

Investigação e implementação de arquitetura IoT para mensurar o índice de turbidez da água em tempo real para ambientes de Carcinicultura Inteligente utilizando abordagem de calibração alternativa

Investigation and implementation of IoT architecture to measure real-time water turbidity for Smart Shrimp Farming Environments using alternative calibration approach

Eduardo Felipe Lima Lins de Almeida¹

Obionor de Oliveira Nóbrega¹

Fábio Alves de Freitas¹

Alfredo Olivera Gálvez²

Fernando Antônio Aires Lins¹

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Departamento de Computação, Recife, Pernambuco, Brasil.

²Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Departamento de Pesca e Aquicultura, Recife, Pernambuco, Brasil.

Resumo

Objetivo: A criação de organismos aquáticos (aquicultura) é de extrema relevância no campo da produção de alimentos no Brasil e no mundo, de modo que a manutenção de um ambiente adequado por meio do controle da qualidade da água é essencial para a viabilidade de todo o processo produtivo.

Método/abordagem: Realizou-se, então, o desenvolvimento e avaliação de uma arquitetura para um equipamento de análise.

Contribuições teóricas/práticas/sociais: Dentre os parâmetros que determinam a qualidade, a turbidez da água, medida do grau de diminuição da transparência do ambiente aquático, foi focada neste trabalho.

Originalidade/relevância: Utilizando uma abordagem alternativa para a calibração, fez-se uso do dispositivo para o monitoramento da turbidez da água em ambientes de criação de camarões (carcinicultura), buscando-se atender às necessidades de baixo custo, automação e monitoramento remoto.

Palavras-chave: Aquicultura; Turbidez; IoT; Calibração; Automação.

Abstract

Purpose: The breeding of aquatic organisms (aquaculture) is highly relevant in the field of food production in Brazil and in the world. Maintaining a suitable environment through water quality control is essential for the viability of the entire production process.

Design/methodology/approach: Consequently, the development and evaluation of an analysis equipment architecture was carried out.

Research, Practical & Social implications: Among the parameters that determine the quality, the turbidity of the water, a measure of the degree of decrease of the transparency of the aquatic environment, was focused in this work.

Originality/value: Using an alternative approach to calibration, the device was applied to monitor water turbidity in shrimp farming environments, in order to meet the needs of low cost, automation and remote monitoring.

Keywords: Aquaculture; Turbidity; IoT; Calibration; Automation.

Introdução

O agronegócio, a despeito das ações empreendidas em razão do contexto pandêmico ocasionado pela SARS-CoV-2 (COVID-19), a qual gerou impactos significativos para a economia e o desenvolvimento de diversos setores em escala global, com alguns ainda perceptíveis, é um setor que perdura em relevância no Brasil. Dentre as áreas de destaque no escopo do agronegócio no Brasil está a aquicultura, denominação usada para a criação de organismos aquáticos. Acerca desta, em levantamentos recentes sobre a carcinicultura (cultivo de camarões) na região Nordeste do Brasil, de acordo com relatórios da Associação Brasileira de Criadores de Camarão, a mesma produziu no ano de 2019 cerca de 90 mil toneladas do produto, com os maiores valores registrados nos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte (Associação Brasileira de Criadores de Camarão [ABCCAM], 2020).

É patente que criação de organismos aquáticos em ambientes controlados, com altas taxas de produção por metro cúbico, associada ao emprego de tecnologias de controle que estão em contínua expansão (com as quais aquela se liga e recebe a denominação Aquicultura Inteligente ou Aquicultura 4.0), com relevância para o uso de equipamentos e serviços baseados no conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* ou IoT), mostra-se essencial e encontrará ainda maior importância em um futuro próximo, quando a demanda por

alimentos e por práticas mais sustentáveis deverá impelir os produtores a buscarem a adequação dos seus sistemas às tendências de mercado, às necessidades globais e a utilizarem os seus recursos, assim como os do meio ambiente como um todo, de maneira consciente e otimizada.

A Internet das Coisas, nesse sentido, explicita a ideia de ubiquidade dos sistemas de computação associada à conectividade dos seus dispositivos, ambas aplicadas a finalidades específicas. Tais equipamentos (as “coisas”) buscam captar informações do ambiente pelo intermédio de sensores e realizam ações para dar suporte ao seu aprimoramento, através de atuadores. Estão inseridos no meio e buscam minimizar a necessidade de intervenção humana.

A utilização de dispositivos voltados para a automação na tomada de decisões por parte dos criadores na carcinicultura acarreta em melhorias constatáveis dentro de todo o âmbito do processo produtivo. Exemplos destes agentes incluem equipamentos para a medição de variáveis essenciais na manutenção e gestão do ambiente em associação à ações empregadas na correção de erros ou deficiências, ou em razão da ausência de elementos e condições ideais no meio objetivado.

Todavia, grande parte dos dispositivos presentes no mercado são proprietários, como afirma Helal, Júnior, da Cunha Garcia, Barroso e da Silva Villaça (2018), sendo de alto custo e sem interoperabilidade com equipamentos de

outros fabricantes. No contexto da aquicultura, a aplicação de tais ferramentas se mostra inviável em cultivos de pequeno porte e, em especial, para os pequenos produtores, os quais utilizam métodos manuais, imprecisos e, se realizados sem a preparação e a experiência adequadas, prejudiciais para monitorar os parâmetros de controle da qualidade da água. O controle de tais variáveis é imprescindível para o conhecimento do sistema e para a tomada de decisões em virtude da necessidade de mudanças e da manutenção de um estado adequado. Dentro destas variáveis, uma tem importância destacada e influencia na qualidade da água na aquicultura, a turbidez.

A turbidez é uma medida óptica estabelecida como a diminuição do grau de transparência de um ambiente aquático em decorrência da presença de sólidos em suspensão, a qual é a sua principal causa e avaliada como TSS (Total de Sólidos Suspensos) (Fondriest Environmental INC, 2014), e de partículas dissolvidas que, em conjunto, contribuem para a obstrução da passagem da luz em razão da sua dispersão (ou espalhamento), reflexão e atenuação através da água. Deste modo, quanto maior a intensidade de tais fenômenos, maior é o valor da turbidez (Ziegler, 2002). Em suma, considerando-se a individualidade de cada contexto de aplicação, os fatores que mais comumente influem para o aumento da turbidez são: a presença de fitoplâncton e de algas; a circulação e subida de sedimentos de erosão externa em depósito no fundo da água;

decomposição de matéria orgânica; além da mistura de soluções contaminadas com detritos (Arana Obra, 2020).

O acompanhamento dos níveis da turbidez nos sistemas de aquicultura é realizado por meio de equipamentos de utilização manual que dependem da experiência do operador de perceber, visualmente, as alterações do parâmetro na água. O emprego de aparelhos eletrônicos em trabalhos especializados na área de aquicultura é, por outro lado, muitas vezes limitado a medidores pontuais, ou seja, que não permitem o monitoramento constante, além de serem demasiado custosos para o emprego em cenários de menor porte.

Neste trabalho, objetivou-se o desenvolvimento de uma arquitetura, tomando como base o conceito de Internet das Coisas, de um equipamento orientado para a observação e o controle da turbidez da água em ambientes de aquicultura. Mais especificamente, se objetivou o monitoramento inteligente e de baixo custo do parâmetro em ambientes de carcinicultura de maneira a possibilitar o manejo remoto e automático por meio de uma proposta de dispositivo e de calibração alternativos às soluções comerciais.

Fundamentação Teórica

Investigação na Literatura

Inicialmente foi realizada uma pesquisa contemplando uma revisão da li-

teratura, de modo a permitir uma visualização mais ampla do atual estado da arte. Buscou-se responder:

- *Quais as soluções existentes no estado da arte para a mensuração da turbidez na aquicultura?*
- *Dentre estas soluções, quais podem ser alinhadas com as necessidades de baixo custo, automação e monitoramento remoto?*
- *De que maneira é possível regular essas soluções para que retornem resultados confiáveis por meio do uso de técnicas acessíveis de ajuste?*

Com base nesses questionamentos, foram levantados trabalhos em bases de busca especializadas tomando como intervalo de tempo os anos de 2010 até 2021. Tais obras representaram o suporte teórico que foi fundamental para o trabalho, o qual é descrito nas próximas subseções e ambicionou responder os quesitos formulados previamente.

Mensuração da Turbidez

A mensuração da turbidez na aquicultura é geralmente realizada por meio de equipamentos manuais, como o disco de Secchi e o tubo de transparência (ou de turbidez). Tais dispositivos dependem unicamente da capacidade do seu operador de, visualmente, perceber as diferenças de nebulosidade, as mudanças de cores e o nível de transparência da água, de modo que não são apropriadas para aplicações específicas

que requerem rigor no controle da qualidade do meio aquático (Associação Brasileira de Criadores de Camarão [ABCCAM], 2010; Dias, 2019; Fondriest Environmental INC, 2014; Racey, 2019). Utilizando-se o método do disco de Secchi, por exemplo, a água é tão menos turva quanto mais distante o disco estiver da superfície e ainda permanecer visível. Para a carcinicultura, com respeito ao disco de Secchi, a profundidade adequada está na faixa de 25 a 40 centímetros (ABCCAM, 2010; Muchtar, Sanjaya, & Hariadi, 2017; Serviço Nacional de Aprendizagem Rural [SENAR], 2017).

Em se tratando de ferramentas eletrônicas, segundo Kitchener, Wainwright e Parsons (2017), a medição da turbidez se divide em duas metodologias básicas, a turbidimetria e a nefelometria. Na primeira, é avaliada a intensidade da transmissão da luz, enquanto na segunda se determina o seu grau de espalhamento na água. Sensores eletrônicos de turbidez utilizam um feixe de luz originado de um emissor que, tendo a sua trajetória e intensidade alteradas pelas partículas em suspensão no meio aquático, é captado por um receptor disposto em um ângulo específico do equipamento. Para o autor, é adotado o que se segue: o receptor disposto a 0° do feixe detecta a denominada atenuação “pura” (ou detecção da luz transmitida); se colocado de 0° a

menos de 90° , diz-se que o equipamento possui um detector de “dispersão frontal” (*forward-scattering*); se disposto à exatamente 90° , de “dispersão lateral” (*side-scattering*); e se colocado

de 90° até 180° , denomina-se detector de “dispersão de volta” (*back-scattering*). Tais variações e nomenclaturas são expostas na Figura 1.

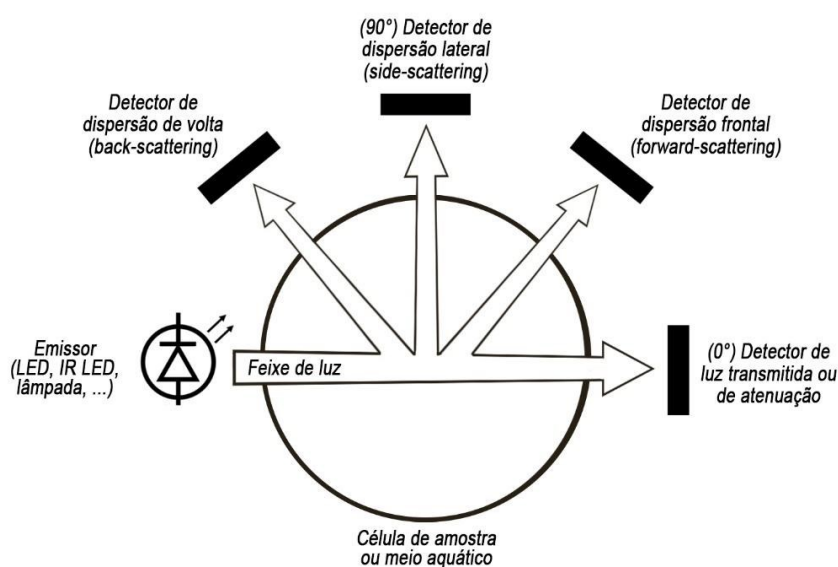


Figura 1. Posições de detectores da dispersão (espalhamento) do feixe de luz emitido pela fonte em seguida da sua interação com a solução-alvo (célula de amostra ou o meio aquático)
Fonte: Autor

Os trabalhos associados ao contexto de Internet das Coisas utilizam sensores baseados na percepção da transmissão direta, isto é, que detectam a atenuação do feixe de luz quando o mesmo passa pelo meio aquático e, por fim, chega a um receptor posicionado a 180° do emissor (a 0° com relação ao feixe, na Figura 1). O que é detectado por estes dispositivos é a quantidade de luz transmitida pela fonte e que chega ao fotorreceptor, sendo empregados como sensores de turbidez e não do espalhamento de luz (Fondriest Environmental INC,

2014). Tais equipamentos tinham o propósito inicial de serem utilizados em máquinas de lavar, empregados para aproximar o nível de limpeza da água (Dias, 2019). A unidade padrão para o método de mensuração por atenuação (medição à 180° da fonte de luz) é indicada como Unidade de Atenuação de Formazina, ou FAU; porém, em se tratando de aparelhos disponíveis no mercado, a unidade comumente adotada é a NTU, abreviação para Unidade Nefelométrica de Turbidez (Fondriest Environmental INC, 2014; Trevathan, Read, & Schmidtke, 2020).

A definição da faixa de turbidez mais adequada para cada tipo de criação depende da espécie a ser inserida no ambiente aquático e da natureza deste. No campo da carcinicultura, Shetty, Pai e Pai (2018) trata das espécies *Penaeus monodon* (camarão-tigre-gigante) e do *Penaeus indicus* (camarão-branco), de maneira que referencia como adequados para o seu cultivo os valores de 28 à 32 NTU; Kasnir, Harlina e Rosmiati (2014) explicita que a tolerância é para os valores menores ou iguais a 30 NTU; Setiyawan, Hikmah e Marzuki (2020) cita que a faixa de 25 a 400 NTU é a mais apropriada para a manutenção de condições ideais de crescimento e desenvolvimento da espécie *Litopenaeus vannamei* (camarão-de-patas-brancas ou camarão-branco-do-pacífico); e, com respeito a outros organismos aquáticos e aplicações afins, em média, consideram-se valores de até 100 NTU (Chandrappa, Dharmanna, UV, Sudeeksha, Suraksha, & Thrupthi, 2017; Shetty et al., 2018; Trevathan et al., 2020; Wang, Rajib, Collins, & Grieve, 2018).

Sensores

No trabalho, inicialmente, foram discriminados três sensores de turbidez: o primeiro de referência “TSD-10”; o segundo, “SEN0189”, da fabricante *DFRobot*; o terceiro, por fim, de referência “TS-300B”. Com respeito ao módulo sensor “SEN0189”, a própria empresa fabricante do equipamento fornece a

curva de calibração e as instruções de uso (*DFRobot*). No entanto, como citado em Trevathan et al. (2020), o sensor da *DFRobot* não opera de maneira satisfatória em valores muito baixos de NTU, o que inclui o intervalo adotado na pesquisa: aferições abaixo de 100 NTU. O sensor “SEN0189” opera na faixa de 0 a 3000 NTU. Ainda segundo Trevathan et al. (2020), no entanto, o equipamento de referência “TS-300B”, ilustrado na Figura 2, opera em um intervalo menor, retornando valores de 0 a 1000 NTU.

A sonda desse tipo de módulo sensor de turbidez é composta pela placa do sensor protegida por um encapsulamento plástico que a isola do meio aquático. Contudo, a sonda não pode ser submersa além da sua altura (na Figura 2, 33.7mm), dado que não é impermeável e a infiltração de água é capaz de danificar o equipamento.

Soluções de Calibração

No âmbito da mensuração da turbidez, a calibração de dispositivos eletrônicos é usualmente realizada através de substâncias primárias que são fabricadas, em diferentes níveis, para atingirem valores padrão em suas unidades (como o NTU), associadas com equipamentos laboratoriais de medição do parâmetro, denominados “turbidímetros”. Em Trevathan et al. (2020), foi utilizado um equipamento da fabricante Hach para calibrar o sistema.

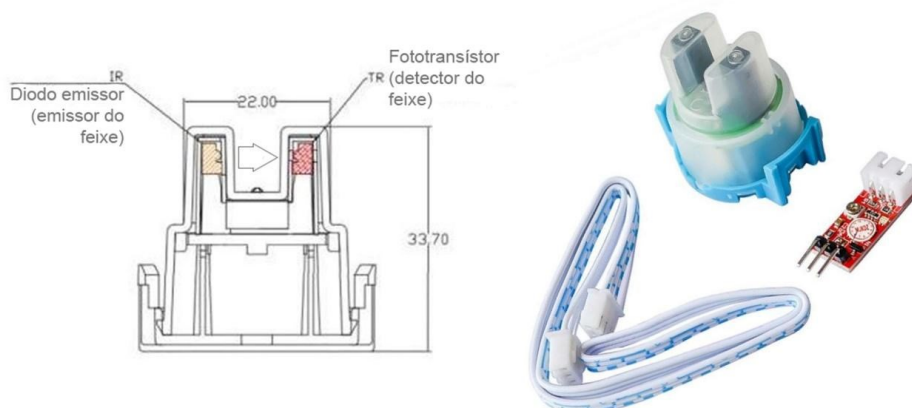


Figura 2. Sensor "TS-300B" e placa adaptadora "MJKDZ" (direita); esquema interno da sonda do sensor (esquerda)

Fonte: Compilação do autor a partir de imagens de Epik Electronics e Probots

Na literatura, o composto químico mais abordado como padrão primário de turbidez é a formazina, uma solução esbranquiçada e de caráter leitoso sintetizada por frações de sulfato de hidrazina ($N_2H_6SO_4$) e hexametilenotetramina ($C_6H_{12}N_4$) dissolvidas em água, de maneira a ter em sua mistura, com valores e especificações predeterminadas, o valor de 4000 NTU (Racey, 2019). Tal composto é adotado por órgãos de regulamentação que o identificam como um método primário de calibração, tais como a USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), que a catalogou no método 180.1, e a ISO (International Standards Organization) 7027 de 1999; no entanto, além da formazina e de outros compostos de primeira ordem, padrões de calibração secundários, que são calibrados a partir dos primários, também podem ser utilizados para checagens diárias de turbidímetros (Racey, 2019).

Com respeito à formazina, embora esteja disponível no mercado brasileiro e possa ser fabricada de modo relativamente simples, como descrito em trabalhos disponíveis na bibliografia, trata-se de um composto químico tóxico, de caráter carcinogênico, de custo moderado a alto, instável e acessível apenas por intermédio de registro e fiscalização (Dias, 2019; Kitchener et al., 2017; Münzberg, Hass, Dinh Duc Khanh, & Reich, 2017; Racey, 2019).

Ademais, Racey (2019) aponta como relevante, quando fala da escolha do material a se utilizar como padrão de referência, observar se a composição do mesmo é similar àquela que estará presente no material a ser avaliado, dado que a turbidez é um parâmetro utilizado em uma extensa variedade de aplicações e, em cada caso, a natureza das partículas da solução é um fator determinante na precisão dos registros do sensoriamento. Não é possível, nesse

sentido, estabelecer uma relação entre os materiais da formazina e aqueles que estarão presentes no meio aquático.

Racey (2019) teve como um dos objetivos de seu trabalho a busca e a testagem de materiais que pudessem vir a substituir a formazina como padrões de calibração da turbidez, de modo que fossem estáveis, solúveis em água, de sintetização simples e apropriados para aplicações não industriais e de baixa escala. Em seu trabalho, duas das suas soluções são facilmente manipuláveis: o cloreto de sódio (NaCl) iodado (sal de cozinha) e o não-iodado (sal sem iodo). Ademais, o seu enfoque residuiu no intervalo de 1 a 100 NTU, em razão da aplicação em tecnologias adequadas ao controle da qualidade da água.

Metodologia

Dada a fundamentação adquirida por meio da revisão bibliográfica realizada neste trabalho, utilizou-se um dos equipamentos referidos na literatura como base para a construção da arquitetura objetivada ("TS-300B"). Da mesma maneira, em razão de se obter leituras precisas e abordar um método inovador de calibração utilizando recursos simples e de baixo custo, buscou-se aplicar duas das soluções de Racey (2019).

Calibração

De forma a construir as curvas de calibração para as duas formas do NaCl, Racey (2019) diluiu medidas do

soluto em frações de água deionizada separadas em amostras que, uma após a outra, foram mensuradas e associadas por meio da comparação com dissoluções de formazina e de um turbidímetro calibrado. Os resultados da experimentação utilizando o sal iodado estão expostos no Gráfico 1.

Em razão de iniciar a experimentação com os dados referentes ao sal iodado, fez-se uso da ferramenta online WebPlotDigitizer (Rohatgi, 2020), que proporcionou a estimação dos valores dos pontos do Gráfico 1, dados que não foram disponibilizados pelo autor. Dispondo dos mesmos, repetiu-se o experimento descrito no artigo para o preparo de uma solução proporcional à 1g de sal iodado para 4ml de água deionizada (da marca Tulipa) que, em Racey (2019), teve o nível de turbidez identificado como de aproximadamente 105 NTU. De posse do módulo sensor "TS-300B" e da placa "MJKDZ", realizou-se a medição da solução em sua concentração inicial e em diluições reduzidas em intervalos de 10%, totalizando 10 amostras e uma adicional sem soluto (ou seja, em g/ml: 0.25; 0.225; 0.2; 0.175; 0.15; 0.125; 0.1; 0.075; 0.05; 0.025 e 0), conforme o realizado pelo autor supracitado, para verificar o nível de tensão aferido em cada uma pelo módulo sensor "TS-300B". O trecho do experimento que mais esteve próximo do comportamento esperado para o sensor de turbidez da água se encontra descrito no Quadro 1.

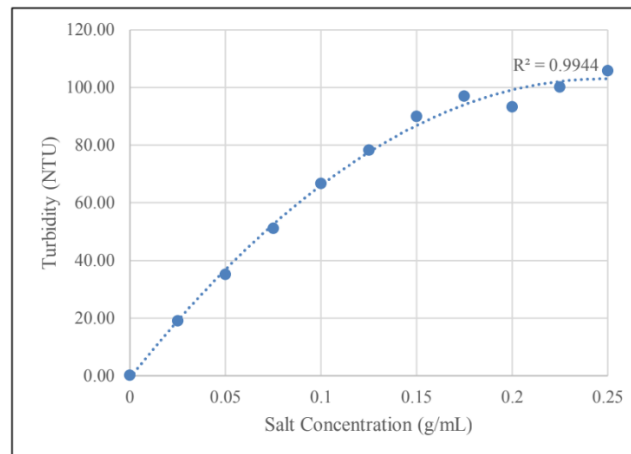


Gráfico 1. Diagrama de dispersão que expõe a relação entre a turbidez (NTU) e a concentração de sal iodado (g/ml), com curva obtida por regressão quadrática.

Fonte: Racey (2019)

É possível analisar, no Quadro 1, que a tensão cai progressivamente à medida que a concentração do soluto aumenta. Contudo, na amostra com 0.15 g por mililitro de água deionizada, o valor da tensão sobe de maneira repentina e aparenta diminuir novamente nas amostras seguintes. Tal comporta-

mento guarda relação com a baixa concentração do soluto na água, dado que o sal se dissolve rapidamente nas concentrações antes descritas, além dos limites de precisão do sensor na detecção de diferenças demasiado sutis entre uma amostra e outra.

Dissolução de sal iodado (g/ml)	0	0.025	0.05	0.075	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
Tensão média (V)	3.64	3.61	3.51	3.41	3.37	3.28	3.7	3.54	3.68	3.6	3.59

Quadro 1. Dados obtidos a partir do sensor que relacionam as dissoluções de sal iodado com as suas respectivas saídas médias de tensão.

Fonte: Autor

Ademais, em virtude da preocupação quanto à precisão dos valores para o sal iodado obtidos pela ferramenta online *WebPlotDigitizer*, seguiu-se a experimentação com os valores referentes ao sal não-iodado. Os dados dessa experimentação, ou seja, os valores em

NTU para cada dissolução do soluto, a despeito do caso do sal iodado, foram descritos em um quadro disponível em apêndice no artigo de Racey (2019). Tais dados são descritos a seguir: às concentrações de cloreto de sódio (em g/mL) 0.1, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.05, 0.04, 0.03,

0.02, 0.01 e 0 associaram-se, respectivamente, os valores da turbidez (em NTU) 99.5, 101.98, 92.45, 82.02, 71.83, 61.03, 50.13, 38.3, 26.15, 12.95 e 0.12. Descreveu-se, neste, a dissolução de 1g de soluto em 10 ml de água e a produção de amostras diluídas em intervalos de 10% partindo da original. Em gráfico semelhante ao Gráfico 1, no artigo, expõem-se os resultados com o primeiro

dado (0.1 g/ml – 99.5 NTU) removido para que se fosse possível obter uma curva com coeficiente de determinação (R^2) igual a 1, construída por meio de regressão quadrática.

Foi realizado um experimento a partir dos dados concernentes ao sal não iodado, os quais são expostos no Quadro 2.

Dissolução de sal não iodado (g/ml)	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
Tensão média (V)	3.655	3.645	3.66	3.64	3.64	3.585	3.62	3.58	3.585	3.605	3.65

Quadro 2. Dados obtidos a partir do sensor, relacionando as dissoluções de sal não iodado com as suas respectivas saídas médias de tensão.

Fonte: Autor

De modo a obter uma curva de calibração para o sensor de turbidez a partir dos dados do Quadro 2, foram utilizadas a regressão linear (de primeiro grau) e quadrática, empregadas em Racey (2019), além da composição de funções para obter uma aplicação matemática capaz de associar valores de tensão (em Volts) a valores referentes à turbidez (em NTU).

A partir dos dados apresentados no Quadro 2, em seguida da adequação dos mesmos ao cálculo descrito a seguir (Equações 1), como realizado em Racey (2019), é possível extrair relações determinadas pelo procedimento estatístico denominado regressão. O objetivo desta é compreender e ilustrar o grau de relacionamento entre dois conjuntos de dados e, a partir dele, determinar

uma equação (a qual gera a curva da regressão) que seja a melhor capaz de explicar essa relação. Para este trabalho, foi utilizado o modelo de regressão linear (determinação de uma função do primeiro grau) e o de regressão quadrática (estabelecimento de uma função quadrática, ou do segundo grau) através do método dos mínimos quadrados (Devore, 2011). Estes métodos, em Racey (2019), foram utilizados para determinar as curvas, como a ilustrada no Gráfico 1. De maneira a demonstrar se as curvas de fato explicam, com o mínimo de erro possível, a variação de um dos conjuntos de dados (y) a partir do outro (x), é calculado o coeficiente de determinação (R^2) que indica a proporção da variação do termo dependente (y) que pode ser explicada pelo modelo;

sendo um número que varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, mais o mo-

delo explica a variação dos dados (Asuero, Sayago, & González, 2006; Devore, 2011).

Regressão Linear (A)

$$\hat{y} = ax + b$$

$$a = \hat{a} = \frac{\sum xi \sum yi - n \sum xi yi}{(\sum xi)^2 - n \sum xi^2}$$

$$b = \hat{b} = \frac{\sum xi \sum xi yi - \sum xi^2 \sum yi}{(\sum xi)^2 - n \sum xi^2}$$

(R² ou R-quadrado) (B)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (yi - \hat{y})^2}{\sum (yi - \bar{y})^2}$$

$$= 1 - \frac{\sum [yi - (\hat{b} + \hat{a}xi)]^2}{\sum yi^2 - (\sum yi)^2/n}$$

Regressão Quadrática (C)

$$\hat{y} = ax^2 + bx + c$$

$$\begin{cases} a \sum xi^2 + b \sum xi + nc = \sum yi \\ a \sum xi^3 + b \sum xi^2 + c \sum xi = \sum xi yi \\ a \sum xi^4 + b \sum xi^3 + c \sum xi^2 = \sum xi^2 yi \end{cases}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum yi}{n}$$

$$\sum xi = \sum_{i=1}^n xi$$

n – número de elementos do conjunto
xi – *i*-ésimo termo independente do *i*-ésimo ponto (*xi*, *yi*) do conjunto

Equações 1. Equações para o cálculo da regressão linear e quadrática e do coeficiente de determinação.

Fonte: Asuero et. al (2006); Devore (2011); PlanetCalc LLC

Consequentemente, foram obtidas as seguintes equações: a primeira, calculada por Racey (2019) com base nas leituras do sal não iodado, foi obtida por meio de regressão quadrática, com um valor de R² igual a 1; em segundo lugar, o conjunto de curvas (computadas por meio das Equações 1) e, respectivamente, as suas equações, foi obtido por meio de regressão linear e de regressão quadrática. A primeira equação tem como variável independente a quantidade de soluto por mililitro de água (em g/ml) e a dependente associada aos valores da turbidez em NTU, enquanto que as segundas equações

têm como variável independente a tensão (em Volts) e a dependente representada pela independente da primeira equação (soluto por mililitro, em g/ml).

Em virtude da obtenção de uma função capaz de associar valores de tensão do sensor (em Volts, pela variável independente *x*) à valores da turbidez (em NTU, pela variável dependente *y*), aplicou-se o conceito de composição de funções, obtido do cálculo numérico. Na composição, duas funções, *g(a)* (de domínio A e imagem B) e *f(b)* (de domínio B e imagem K), dado que *g* possui a imagem equivalente ao domínio de *f*, são compostas para obter uma função *h*

(conhecida como f o g) que detém o domínio de g e a imagem de f (Stewart, 2011). Tal abordagem é de interesse, pois, como exibido acima, a equação de Racey (2019) tem o domínio expresso pelo intervalo das diluições em g/ml e a imagem pelo intervalo das leituras em NTU ($f: \text{g/ml} \rightarrow \text{NTU}$). As equações obtidas na experimentação tem o domínio no intervalo das tensões em Volts e a imagem no das dissoluções em g/ml ($g: \text{V} \rightarrow \text{g/ml}$). Enquanto, por fim, a equação objetivada deve ter o domínio no intervalo de tensões em Volts e a imagem no das leituras em NTU ($h: \text{V} \rightarrow \text{NTU}$), o que, por meio da composição de funções, pôde ser alcançado.

Posteriormente, uma curva disponibilizada por um revendedor do equipamento foi adicionada para fins de teste adicional.

Arquitetura da Solução

Foi utilizada uma placa *Arduino UNO* para a alimentação, recebimento e manipulação inicial dos dados do sensor, o qual foi conectado a uma placa *NodeMCU ESP-12E* para o envio dos dados calculados pelas curvas, e do nível de tensão respectiva, para a Internet (como ilustrado na Figura 3). Os dados foram agregados e disponibilizados no *framework dojot*, uma plataforma nacio-

nal e de código aberto para o desenvolvimento de soluções no campo da Internet das Coisas, com gerenciamento de dispositivos, visualização em tempo real e de interface para acesso aos dados e persistência dos mesmos.

Em Trevathan et al. (2020) e em Trevathan e Johnstone (2018), é observada a necessidade da construção de um aparato de vedação que permita ao sensor operar debaixo d'água, em razão da medição da turbidez em locais com profundidades diversas (dado que o sensor não é impermeável na parte superior) e com isolamento luminoso, pois o sensor de turbidez opera com um transmissor e um receptor infravermelho, que são afetados significativamente pela presença da luz.

No presente trabalho o processo de vedação do sensor e, em adição, a montagem da proteção do circuito do sistema, foram realizados da seguinte maneira: o encapsulamento plástico da sonda foi isolado do meio aquático através do seu encaixe em um tubo de PVC modelado e vedado pela disposição de camadas externas de fita de auto fusão e da aplicação de silicone acético, interna e externamente ao tubo; o circuito com as placas *Arduino* e *NodeMCU* foi isolado por uma caixa hermeticamente fechada.

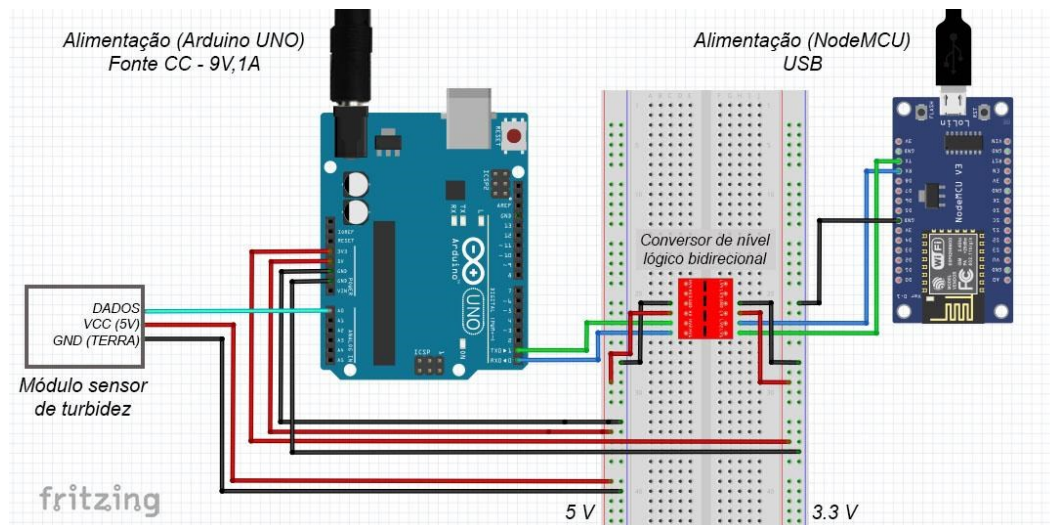


Figura 3. Diagrama da arquitetura do circuito do sistema. Desenvolvido na plataforma Fritzing

Fonte: Autor

Experimentação

Para se avaliar a solução proposta, seguiu-se um cronograma de verificação em ambiente controlado na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Foi preparado um ambiente miniaturizado, protegido da luz solar e dotado de um tanque com meio aquático submetido a condições semelhantes às de uma criação convencional de organismos aquáticos, com aeração constante e disposição de matéria orgânica (ração) em intervalos regulares (como ilustra a Figura 4).

A placa *Arduino*, como supracitado, alimentou o sensor de turbidez (colocado na ponta inferior do tubo de PVC)

e recebeu do mesmo os valores de tensão aferidos na água submetida a diferentes estados de transparência. A tensão foi, a cada leitura, adotada como argumento para as quatro funções internas do seu código fonte que, como resultado, retornaram, cada uma, seus respectivos valores de turbidez. De modo a observar quando os valores da tensão estivessem fora dos intervalos de cada curva de calibração, adicionou-se um dado de “alerta”, que enviou uma informação extra à Internet (plataforma online *dojot*) sempre que a tensão não esteve dentro do intervalo de domínio das curvas.



Figura 4. Aparência externa do corpo do sistema de monitoramento da turbidez da água e a sua disposição no tanque para experimentação.

Fonte: Autor

Cada um dos dados gerados na placa *Arduino* foram, então, repassados para uma placa *NodeMCU* para serem enviados, em formato JSON e com o uso da tecnologia Wi-Fi, para a plataforma *dojot*, conforme ilustra a Figura 5. Nesta figura observa-se no centro, mais à esquerda, dois gráficos (o primeiro para as quatro curvas e o segundo para a curva da equação obtida com o revendedor do sensor) e, à direita, uma tabela com os valores respectivos de cada ponto, em NTU.

O experimento ocorreu no intervalo de 15 dias com o sistema ativo, em primeiro momento, durante o dia e, posteriormente, de forma constante. No segundo intervalo, testou-se a vedação a longo prazo, mantendo-se o sensor em operação ininterrupta.

Resultados e Discussão

Em se tratando da parte física (*hardware*) do sistema, o comportamento esteve de acordo com o esperado. A montagem do circuito com a placa *Arduino*, a placa *NodeMCU* e a definição da ponte serial (a qual permite o envio de dados de uma placa para a outra, em sincronia com a taxa de velocidade da transmissão de dados, ou *baud rate*) para a sua interconexão é relativamente simples. Com respeito a parte lógica (*software*): a configuração do *Arduino* calculou os valores das curvas de calibração e os encaminhou para o *NodeMCU*, o qual os enviou em formato JSON para o servidor da *dojot* na Internet cada 10 segundos. Não houve problemas com a parte física enquanto esteve ativa, assim como a plataforma *dojot*, que persistiu e exibiu os dados em visualizações gráficas atualizadas em tempo real.

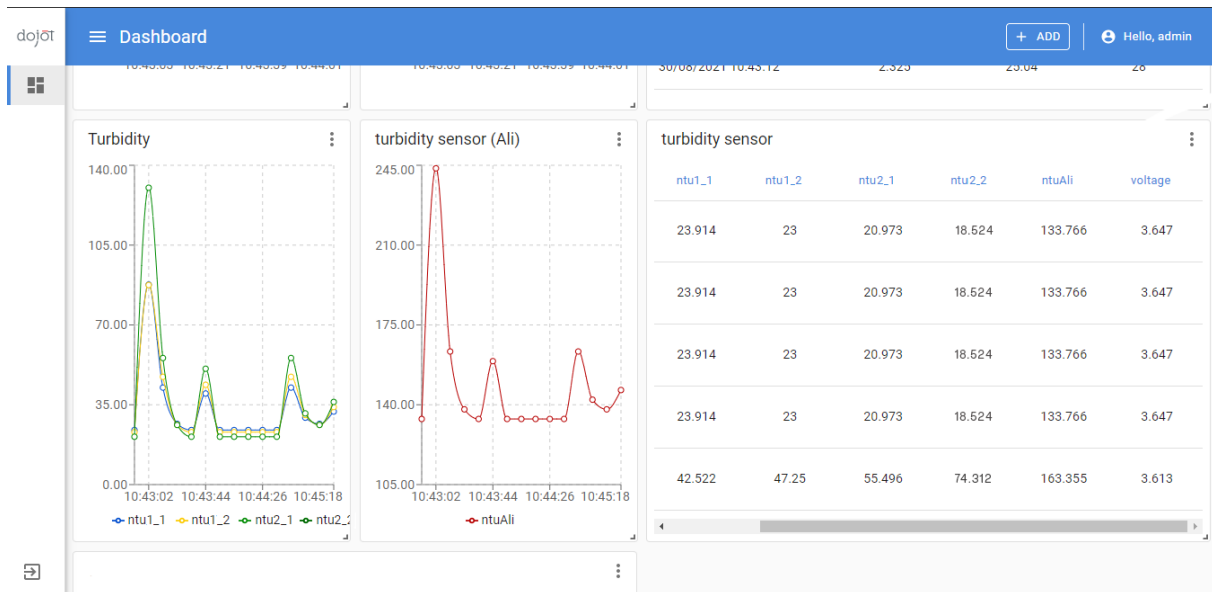


Figura 5. Visualização dos dados em tabelas e gráficos (*dashboard*) na plataforma *dojot*.
Fonte: Captura do autor de tela na plataforma *dojot*

A vedação do equipamento permitiu que o mesmo se mantivesse impermeável, com relação à placa do circuito da sonda do equipamento, no intervalo da experimentação da pesquisa. Foi observado que a vedação, quando exposta a longos períodos no ambiente, reteve em sua superfície as substâncias dissolvidas do meio (a matéria orgânica utilizada para a simulação de um ambiente real).

Com respeito à sujidade, foi verificado o comentário de Trevathan et al. (2020) acerca da facilidade com que o material plástico do encapsulamento do sensor se liga aos sólidos dissolvidos no ambiente. Tal fato, em consequência, interfere na leitura do equipamento, dado que menos luz é transmitida e, igualmente, captada, quando em passagem através do material plástico da sonda. Ou seja, os valores da turbidez aferidos

pelo sensor podem se apresentar significativamente mais elevados. Para evitar esse problema se foi necessário, diariamente, remover o sensor do ambiente aquático e realizar a limpeza manualmente, removendo a sujeira da parte do encapsulamento por onde passa o feixe de luz emitido pelo sensor.

Outro ponto de discussão é o da configuração do ambiente. Foram obtidos, através do Departamento de Pesca e Aquicultura (DPAq) da UFRPE, um tanque miniaturizado (para uso de cerca de 50 litros da sua capacidade), aeradores e material orgânico (composto de ração para peixes) para simular um ambiente de criação sem a presença de animais. O material orgânico disposto na água em intervalos regulares (cerca de duas vezes por dia) foi capaz de propiciar mudanças sensíveis

nos valores da turbidez, as quais foram captadas pelo sensor.

O Gráfico 2 apresenta o sensoria-
mento da turbidez logo após procedi-

mento de sifonagem (retirada do ex-
cesso de matéria orgânica retida no tan-
que), com queda na turbidez apontada
pelas curvas de calibração configuradas
no sensor.

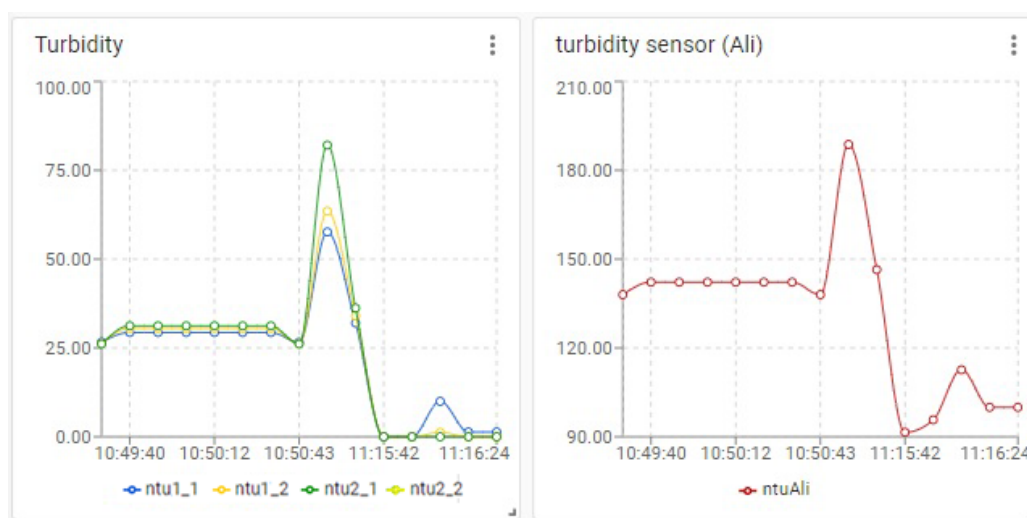


Gráfico 2. Curvas de sensoriamento de turbidez

Fonte: Corte de captura feita pelo autor de tela na plataforma *dojot*.

No fim do experimento, para a va-
lidação da pesquisa, as leituras do sen-
sor de turbidez foram avaliadas por in-
termédio do turbidímetro de bancada
ORBECO-HELLIGE (modelo 966) que,
em sua leitura, informou o valor de 3.5

NTU. As leituras retornadas por cada
variável do sensor (ou seja, cada curva
calculada pelo equipamento) no ins-
tante da leitura do turbidímetro são in-
formadas no Quadro 3.

Variáveis do sensor	Valor aferido
1ª curva (NTU1_1)	15.612
2ª curva (NTU1_2)	10
3ª curva (NTU2_1)	5.023
4ª curva (NTU2_2)	4.437
5ª curva (NTUAli)	121.085

Quadro 3. Valores calculados pelas curvas de calibração do sensor no instante da aferição do
turbidímetro ORBECO-HELLIGE

Fonte: Autor

Observa-se que os valores das quatro primeiras curvas, em especial os da 3ª e 4ª curvas, calculadas a partir das funções discutidas na Metodologia e obtidas por regressões quadráticas (com valor de R^2 mais próximo de 1), estiveram mais próximos da leitura aferida pelo equipamento padrão, com uma diferença relativamente pequena. Contudo, apesar da proximidade neste instante, com o equipamento, há necessidade de avaliação por um maior tempo para verificação da sua acurácia e em razão de obter a validação das curvas encontradas a partir do NaCl para o sensor de turbidez.

Considerações Finais

Pode-se afirmar que o sistema, como um todo, comportou-se de maneira satisfatória, indicando as variações da turbidez da água nos momentos em que esta foi alterada por influências externas, realizadas artificialmente para a avaliação do sistema. Com respeito à calibração do sensor em comparação aos equipamentos de bancada, no momento da verificação com o dispositivo padrão, o turbidímetro, os resultados estiveram próximos do seu valor determinado. Analisando o sistema, é possível verificar que a sua aplicação é concebível em ambientes que demandem o monitoramento constante da turbidez da água, observando: a matéria em dissolução e acúmulo na água; o grau de precisão exigido do sensor e a faixa recomendada para o ambiente; a presença de dispositivos de conexão

para o envio dos dados do sensor para a plataforma de visualização, além do fornecimento estável de energia; e a natureza da criação.

Com respeito ao tipo da matéria em suspensão na água, é importante levar em conta que o encapsulamento original do sensor pode se ligar facilmente às partículas presentes no meio e, a depender das mesmas, existe a necessidade da limpeza regular do equipamento. Uma solução para contornar esse problema é adotar um material diverso ao empregado originalmente para o sensor, como também para a sua vedação e proteção da incidência de luz externa. Trabalhos futuros podem ser capazes de realizar esse empreendimento e avaliar a aderência de sujeira ao material empregado.

A turbidez por meio do módulo sensor "TS-300B" é calculada a partir do grau de intensidade de luz que sai do emissor e chega ao fotorreceptor, de maneira que os dados aferidos foram enviados a uma placa controladora, *Arduino*, a qual detém um conversor ADC (Conversor Analógico-Digital) com resolução de 10 bits, em um valor na faixa de resolução do seu ADC (no caso da *Arduino*, um valor de 0 a 1023) para, em seguida, ser mapeado em um valor de tensão (de 0 a 5V). A precisão do sensor está limitada ao intervalo da saída analógica da placa *Arduino* (0 a 1023), de modo que a adoção de uma placa com uma resolução maior permite aumentar a acurácia de leitura do equipamento de medição. Como cada aplicação exige um grau de precisão específico e possui

suas respectivas faixas adequadas de turbidez, a escolha de dispositivos mais apropriados dependerá, portanto, da finalidade do sistema.

No caso da presente pesquisa, o envio dos dados foi realizado utilizando Wi-Fi, o que pode ser inviável em outros cenários. A depender dos mesmos, estudos posteriores podem abordar o uso da tecnologia GPRS (padrão de comunicação para dispositivos móveis), Bluetooth, Lora, ou até mesmo o uso de armazenamento local de dados em cartões de memória.

Como trabalhos futuros, adotando as medidas necessárias, se sugere manter o sistema em operação dentro de ambientes de aquicultura e, principalmente, de criação intensiva, com altas taxas de organismos por metro cúbico de água. Desta forma, será possível visualizar a resistência do dispositivo ao meio e a necessidade de investimentos posteriores em termos de isolamento do sensor, reforço na vedação, melhora na calibração, disposição do circuito com relação aos tanques, conectividade e controle das variáveis do sistema pelo usuário final.

Referências

- Arana Obra, J. (2020). *Analizador de agua conectado a IOT*.
- Associação Brasileira de Criadores de Camarão (2010). *APOSTILA TÉCNICA DE BOAS PRÁTICAS DE MANEJO PARA CAPACITAÇÃO DE PEQUENOS PRODUTORES DE CAMARÃO, ENVOLVENDO: 1 – CULTIVO DO Litopenaeus vannamei EM BERÇÁRIOS PRIMÁRIOS, SECUNDÁRIOS E CERCOS; 2 – CULTIVO DO Litopenaeus vannamei EM VIVEIROS DE ENGORDA; 3 – BI-OSSEGURANÇA PARA FAZENDAS DE CRIAÇÃO DE CAMARÕES*. Natal, RN: Autor.
- Associação Brasileira de Criadores de Camarão (2020). *Produção Brasileira de Camarão Marinho Cultivado*. Natal, RN. Recuperado de <https://abccam.com.br/2020/10/producao-brasil-eira-de-camarao-marinho-cultivado/>. Autor.
- Asuero, A. G., Sayago, A., & González, A. G. (2006). *The correlation coefficient: An overview*. Critical reviews in analytical chemistry, 36(1), 41-59.
- Chandrappa, S., Dharmanna, L., UV, S. S. B., Sudeeksha, C. M., Suraksha, M. N., & Thrupthi, S. (2017). *Design and development of IoT device to measure quality of water*. International Journal of Modern Education and Computer Science, 9(4), 50.
- Devore, J. L. (2015). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage Learning.
- DFRobot. *Turbidity Sensor SKU SEN0189*. Recuperado de https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189.
- Dias, Caroline de Boer (2019). *DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE TURBIDÍMETRO DE BAIXO CUSTO*. In XXIII SBRH - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23.

Foz do Iguaçu: Abrhidro, 2019. Recuperado de <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5790>.

Epik Electronics. *TS 300B 3.3-5v Turbidity Transducer Water Turbidity Module Mixed Water Detection Module Turbidity Sensor Module Liquid For Arduino*. Recuperado de <https://epikelectronics.com/product/ts-300b-3-3-5v-turbidity-transducer-water-turbidity-module-mixed-water-detection-module-turbidity-sensor-module-liquid-for-arduino>.

Fondriest Environmental INC (2014). "Measuring Turbidity, TSS, and Water Clarity." *Fundamentals of Environmental Measurements*. Recuperado de <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/measurements/measuring-water-quality/turbidity-sensors-meters-and-methods/>.

Helal, A. A., Júnior, R. C., da Cunha Garcia, F., Barroso, G. F., & da Silva Vilaça, R. (2018, July). EstAcqua: Proposta de solução integrada de Hardware, Software e Internet das Coisas para monitoramento ambiental. In *Anais do XLV Seminário Integrado de Software e Hardware*. SBC.

Kasnir, M., Harlina, R., & Rosmiati, R. (2014). *Water quality parameter analysis for the feasibility of shrimp culture in Takalar Regency, Indonesia*. *Journal of Aquaculture Research & Development*, 5(6), 5-7.

Kitchener, B. G., Wainwright, J., & Parsons, A. J. (2017). *A review of the principles of turbidity measurement*. *Progress in Physical Geography*, 41(5), 620-642.

Muchtar, E., Sanjaya, E., & Hariadi, F. I. (2017, October). *Human machine interface on e-Shrimp as smart control system for whiteleg shrimp pond*. In 2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD) (pp. 24-29). IEEE.

Münzberg, M., Hass, R., Dinh Duc Khanh, N., & Reich, O. (2017). *Limitations of turbidity process probes and formazine as their calibration standard*. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 409(3), 719-728.

PlanetCalc LLC. *Aproximação de função com análise de regressão*. Recuperado de <https://pt.planetcalc.com/5992/>. Autor.

Probots. *Turbidity Sensor Module for Water Quality Test TS-300B*. Recuperado de <https://www.probots.co.in/ts-300b-turbidity-sensor-module-mixed-water-detection-module-water-quality-test-turbidity-transducer-dc-5v.html>. Autor.

Racey, J. D. (2019). *Development of Novel Turbidity Calibration Standards and Methodologies Using Appropriate Technology* (Doctoral dissertation, Purdue University Graduate School).

Rohatgi, Ankit (2020). *WebPlotDigitizer: web based tool to extract data from plots, images and maps*. Versão 4.4. Pacifica, Califórnia, EUA. Recuperado de <https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>. Autor.

Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (2017). *Camarão marinho: preparação do viveiro, povoamento, manejo e despesa / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR)*. Brasília, DF: Autor.

Setiyawan, A., Hikmah, N., & Marzuki, I. (2020). *Prototype Alat Untuk Mengukur pH, Suhu, Dan Kadar Kekeruhan Air Tambak Untuk Budidaya Udang Vaname (Litopenaeus Vannamei) Menggunakan Arduino Uno*. Jurnal Informatika Upgris, 6(2).

Shetty, S., Pai, R. M., & Pai, M. M. (2018). *Design and implementation of aquaculture resource planning using underwater sensor wireless network*. Cogent Engineering, 5(1), 1542576.

Sousa, D., Hernandez, D., Oliveira, F., Luís, M., & Sargento, S. (2019). *A platform of unmanned surface vehicle swarms for real time monitoring in aquaculture environments*. Sensors, 19(21), 4695.

Stewart, J. (2011). *Cálculo*. 6a edição. São Paulo: Cengage Learning, v1.

Trevathan, J., & Johnstone, R. (2018). *Smart environmental monitoring and assessment technologies (SEMAT)—A new paradigm for low-cost, remote aquatic environmental monitoring*. Sensors, 18(7), 2248.

Trevathan, J., Read, W., & Schmidtke, S. (2020). *Towards the development of an affordable and practical light attenuation turbidity sensor for remote near real-time aquatic monitoring*. Sensors, 20(7), 1993.

TS-300B Turbidity sensor environmental monitoring sewage turbidity value detection module water quality sensor. Recuperado de https://pt.aliexpress.com/item/1005002911663549.html?spm=a2g0o.product-list.0.0.303f238cEJ12sA&algo_pvid=6f42569b-f1b3-4fc7-8d1b-c650cb39c16d&algo_exp_id=6f42569b-f1b3-4fc7-8d1b-c650cb39c16d-12. Autor.

Wang, Y., Rajib, S. S. M., Collins, C., & Grieve, B. (2018). *Low-cost turbidity sensor for low-power wireless monitoring of fresh-water courses*. IEEE Sensors Journal, 18(11), 4689-4696.

Ziegler, A. C. (2002, April). *Issues related to use of turbidity measurements as a surrogate for suspended sediment*. In Turbidity and other sediment surrogates workshop (Vol. 30).

Esta pesquisa recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e apoio dos Departamentos de Computação (DC) e de Pesca e Aquicultura (DPAq) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Eduardo Felipe Lima Lins de Almeida (eduardo.limalins@ufrpe.br) ajudou na realização da pesquisa.

Obionor de Oliveira Nóbrega (obionor.nobrega@ufrpe.br) ajudou na realização da pesquisa.

Fábio Alves de Freitas (fbio.alves095@gmail.com) ajudou na realização da pesquisa.

Configurações Alfredo Olivera Gálvez (alfredo.galvez@ufrpe.br) ajudou na realização da pesquisa.

Fernando Antônio Aires Lins (fernandoaires@ufrpe.br) ajudou na realização da pesquisa.

Data de Submissão: 27/12/2022 Data de Aprovação: 01/06/2023

Editor-Chefe: André Luiz Maranhão de Souza-Leão.

Editor Adjunto: Bruno Melo Moura.

Editores da submissão: Denis Silva da Silveira e Jairo Simião Dornelas.

Esta obra está licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY NC 4.0). Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original. Texto da licença: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.pt_BR.