultos e $m = 2$ neurônios.

O número de neurônios ocultos é determinado, empiricamente, por tentativa e erro. Uma quantidade pequena de neurônios pode ser insuficiente para a rede aprender os padrões existentes nos dados (underfitting), ao passo que com um alto valor a rede pode memorizar o conjunto de treinamento em detrimento da capacidade de generalização (overfitting). Para contornar o problema, pode ser aplicado o algoritmo de validação cruzada (cross validation), onde uma medida de erro sobre um conjunto de dados de validação (teste) é usada para estimar os parâmetros durante a fase de treinamento (ANOCHI, 2015).

O critério de erro de treinamento (Etrain) fornece uma indicação quantitativa do nível de treinamento da rede e o erro de generalização (Egen) refere-se à capacidade da rede identificar e responder padrões semelhantes baseado no conhecimento aprendido (ANOCHI, 2015). O Erro Quadrático Médio (EQM) é a métrica usada nestes dois critérios (Etrain e Egen), descrita na Equação 5.

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (d - \hat{y})^2 \quad (5)$$

Onde: N é número de padrões de treinamento/validação; d a saída desejada (tempo real); e \hat{y} saída produzida pela rede neural (tempo estimado).

A função de ativação logística sigmoide foi a escolhida para todos os neurônios ocultos e a saída linear. Os pesos sinápticos e limiares de ativação (bias) foram ajustados através do algoritmo backpropagation com termo de momento. Mais detalhes sobre topologias e treinamento de redes neurais artificiais podem ser encontrados em Haykin (1999).

Foram realizadas 10 rodadas de treinamento/validação. As amostras de treinamento eram selecionadas aleatoriamente do conjunto na proporção 70% para treino e 30% para validação (hold out), para o ajuste carga de pressão versus tempo. Para o modelo com variáveis de qualidade, a proporção foi 75% para treino e 25% para validação. Para cada grupo das 10 realizações, foram empregadas e armazenadas as métricas para desempenho estatístico e inferências a respeito de underfitting e overfitting (conforme citado mais cedo) nas etapas de treino e teste: Erro Quadrático Médio (EQM) e Coeficiente de Determinação (R^2). Ainda, foram salvos os parâmetros (pesos) para o melhor e pior desempenho.

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Calibração do sensor

O modelo linear ajustado para o sensor transdutor de pressão é exposto pela Equação 6.

$$\hat{y} = 14,909T - 7,0155 \quad (6)$$

Onde T: é a tensão lida pelo sensor em Volts.

O resultado do teste t de significância para os coeficientes angulares (“b”) e interceptos (“a”), as medidas de desempenho raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c), encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Estatísticas do teste t, raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e índice de confiança ou desempenho (c)

Sensor	Estatística t de Student		
	a	b	n
Pressão	-156,71*	530,77*	310
		Desempenho estatístico	

	REQM	R ²	r	d	c	Classificação
	0,2956	0,9989	0,9994	0,9998	0,9992	Ótimo

*Significativo a 5%.

Fonte: elaborado pelo autor.

As variáveis pressão atmosférica (Patm), a temperatura do ar (Tar), a temperatura da água (Tágua), umidade relativa (Ur), com erro padrão associado, e tamanho amostral (n), durante a calibração são apresentadas pela Tabela 11.

Tabela 11 - Pressão atmosférica (Patm), temperatura do ar (Tar), temperatura da água (Tágua), umidade relativa (Ur), erro padrão e tamanho amostral (n)

Estatística	Patm (hPa)	Tar (°C)	Tágua (°C)	Ur (%)
Média	1010,12±0,0159	29,58±0,0353	27,78±0,0208	58,05±0,154
Mínimo	1009,56	28,71	27,19	52,42
Máximo	1009,65	30,80	28,06	62,56
C.V(%)	0,039	2,99	1,32	6,65
n	628	628	310	628

Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2 *Resumo descritivo da qualidade de água*

Um resumo descritivo das leituras, em tensão, aferidas pelos sensores pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos (STD) e temperatura (°C), durante os ensaios de filtração para as vazões de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹; pode ser visualizado pela Tabela 12.

Tabela 12 - Média de tensão pH, turbidez e sólidos totais dissolvidos (STD) para as vazões de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹.

Estatística	Vazão 1,5 m ³ h ⁻¹			
	pH (Volts)	Turbidez (Volts)	STD (Volts)	Tágua (°C)
Média	3,409±0,0029	3,046±0,0009	0,216±0,0008	31,28±0,015
Mínimo	3,203	2,917	0,172	30,63
Máximo	3,549	3,132	0,244	31,81
C.V(%)	2,02	0,69	9,72	1,13
n	546	546	546	546
Estatística	Vazão 2,0 m ³ h ⁻¹			
	pH (Volts)	Turbidez (Volts)	STD (Volts)	Tágua (°C)
Média	2,960±0,0023	2,837±0,0006	0,773±0,0085	31,67±0,027
Mínimo	2,803	2,757	0,000	30,56
Máximo	3,403	2,887	0,940	32,75
C.V(%)	1,94	0,55	27,48	2,10
n	623	623	623	623
Estatística	Vazão 2,5 m ³ h ⁻¹			
	pH (Volts)	Turbidez (Volts)	STD (Volts)	Tágua (°C)
Média	3,104±0,0041	2,786±0,0044	0,569±0,0103	33,39±0,022
Mínimo	2,908	2,031	0,050	32,44
Máximo	3,521	3,032	0,895	34,69
C.V(%)	3,84	4,61	52,68	19,02
n	839	839	839	839

Estatística	Vazão 3,0 m ³ h ⁻¹			
	Média	2,590±0,0053	2,652±0,0036	0,982±0,0002
Mínimo	2,277	2,204	0,972	27,56
Máximo	2,876	2,779	1,012	33,19
C.V(%)	5,26	3,50	0,61	2,65
n	656	656	656	660

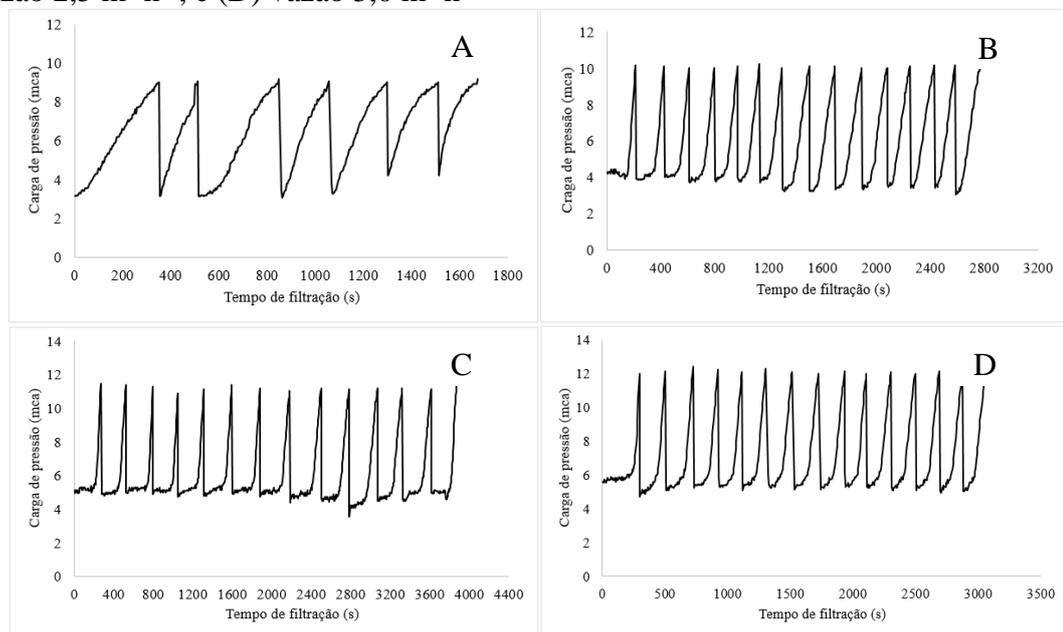
Fonte: elaborado pelo autor.

À exceção da vazão de 3,0 m³ h⁻¹, observaram-se maiores variações nas medições dos sensores de pH e STD.

4.3.3 Retrolavagem e predição de limpeza

A variação da carga de pressão na entrada do filtro de tela (120 mesh, 1”), para os testes de filtração e retrolavagem, nas vazões de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹, são apresentados pela Figura 32 (A, B, C e D).

Figura 32 - Carga de pressão filtro de tela: (A) vazão 1,5 m³ h⁻¹; (B) vazão 2,0 m³ h⁻¹; (C) vazão 2,5 m³ h⁻¹; e (D) vazão 3,0 m³ h⁻¹



Fonte: elaborado pelo autor.

Executou-se 14 retrolavagens para as vazões 2,0 e 3,0 m³ h⁻¹ e 13 para a vazão de 2,5 m³ h⁻¹. Conforme redução na carga de pressão para níveis equivalentes àquela observada no início da filtração, para as vazões supracitadas, bem como da manutenção do tempo limpeza após a realização das retrolavagens, é possível inferir que o sistema de inversão de fluxo desenvolvido foi eficiente para desobstrução do filtro de tela. No que se refere ao fluxo de 1,5

$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, averiguou-se apenas quatro retrolavagens eficientes, não sendo mais possível a limpeza automática (Figura 32A).

Duran-Ros *et al.* (2009) trabalhando com limpeza automática de um filtro de tela (diâmetro de 50,8 mm), superfície de filtração de 1100 cm^2 e 120 microns, atribuíram retrolavagens ineficientes a pressões insuficientes e relataram que o aumento da pressão do sistema de filtração de 300 para 500 kPa, incrementou as retrolavagens eficientes de 9,31% para 64,16%. Em anuência, Salcedo *et al.* (2011) associaram que as falhas encontradas no processo da retrolavagem podem ser causadas pelo emprego de vazões e tempos de limpeza incorretos. Solé-Torres *et al.* (2019) ainda destacaram que a retrolavagem requer pressões mais altas do que outros componentes do sistema.

Os resultados dos parâmetros de desempenho (R^2 , média, mínimo e máximo) do tempo em operação de filtração para atingir a carga de pressão de limpeza do filtro de tela, para cada vazão, estabelecido pelas redes MLP feedforward, são apresentados pela Tabela 13.

Tabela 13 - Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação

Etapa	Parâmetro	Resultado			n*	Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	
		Média	Mín.	Máx.			
Treino	R^2 (%)	81,27±0,70	77,29	84,04	280	1,5	
	EQM	0,93±0,016	0,88	1,02	280		
Validação	R^2 (%)	78,28±1,4	74,12	83,27	120		
	EQM	0,97±0,042	0,84	1,27	120		
Treino	R^2 (%)	84,59±0,20	83,19	86,01	422		2,0
	EQM	0,96±0,031	0,81	1,12	422		
Validação	R^2 (%)	81,21±0,76	77,57	84,21	182		
	EQM	1,11±0,045	0,93	1,36	182		
Treino	R^2 (%)	86,95±0,10	86,70	87,61	556	2,5	
	EQM	0,58±0,011	0,52	0,62	556		
Validação	R^2 (%)	85,15±0,21	84,31	86,60	239		
	EQM	0,59±0,013	0,52	0,66	239		
Treino	R^2 (%)	81,39±0,62	78,10	83,01	448		3,0
	EQM	1,07±0,012	1,02	1,16	448		
Validação	R^2 (%)	77,33±0,91	73,70	81,40	193		
	EQM	1,36±0,045	1,15	1,63	193		

*Tamanho amostral de treino e validação.

Fonte: elaborado pelo autor.

As arquiteturas avaliadas possuíam a configuração 2-4-1, isto é, um neurônio na camada de entrada (tempo), quatro intermediários e um na de saída (carga de pressão). Os coeficientes de determinação (R^2) médios na etapa de treino foram superiores a 80,00 % para todas as vazões. Ao passo que na etapa de generalização (validação) situaram-se acima de 77,00 %.

Verificado o alto desempenho dos modelos, estimou-se o tempo de filtração necessário para realizar a limpeza, para as condições de alta (MLP alta) e mais baixa (MLP baixa) precisão, isto é, com os pesos dos modelos gerados em uma das dez rodadas na etapa de validação, os quais correspondiam ao maior e menor R^2 observados. Para fins de comparação, também foi utilizada a média das observações reais como estimador do tempo para realização da limpeza, isto é, os tempos para realizar a limpeza eram registrados e ao fim do ensaio com cada vazão, era calculada a média dos tempos para retrolavagem.

A Tabela 14 exhibe os valores encontrados, segundo as vazões e carga de pressão para limpeza.

Tabela 14 - Tempo necessário para iniciar a retrolavagem

Vazão ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	Tempo para limpeza (s)			Carga de pressão (mca)
	MLP (alta)	MLP (baixa)	Média	
1,5	380	540	256,20	9,0
2,0	200	250	226,75	10,0
2,5	290	310	293,77	11,0
3,0	195	188	211,28	12,0

Fonte: elaborado pelo autor.

Em que concerne ao ciclo de limpeza, verificou-se 380 e 195 segundos para as vazões de 1,5 e 3,0 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, respectivamente. Portanto, os maiores fluxos potencializaram as obstruções da tela. Chi *et al.* (2021) e Mesquita *et al.* (2012) destacaram que valores de perda de carga são significativamente afetados velocidade de filtração. Já Kannan *et al.* (2020) relataram que conforme a vazão aumenta, as partículas retidas e a eficiência do filtro aumentam, a perda de carga aumentará e, por conseguinte, haverá maior necessidade de limpeza. Um filtro de tela com grande vazão, em relação a área de abertura, requer limpezas mais recorrentes (SOCCOL, 2003). Caso a necessidade de limpeza for intensa, para melhoria no sistema de filtragem e praticidade, é indispensável a instalação de um sistema de retrolavagem automático (RIBEIRO *et al.*, 2005).

O tempo para realização do ciclo de limpeza, a partir de redes neurais artificiais, situou-se acima do tempo médio apenas na vazão de 1,5 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, quando considerada a rodada de validação que produziu a rede de melhor desempenho (MLP alta). Ao passo que para a pior rodada (MLP baixa), à exceção da vazão de 3,0 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$, observou-se tendência de superestimativa de tempo, comparativamente ao tempo médio observado e da rede MLP alta. Zong *et al.* (2019) ressaltaram que a limpeza configurada para um tempo fixo longo poderá

ocasionar uma grande diferença de pressão entre o interior e o exterior da superfície da tela, onde filtro sofrerá deformação irreversível, dano na tela ou limpeza incompleta.

A Tabela 15 mostra os resultados de desempenho para os ajustes, em cada vazão, de redes neurais artificiais baseados nas características de qualidade da água pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura.

Tabela 15 - Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação do ajuste de Carga de pressão e tempo em função características de qualidade da água

Vazão (1,5 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	50,28±0,749	46,01	52,855	66,64±1,64	60,01	73,07	300
EQM	2,47±0,093	2,07	3,04	4640,71±301,03	3859,01	6542,77	300
Validação							
R ² (%)	30,85±1,82	20,41	43,24	41,43±1,77	29,72	48,26	100
EQM	3,21±0,123	2,57	4,04	7045,29±274,58	6269,15	8910,19	100
Vazão (2,0 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	31,45±0,919	30,01	37,79	26,39±1,42	19,74	31,59	345
EQM	5,15±0,187	4,05	5,95	3288,63±136,38	2505,29	3727,12	345
Validação							
R ² (%)	8,16±1,46	2,49	19,07	6,67±1,28	1,48	15,28	115
EQM	5,08±0,195	4,53	6,25	3343,38±85,45	3002,21	3792,54	115
Vazão (2,5 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	28,76±0,966	20,28	30,18	37,69±3,57	16,32	55,27	480
EQM	2,94±0,128	2,50	3,63	4692,94±289,53	3373,34	6064,89	480
Validação							
R ² (%)	8,32±1,24	2,44	15,34	7,16±1,46	1,07	13,31	160
EQM	3,68±0,147	2,79	4,40	6935,47±123,14	6290,95	7542,722	160
Vazão (3,0 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	29,46±0,517	24,90	30,29	50,04±3,22	33,42	64,43	480
EQM	4,48±0,217	3,45	5,76	2397,52±192,88	1565,67	3595,51	480
Validação							
R ² (%)	6,35±0,583	3,46	8,94	19,40±2,21	5,74	29,29	160
EQM	5,47±0,191	4,61	6,45	3649,32±120,21	3045,51	4541,72	160

*Tamanho amostral de treino e validação.

Fonte: elaborado pelo autor.

Após alguma experimentação, diferentes arquiteturas foram implementadas segundo a vazão de ensaio. Para 1,5 m³ h⁻¹, a topologia escolhida possuía a configuração 5 – 14 – 2, ou seja, uma camada de entrada com dimensão p = 5 (4 mais o termo de bias), uma camada escondida com 14 neurônios e uma camada de saída com 2 neurônios (carga de pressão no filtro

e tempo de filtração na referida carga). Modelou-se as arquiteturas 5 – 25 – 2; 5 – 40 – 2 e 5 – 40 – 2, para as vazões 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹. Fatores com características diferentes é difícil generalizar usando um único MLP (MOON *et al.*, 2019). Assim, com MLP de estruturas diferentes a complexidade computacional aumenta, mas uma maior precisão pode ser esperada (MOON *et al.*, 2018).

Observou-se baixo desempenho dos modelos, tanto nas fases de treino como de validação, na estimativa da carga de pressão. O coeficiente de determinação médio variou de 28,76% (vazão 2,5 m³ h⁻¹) a 50,28% na vazão de 1,5 m³ h⁻¹, para a etapa de treino. Na generalização, o R² flutuou entre 6,35 % (3,0 m³ h⁻¹) e 30,85 % (1,5 m³ h⁻¹).

O neurônio de saída “tempo associado a carga de pressão”, por sua vez, apresentou R² mais baixo para a vazão de 2,0 m³ h⁻¹ (26,39%) e mais alto (66,64%) para 1,5 m³ h⁻¹ no estágio de treinamento. Na validação, o R² variou de 6,67 % (2,0 m³ h⁻¹) a 41,43% (1,5 m³ h⁻¹).

Com relação ao ajuste com transformação por componentes principais, a Tabela 16 mostra os autovalores e proporção em porcentagem de variância gerados das características de qualidade da água, para cada vazão. Para todos os ensaios, optou-se por escolher somente os dois primeiros componentes. Deste modo, os modelos ajustados com base em parâmetros de qualidade da água possuíam apenas duas variáveis de entrada.

Tabela 16 - Componentes principais, autovalores e porcentagem da variância explicada pelos componentes

Componente principal	Vazão 1,5 m ³ h ⁻¹	
	Autovalor	Proporção (%)
01	2,290	57,249
02	0,931	23,273
03	0,699	17,485
04	0,080	1,993
	Vazão 2,0 m ³ h ⁻¹	
01	2,111	52,783
02	1,185	29,622
03	0,562	14,053
04	0,142	3,543
	Vazão 2,5 m ³ h ⁻¹	
01	1,898	47,443
02	1,109	27,719
03	0,708	17,702
04	0,285	7,136
	Vazão 3,0 m ³ h ⁻¹	
01	2,049	51,236
02	0,948	23,710
03	0,648	16,194
04	0,354	8,860

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 17 apresenta o desempenho dos modelos de redes neurais artificiais para avaliação da obstrução do filtro de tela, baseado nas características de qualidade da água transformados por componentes principais (01 e 02).

Tabela 17 - Estatísticas de desempenho para as etapas de treino e validação do ajuste de Carga de pressão e tempo em função dos componentes principais (01 e 02)

Vazão (1,5 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	46,03±1,989	35,03	51,73	45,52±2,225	27,99	53,07	300
EQM	2,60±0,070	2,21	3,10	6769,84±151,170	6059,97	7574,78	300
Validação							
R ² (%)	26,06±2,393	18,05	40,90	26,04±1,401	21,10	35,11	100
EQM	3,49±0,113	2,93	4,07	8773,16±306,357	7493,39	10090,50	100
Vazão (2,0 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	21,41±1,815	11,75	31,86	25,70±2,555	12,96	38,69	345
EQM	5,07±0,171	4,44	5,99	3275,49±113,801	2744,80	3869,55	345
Validação							
R ² (%)	4,62±0,849	2,06	10,71	4,42±0,809	1,26	9,10	115
EQM	5,52±0,130	4,69	6,25	3524,69±99,17	3077,69	4127,52	115
Vazão (2,5 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	24,36±1,876	13,74	28,04	31,18±3,234	12,72	44,63	480
EQM	3,18±0,096	2,78	3,59	5964,38±233,247	4978,87	6934,07	480
Validação							
R ² (%)	7,14±0,908	3,10	10,71	3,68±0,799	0,85	8,27	160
EQM	3,68±0,116	3,10	4,35	6971,30±178,226	6552,30	8303,08	160
Vazão (3,0 m ³ h ⁻¹)	Carga de pressão			Tempo			
Treino	Média	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	n*
R ² (%)	17,69±2,627	8,03	30,21	34,13±4,049	8,38	47,11	480
EQM	4,70±0,054	4,48	5,07	2983,72±38,989	2702,21	3113,38	480
Validação							
R ² (%)	7,28±0,580	5,19	10,44	9,68±2,006	2,787	22,111	160
EQM	5,63±0,101	4,98	6,06	4020,77±160,601	3442,62	5143,57	160

*Tamanho amostral de treino e validação.

Fonte: elaborado pelo autor.

Para a vazão de 1,5 m³ h⁻¹, a arquitetura resultou em 3 – 30 – 2. Já as configurações 3 – 36 – 2; 3 – 44 – 2 e 3 – 42 – 2, para as vazões 2,0; 2,5 e 3,0 m³ h⁻¹.

Também se verificou desempenho ruim, tanto nas fases de treino como de validação, na estimativa da carga de pressão. Na fase de treino, o R² médio variou de 17,9% (3,0 m³ h⁻¹) a 46,02% na vazão de 1,5 m³ h⁻¹. Ao passo que na validação, o R² variou entre 4,62 (2,0 m³ h⁻¹) e 26,06 % (1,5 m³ h⁻¹).

Para o tempo na carga de pressão, registrou-se o coeficiente de determinação mais baixo para a vazão de $2,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (25,70%) e mais alto (45,52%) para $1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ na fase de treino. Na generalização, o R^2 flutuou de 3,68 % ($2,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) a 26,04% ($1,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$).

Embora variações de qualidade da água de irrigação, principalmente os sólidos em suspensão, possam incrementar a perda de carga em filtros, não se obteve boa correlação no presente estudo. Divergindo dos resultados obtidos por Ribeiro *et al.* (2005) que analisaram qualidade da água na perda de carga em filtros e relataram maior frequência de lavagem, e altos valores de perda de carga, com o aumento das concentrações médias de sólidos suspensos e turbidez da água do reservatório. Por outro lado, Duran-Ros *et al.* (2009) averiguaram reduções muito pequenas na turbidez e sólidos suspensos totais para sistema de filtração de tela, funcionando com efluentes. Os autores reportaram que, provavelmente devido as partículas de origem biológica deformarem e passarem pelo filtro pelo acréscimo de pressão quando da obstrução do filtro.

É importante ressaltar, ainda, que a baixa precisão na modelagem da carga de pressão, bem como do tempo, via MLP, pode estar associada as características das condições científicas experimentais da condução dos ensaios. O volume de solução utilizado (mistura húmus + água) com alta concentração de húmus, pode, possivelmente, ter influenciado os resultados, uma vez que o filtro de tela de 120 mesh (1”) possuía superfície de filtração de 100 cm^2 , podendo não ser suficiente para promover alteração das características de qualidade da água, ou mesmo pela deformação do material através da tela.

4.4 Conclusões

A modelagem para obtenção de patamares ótimos para manutenção, em função da carga de pressão, apresentou bom desempenho, via redes neurais artificiais do tipo multilayer perceptron feedforward com arquitetura 2-4-1, no sistema de filtragem de tela (120 mesh).

Foi observado baixo desempenho para o ajuste da carga de pressão de retrolavagem a partir das características de qualidade da água pH, turbidez, sólidos totais dissolvidos e temperatura.

4.5 Referências

ANOCHI, J. A. **Previsão climática de precipitação por redes neurais autoconfiguradas**. 2015. 161f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

CABELLO, F.P. **Riegos localizados de alta frecuencia; goteo, microaspersión, exudación.** 3.ed. Madri: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.

DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ, C.F. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems. **Biosystems Engineering**, n.103, v.1, p.35–42, 2009.

FRAGA, A.B.; SILVA, F.L.; HONGYU, K.; SANTOS, D.D.S.; MURPHY, T.W.; LOPES, F.B. **Multivariate analysis to evaluate genetic groups and production traits of crossbred Holstein × Zebu cows.** Trop Anim Health Prod.p. 1- 6. 2015.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation.** 2. ed. New Jersey: PrenticeHall, 1999. 842p.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis.** Madison: Prentice Hall International, 1998. 816p.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Journal of the Royal Statistical Society. **Series C (Applied Statistics)**, v. 21, n. 2 p. 160-173, 1972.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. II: Real Data. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 22, n. 1, p. 21–31, 1973.

KANNAN, B.; JANANI, N.; THANGAMANI, S.; SELVAPERUMAL, A. Development and Evaluation of Low Cost Drip Filter. **Current Journal of Applied Science and Technology**, v. 39, n. 8, p. 87-94, 2020.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Chapman & Hall, 1990. 625p.

LEMO FILHO, M.A.F.; ZANINI, J.R.; SILVA, E.R.S.; CAZETTA, J.O.; FERRAUDO, A.S. Sistema com aeração, decantação e filtração para a melhoria da qualidade de água em irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.3, p.506-519, 2011.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF R.; RAMIREZ, J. C. S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, v. 115, n. 4, p. 178-185, 2012.

MOON, T.; HONG, S.; CHOI, H.Y.; JUNG, D.H.; CHANG, S.H.; SON, J.E. Interpolation of greenhouse environment data using multilayer perceptron. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, p. 105023-105030, 2019.

MOON, T.W., JUNG, D.H., CHANG, S.H., SON, J.E. Estimation of greenhouse CO₂ concentration via an artificial neural network using environmental factors. **Hortic. Environ. Biotechnol.**, v. 59, p. 45–50, 2018.

MOURA, R. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; VANZELA, L. S. Monitoramento da qualidade química da água para fins de irrigação no córrego Três Barras, Marinópolis - SP. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA*, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007. 4p.

OLIVEIRA, C.F. **Perda de carga em filtros de tela e de discos utilizados na irrigação localizada**. 2005. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

RIBEIRO, P.A.A. **Dinâmica do entupimento de tubos gotejadores sob aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via diferentes qualidades de água**. 2008. 94p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P.S.; SILVA, M.J.M. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.1-6, 2005.

RODRIGUES, G.A. **Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de filtro de tela autolimpante**. 2006. 39p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.1226-1237, 2011.

SOCCOL, O.J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. 89p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SOLÉ-TORRES, C.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; ARBAT, G.; PUJOL, J.; CARTAGENA, F.R. Effect of underdrain design, media height and filtration velocity on the performance of microirrigation sand filters using reclaimed effluents. **Biosystems Engineering**, v. 187, p. 292-304, 2019.

TESTEZLAF, R. **Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática**. *Revista Engenharia Agrícola*, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

ZONG, O.; LIU, Z.; LIU, H.; YANG, H. Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems. **PLOS ONE**, v.14, n.2, p.1-18, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias analisadas e construídas no tópico “MODELAGEM FUZZY APLICADA A QUALIDADE DE DADOS MONITORADOS REMOTAMENTE POR SONDA MULTIPARAMÉTRICA”, no âmbito da Internet das Coisas (Bluetooth clássico e Wi-Fi), permitiram a inferência concisa e satisfatória de suas potencialidades e limitações em aplicações futuras, com vistas a transferência de informações de forma eficiente e consistente.

A integração de hardware e software para confecção da sonda multiparamétrica a baixo custo, mostrou-se como uma alternativa importante e de bom desempenho na estimativa de parâmetros de qualidade da água.

Quando da aplicação prática das ferramentas desenvolvidas no tópico “MODELAGEM FUZZY APLICADA A QUALIDADE DE DADOS MONITORADOS REMOTAMENTE POR SONDA MULTIPARAMÉTRICA”, na avaliação de parâmetros de filtração e retrolavagem em sistemas de filtragem para irrigação localizada, observou-se validação das tecnologias no que se refere a qualidade da transmissão dos dados.

No tópico “REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS NA PREDIÇÃO DE RETROLAVAGEM DE FILTROS DE TELA PARA IRRIGAÇÃO”, tendo a continuidade do estudo com a plataformas de baixo custo, no contributo às pesquisas no âmbito dos sistemas de filtragem com limpeza automática para irrigação localizada, também resultaram de bom desempenho na avaliação de parâmetros de hidráulicos como pressão manométrica e vazão.

Os algoritmos computacionais, no contexto da lógica fuzzy e das redes neurais artificiais, também foram indispensáveis no tratamento dos dados obtidos durante toda a pesquisa.

No mais, ressalta-se que todas as informações obtidas e contidas no presente estudo podem subsidiar pesquisas futuras nas áreas de Internet das Coisas e sistemas de filtragem.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Agricultura irrigada**: estudo técnico preliminar. Brasília: ANA, 2004, 107p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2009**. Brasília: ANA, 2009. 204p.
- ALLENDE, A.; MONAGHAN, J.; Irrigation Water Quality for Leafy Crops: A Perspective of Risks and Potential Solutions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.12, n.1, p. 7457-7477, 2015.
- ALMEIDA, O. Á. **Entupimento de emissores em irrigação localizada**. 1. ed. Cruz das Almas: Embrapa, 2009. 61p.
- ANDERSON, G. **Bit-Error-Rate and Capacity Estimation in Wireless Networks**. 2011. 80f. Tese (Doctor of Philosophy) - Drexel University, Philadelphia, 2011.
- ANOCHI, J. A. **Previsão climática de precipitação por redes neurais autoconfiguradas**. 2015. 161f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.
- ARAB, S.; ASHRAFZADEH, H.; ALIDADI, A. Internet of Things: Communication Technologies, Features and Challenges. **International Journal of Engineering Development and Research**, v.6, n.2, p.733-742, 2018.
- ARDUINO. **Arduino Nano**. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: 13 maio 2021.
- ASABE. **ANSI/ASAE S539**: media filters for irrigation – testing and performance reporting. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1994.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução: GHEYI, R.S.; MEDEIROS, J.F.; DEMASCENO, F.A.V. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p. (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 29).
- BELOTTI, J.T. **Previsão de vazões afluentes utilizando redes neurais artificiais e ensembles**. 2019. 139f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.
- BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007. 248p.
- BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v.2, n.2, p.149-162, 1979.
- CABELLO, F.P. **Riegos localizados de alta frecuencia; goteo, microaspersión, exudación**. 3.ed. Madri: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- CARMO, R.L. do; OLIVEIRA, A.L.R. de; OJIMA, R.; NASCIMENTO, T.T. do. Água virtual, escassez e gestão: O Brasil como grande “exportador” de água. **Ambiente & Sociedade**, Campinas v. X, n.1, p.83-96, 2007.
- CHALLOO, R.; OLADEINDE, A.; YILMAZER, N.; OZCELIK, S.; CHALLOO, L. An Overview and Assessment of Wireless Technologies and Coexistence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi Devices. **Procedia Computer Science**, v. 12, p.386 – 391, 2012.
- CHIASSERINI, C.F.; RAO, R.R. Coexistence Mechanisms for Interference Mitigation in the 2.4-GHz ISM Band. **IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS**, v.2, n.5, p.964-975, 2003.
- CONTI, A.; DARDARI, D.; PASOLINI, G.; ANDRISANO, O. Bluetooth and IEEE 802.11b Coexistence: Analytical Performance Evaluation in Fading Channels. **IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS**, v. 21, n. 2, p.259- 269, 2003.
- CORREIA, G.T.; ROCHA, H.R.O.; RISSINO, S.D. AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO COM MONITORAMENTO VIA APLICATIVO WEB. **Engenharia na agricultura**, v.24, n.4, p.314-325, 2016.
- CUNHA, R.A.; SILVA, A.G.; NASCIMENTO, L.D.; LIMA, L.S.; BANDEIRA, M.L.F.S. POLYPUS: SONDA DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EM ÁGUAS SUPERFICIAIS. **R. gest. sust. ambient.**, v. 9, n. 4, p. 653-671, 2020.
- DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ, C.F. Performance and backwashing efficiency of disc and screen filters in microirrigation systems. **Biosystems Engineering**, n.103, v.1, p.35–42, 2009.
- EMBARCADERO. **Using Bluetooth**. Disponível: http://docwiki.embarcadero.com/RADStudio/Rio/en/Using_Bluetooth. Acesso em: 25 set. 2020.
- FAUSTINE, A.; MVUMA, A.N.; MONGI, H.J.; GABRIEL, M.C.; TENGE, A.J.; KUCEL, S.B. Wireless sensor networks for water quality monitoring and control within lake victoria basin: Prototype development. **Wireless Sensor Network**, v. 6, n. 12, p.281-289, 2014.
- FERREIRA, L. **Aplicação de sistemas fuzzy e neuro-fuzzy para predição da temperatura retal de frangos de corte**. 2009. 56f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- FIGUEIREDO FILHO, D.; NUNES, F.; ROCHA, E.C.; SANTOS, M.L.; BATISTA, M. SILVA JÚNIOR, J.A. O que Fazer e o que Não Fazer com a Regressão: pressupostos e aplicações do modelo linear de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). **Revista Política Hoje**, v. 20, n. 1, p.44 – 99, 2011.

FRAGA, A.B.; SILVA, F.L.; HONGYU, K.; SANTOS, D.D.S.; MURPHY, T.W.; LOPES, F.B. **Multivariate analysis to evaluate genetic groups and production traits of crossbred Holstein × Zebu cows**. *Trop Anim Health Prod.* p. 1- 6. 2015.

FRENKEN, K.; GILLET, V. **Irrigation water requirement and water withdrawal by country**. Rome: FAO, 2012. 262 p. (FAO AQUASTAT Reports).

GARCÍA, L.; PARRA, L.; JIMENEZ, J.M.; LLORET, J.; LORENZ, P. IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*, v.20, n.1042, p.1-48, 2020.

GASTALDINI, M. C. C.; MENDONÇA, A. S. F. Conceito para a avaliação da qualidade da água. *In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2003. cap.1, p.3-13.

GILLETT, D.; MARCHIORI, A. A Low-Cost Continuous Turbidity Monitor. *Sensors*, v.19, n.14, p.2-18, 2019.

GOLMIE, N.; VAN DYCK, R.E.; SOLTANIAN, A.; TONNERRE, A.; RÉBALA, O. Interference Evaluation of Bluetooth and IEEE 802.11b Systems. *Wireless Networks*, v.9, p.201–211, 2003.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques**. 3. ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, p.770, 2011.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Londres: Pearson, 2009. 936p.

HAYKIN, S. **Neural networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. New Jersey: PrenticeHall, 1999. 842p.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 902p.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. Madison: Prentice Hall International, 1998. 816p.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial Journal of the Royal Statistical Society. *Series C (Applied Statistics)*, v. 21, n. 2 p. 160-173, 1972.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. II: Real Data. *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 22, n. 1, p. 21–31, 1973.

JORGE JUNIOR, J.A. **Desenvolvimento de sonda multiparâmetro dinâmica de qualidade de água (sonda aqua-x)**. 2019. 59p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Brasil, Fernandópolis, SP, 2019.

KANNAN, B.; JANANI, N.; THANGAMANI, S.; SELVAPERUMAL, A. Development and Evaluation of Low Cost Drip Filter. *Current Journal of Applied Science and Technology*, v. 39, n. 8, p. 87-94, 2020.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Chapman & Hall, 1990. 625p.

KUMAR, G.R.; GOPAL, T.V.; SRIDHAR, V.; NAGENDRA, G.N. SMART IRRIGATION SYSTEM. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, v.119, n. 15, p.1155-1168, 2018.

KUMAR, J.; YADAV, M.; SRIVASTAVA, S. Performance and Backwashing Efficiency of Screen, Disc and Sand Filters in Micro-Irrigation Systems. **Trends in Biosciences**, v.10, n.12, p.2172-2178, 2017.

KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C.J.; NETER, J.; LI, W. **Applied linear statistical models**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 1396p.

LAZZARIN, L. N. A. **Método ensemble baseado em redes neurais artificiais para estimação de internações por doenças respiratórias**. 2019. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

LEAL JUNIOR, W.B. **Modelagem de um sistema multiparâmetro para monitoramento da qualidade da água utilizando internet das coisas**. 2019. 69f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, 2019.

LEAL, D.C.M. **Plataforma de aquisição de dados para monitoramento ambiental de reservatórios hídricos**. 2012. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

LEMONS FILHO, M.A.F.; ZANINI, J.R.; SILVA, E.R.S.; CAZETTA, J.O.; FERRAUDO, A.S. Sistema com aeração, decantação e filtragem para a melhoria da qualidade de água em irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.3, p.506-519, 2011.

LEONE FILHO, M. A. **Previsão de carga de curto prazo usando ensembles de previsores selecionados e evoluídos por Algoritmos Genéticos**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2006.

LEWIS-BECK, C.; LEWIS-BECK, M.S. **Applied Regression: an introduction**. Series (Quantitative Applications in the Social Sciences). 2.ed. eBook Kindle: SAGE, 2015. 115p.

LIA, S.; XUB, L.D.; ZHAO, S. 5G Internet of Things: A Survey. **Journal of Industrial Information Integration**, v.10, p.1-9, 2018.

LIMA, E.L. **Módulo de sensores para monitoramento da qualidade da água com transmissão sem fio utilizando plataforma de prototipagem**. 2018. 79f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2018.

LIMA, F.M.C.; SILVA, S.A.; FILGUEIRA, H.J.A.; GOMES, H.P. Controle do potencial matricial da água no solo por meio de Lógica Fuzzy. **Irriga**, v. 15, n. 4, p. 431-442, 2010.

LOPEZ, J.R.; HERNANDEZ, J.M. A.; REGALADO, A.P.; HERNANDEZ J.F.G. 2. Ed. **Riego Localizado**. Madrid: Mundi-Prensa, 1992. 430p.

MAHMOOD, A.; JAVAID, N.; RAZZAQ, S. A review of wireless communications for smart grid. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, n.1, p.248-260, 2015.

MAMDANI, E.H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proc. **IEE**, v.121, n.12, p.1585-1588, 1973.

MATHEW, A.; CHANDRABABU, N.; ELLEITHY, K.; RIZVI, S. INTERFERENCE OF 802.11b wlan and bluetooth: analysis and performance evaluation. **International journal of Computer Networks & Communications**, v.2, n.3, p.140-150, 2010.

MENDONÇA, A.M.; FORGIARINI, F.R.; SILVEIRA, G.L.; CRUZ, J.C. Confiabilidade dos parâmetros monitorados em águas por sonda multiparâmetros. **REGA**, v.14, n.3, p.1-11, 2017.

MENESES, K.C.; APARECIDO, L.E.O.; MENESES, K.C.; FARIAS, M.F.F. Estimating Potential Evapotranspiration in Maranhão State Using Artificial Neural Networks. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 4, p.675-682, 2020.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF R.; RAMIREZ, J. C. S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, v. 115, n. 4, p. 178-185, 2012.

MOON, T.; HONG, S.; CHOI, H.Y.; JUNG, D.H.; CHANG, S.H.; SON, J.E. Interpolation of greenhouse environment data using multilayer perceptron. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, p. 105023-105030, 2019.

MOON, T.W., JUNG, D.H., CHANG, S.H., SON, J.E. Estimation of greenhouse CO2 concentration via an artificial neural network using environmental factors. **Hortic. Environ. Biotechnol.**, v. 59, p. 45–50, 2018.

MOURA, R. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; VANZELA, L. S. Monitoramento da qualidade química da água para fins de irrigação no córrego Três Barras, Marinópolis - SP. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...** Bonito: SBEA, 2007. 4p.

MOUSA, A.K.; CROOCK, M.S.; ABDULLAH, M.N. Fuzzy based Decision Support Model for Irrigation System Management. **International Journal of Computer Applications**, v.104, n.9, p.0975 – 8887, 2014.

NIKITHA, S.; NANDHINI, T.; PAVITHRA, K.; KINOL, A.M.J. A BLUETOOTH BASED AUTOMATIC IRRIGATION SYSTEM. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v.05, n.03, p.587-590, 2018.

OGIDAN, O.K.; ONILE, A.E.; ADEGBORO, O.G. Smart Irrigation System: A Water Management Procedure. **Agricultural Sciences**, v.10, n.1, p.25-31, 2019.

OLIVEIRA, C.F. **Perda de carga em filtros de tela e de discos utilizados na irrigação localizada**. 2005. 58f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

PANDIT, A.P.; CHAVAN, S.A.; BDGAR, P.V.; SANAP, V.R.; PAWAR, M.D. IOT based Smart Irrigation System. **IJARIE**, v.5, n.3, p.1025-1031, 2019.

PATIL, K.; PATIL, S.; PATIL, S.; PATIL, V. Monitoring of Turbidity, PH & Temperature of Water Based on GSM. **International Journal for Research in Emerging Science and Technology**, v.2, n.3, p.16-21, 2015.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; ZOLIN, C. A.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; JOSÉ, J.V. Situação da Agricultura Irrigada no Brasil de Acordo com o Censo Agropecuário 2006. **Irriga**, v. 16, n. 2, p. 163-176, 2011.

PEREIRA, B.D.A. **Medidor de pH com calibração de pH e compensação automática de temperatura**. 2016. 90f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2016.

PESSOA, M.A.R.; SOUZA, F.J.; DOMINGOS, P.; AZEVEDO, J.P.S. Índice fuzzy de qualidade de água para ambiente lótico — IQAFAL. **Eng Sanit Ambient**, v.25, n.1, p.21-30, 2020.

PHILLIPS, K.P. Filtration's Role in water Quality: Polishing Water Fro Low – Volume Irrigation. **Irrigation journal**, v.43, n.4, p.8 – 12, 1993.

PIÑEIRO DI BLASI, J. I.; MARTÍNEZ TORRES, J.; GARCÍA NIETO, P. J.; ALONSO FERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ MUÑIZ, C.; TABOADA, J. Analysis and detection of outliers in water quality parameters from different automated monitoring stations in the Miño river basin (NW Spain). **Ecological Engineering**, v.60, p. 60–66, 2013.

PINTO, M. F.; CAMARGO, A.P.; ALMEIDA, A.C.S.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.211–217, 2011.

POISSON, A. Conductivity/salinity/temperature relationship of diluted and concentrated standard seawater. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v.5, n.1, p.41-50, 1980.

PONCIANO, P.F.; LOPES, M.A.; YANAGI JUNIOR, T.; FERRAZ, G.A.S. Análise do ambiente para frangos por meio da Lógica Fuzzy: uma revisão. **Arch. Zootec.**, v.60, n.R, p.1-13, 2011.

PRATAMI, L.W.D.; ARISWATI, H.G.; TITISARI, D. Effect of Temperature on pH Meter Based on Arduino Uno With Internal Calibration. **Journal of Electronics, Electromedical, and Medical Informatics**, v.2, n.1, p.23-27, 2020.

RIBEIRO, P.A.A. **Dinâmica do entupimento de tubos gotejadores sob aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via diferentes qualidades de água**. 2008. 94p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S. Comparação de elementos filtrantes no grau de obstrução em irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.3, p.488-500, 2013.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P.S.; SILVA, M.J.M. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.1, p.1-6, 2005.

RIETMANM, A.; KAPLAN, M.L.; CAVA, R.J. Lithium ion-poly (ethylene oxide) complexes. I. Effect of anion on conductivity. **Solid State Ionics**, v.17, n.1, p.67-73, 1985.

RIGNEL, D.G.S.; CHENCI, G.P.; LUCAS, C.A.L. UMA INTRODUÇÃO A LÓGICA FUZZY. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, v.01, n.01, p.17-28, 2011.

ROCHA NETO, O.D.; TEIXEIRA, A.S.; BRAGA, A.S.; SANTOS, C.C.; LEÃO, R.A.O. Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. **Eng. Agríc.**, v.35, n.2, p.266-279, 2015.

RODRIGUES, G.A. **Desenvolvimento e avaliação de um protótipo de filtro de tela autolimpante**. 2006. 39p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SÁ, Y.V.A.; WEN, T.C. A Inteligência Artificial (Lógica Fuzzy) para cálculo de estoque de segurança local em empresas multinacionais. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v.14, n.4, p.1-10, 2019.

SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.1226-1237, 2011.

SCHIASSI, L.; YANAGI JUNIOR, T.; FERREIRA, L.; DAMASCENO, F.A.; YANAGI, S.N.M. Metodologia fuzzy aplicada à avaliação do aumento da temperatura corporal em frangos de corte. **Engenh. Agríc.**, v.16, p.180-191, 2008.

SHIN, S.Y. Performance Evaluation of Interference Between Bluetooth Networks using Bit Error Rate. *In: Winter Workshop*, 15., 2002, Kushu. **Anais...** 2002, 6p.

SILVA, I. N. da; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas - curso prático**. 1. ed. São Paulo: ARTLIBER, 2010. 399p.

SILVA, L. P.; SILVA, M. M.; CORREA, M. M.; SOUZA, F. C. D.; SILVA, E. F. F. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, p.480-486, 2012.

SILVA, W. R.; SILVA, M.R.; PIRES, T.B. O Uso Sustentável e a Qualidade da Água na Produção Animal. **Revista Eletrônica Nutritime**, v.11, n.05, p.3617-3636, 2014.

SINGH, S.K.; BHAROSE, R.; NEMČIĆ-JUREC, J.; RAWAT, K.S.; SINGH, D. Irrigation water quality appraisal using statistical methods and WATEQ4F geochemical model. *In: SRIVASTAVA, P.K.; GUPTA, M.; TSAKIRIS, G.; QUINN, N.W. Agricultural Water Management: Theories and Practices*. Bristol: Academic Press, 2021, p.101-138.

SIQUEIRA, H. V.; BOCCATO, L.; ATTUX, R.; LYRA, C. Echo state networks and extreme learning machines: A comparative study on seasonal streamflowseries prediction. **Lecture Notes in Computer Science**, v.7664, n.2, p.491-500, 2012.

SOCCOL, O.J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem da água de irrigação**. 2003. 89p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SOLÉ-TORRES, C.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; ARBAT, G.; PUJOL, J.; CARTAGENA, F.R. Effect of underdrain design, media height and filtration velocity on the performance of microirrigation sand filters using reclaimed effluents. **Biosystems Engineering**, v. 187, p. 292-304, 2019.

TESTEZLAF, R. **Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática**. Revista Engenharia Agrícola, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

TOLEDO, M. **A Guide to pH Measurement - the theory and practice of laboratory pH applications**. Disponível em: https://www.mt.com/dam/LabDiv/NVC/xpage/downloads/ph-theory-guide/ph_theory_guide_EN.pdf. Acesso em: 14 maio 2021.

TOUATI, F.; AL-HITMI, M.; BENHMED, K.; TABISH, R. A fuzzy logic-based irrigation system enhanced with wireless data logging applied to the state of Qatar. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.98, p. 233-241, 2013.

TYAGI, A.; NAVANI, J.P.; GUPTA, N. TIWARI, R.; GUPTA, A. Smart Irrigation System. **International Journal for Innovative Research in Science & Technology**, v.3, n.10, p.9-12, 2017.

UNGUREANU, F.; LUPU, R.G.; STAN, A.; CRACIUN, I.; TEODOSIU, C. Towards real time monitoring of water quality in river basins. **Environmental Engineering and Management**, v.9, n.9, p.1267-1274, 2010.

VERONEZ, A.C.C.S.; SANTO, A.F.; SOUZA, C.C.; REIS NETO, J.F. Classificação de Frutas e Legumes Utilizando Lógica Fuzzy. **Rev. Cienc. Gerenc.**, v. 23, n. 37, p. 52-56, 2019.

WEL, J.; YAN, M. Bit error rate analysis of Wi-Fi and bluetooth under the interference of 2.45 GHz RFID. **The journal of China Universities of posts and telecommunications**, v. 14, n.1, p.89-93, 2007.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WIN, T.T.N.; BOGAARD, T.; GIESEN, N.V. A Low-Cost Water Quality Monitoring System for the Ayeyarwady River in Myanmar Using a Participatory Approach. **Water**, v.11, n.10: p.1-16, 2019.

ZADEH, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-I. **Information sciences**, v.8, p.199-249, 1975.

ZAFAR, S.; MIRAJ, G.; BALOCH, R.; MURTAZA, D.; ARSHAD, K. An IoT Based Real-Time Environmental Monitoring System Using Arduino and Cloud Service. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, v.8, n.4, p. 3238-3242, 2018.

ZONG, O.; LIU, Z.; LIU, H.; YANG, H. Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems. **PLOS ONE**, v.14, n.2, p.1-18, 2019.