

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curso de Engenharia Eletrônica

Hector Vinícius Ribeiro Dallanora

Análise de turbidez de líquidos por meio de
sensores infravermelhos

Toledo
2025

Hector Vinícius Ribeiro Dallanora

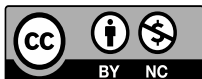
Análise de turbidez de líquidos por meio de sensores infravermelhos

Analysis of turbidity of liquids using infrared sensors

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador(a) Prof. Felipe Walter Dafico Pfrimer

Toledo
2025



4.0 Internacional

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho licenciado para fins não comerciais, com crédito atribuído ao autor. Os usuários não têm que licenciar os trabalhos derivados sob os mesmos termos estabelecidos pelo autor do trabalho original.

Hector Vinícius Ribeiro Dallanora

Análise de turbidez de líquidos por meio de sensores infravermelhos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Toledo, 04 de dezembro de 2023:

Prof. Felipe Walter Dafico Pfrimer
UTFPR-TD
Orientador(a)

Prof. Marcos Roberto Bombacini
UTFPR-TD

Prof. José Dolores Vergara Dietrich
UTFPR-TD

Toledo
2025

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso

Dedico esse trabalho à minha família que sempre me apoiou, aos amigos que me ajudaram quando precisei, aos professores que me ajudaram durante a realização deste projeto e a Deus, pelas bênçãos e discernimentos nos momentos que mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família por todo apoio dado durante esses anos de estudo. Agradeço também à minha noiva, além de passar horas estudando comigo, buscava me acalmar quando a ansiedade pré prova me prejudicava. Palavras de apoio, quando não se alcança o objetivo, te motivam a seguir firme dedicar-se ainda mais para um novo semestre que virá.

Gratifico também a todos professores que fizeram parte de meu processo de formação acadêmica, principalmente ao professor Felipe Walter Dafico Pfrimer, meu orientador, pelos ensinamentos e conselhos dados durante os dois últimos semestres, almejando meu melhor desempenho.

Agradeço ainda a todos meus colegas de classe, pelos grupos de estudo, para que pudéssemos nos ajudar na compreensão de matérias vistas em sala. Gratifico ainda ao professor Edson Tavares de Camargo por fornecer o turbidímetro utilizado como referência para calibração do projeto desenvolvido para este trabalho e ao Felipe Camargo por me auxiliar no manuseio do mesmo.

E finalmente, agradeço a Deus, pelo dom da vida e saúde que me proporciona a cada novo dia.

RESUMO

A qualidade e potabilidade da água está diretamente ligada à sua turbidez, tendo em vista que, a água que chega até o consumidor final é cristalina, ou seja, incolor. Para fins de potabilidade a água deve apresentar turbidez menor que 1 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). A transparência da água remete ao fato de ela estar pronta para o consumo, pois devido à cor avermelhada do solo e à alta taxa de chuvas na região, torna a água do oeste paranaense mais turva. O objetivo deste trabalho foi a construção de um sensor de turbidez confiável, melhor dizendo, um sensor que apresente baixa taxa de erros (até 5%), para isso, foi utilizado um método alternativo, que consiste em adicionar leite em amostras de água filtrada, gerando diferentes concentrações. As amostras criadas também passaram por medições com o turbidímetro convencional, para assim estabelecer a curva que relaciona ambas medições. Contudo, mesmo com o uso do leite para criar as amostras lidas pelos dois turbidímetros, o convencional ainda utiliza a formazina para sua calibração.

Palavras-chave: Água; Calibração; Métodos alternativos; Turbidez.

ABSTRACT

The quality and potability of water is directly linked to its turbidity, considering that the water that reaches the final consumer is crystal clear, that is, colorless. For potability purposes, water must have a turbidity of less than 1 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). The transparency of the water refers to the fact that it is ready for consumption, as due to the reddish color of the soil and the high rate of rainfall in the region, it makes the water in western Paraná more turbid. The objective of this work was to build a reliable turbidity sensor, in other words, a sensor that presents a low error rate (up to 5%), for this, an alternative method was used, which consists of adding milk to water samples filtered, generating different concentrations. The samples created also underwent measurements with a conventional turbidimeter, to establish the curve that relates both measurements. However, even with the use of milk to create the samples read by the two turbidimeters, the conventional one still uses formazin for calibration.

Keywords: Water; Calibration; Alternative methods; turbidity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença entre a análise da nefelometria e turbidimetria	12
Figura 2 – Diferença entre vidro com e sem película	13
Figura 3 – Diferença entre vidro fosco e transparente	14
Figura 4 – Análise da transparência da água (disco de Secchi)	15
Figura 5 – Modelo estrutural para os sensores infravermelhos utilizado no trabalho de Oliveira et al. (2021)	15
Figura 6 – Protótipo do sistema de monitoramento da qualidade da água desen- volvido por Targino et al. (2021)	16
Figura 7 – Diferença entre as técnicas de turbidimetria e nefelometria	17
Figura 8 – Tubo de turbidez	18
Figura 9 – Turbidímetro convencional Hanna HI-9829	19
Figura 10 – Vista superior da estrutura onde foi instalada os sensores infraverme- lhos	20
Figura 11 – Vista lateral da estrutura que comporta os sensores	21
Figura 12 – Ilustração do sistema de monitoramento de turbidez desenvolvido . . .	21
Figura 13 – Ilustração do circuito para controle de corrente no emissor	22
Figura 14 – Foto do sistema de monitoramento de turbidez desenvolvido	23
Figura 15 – Foto ilustrativa do microcontrolador Esp 32 utilizado no trabalho . . .	23
Figura 16 – Indicação dos DACs do ESP 32	24
Figura 17 – Amostras utilizadas na calibração	26
Figura 18 – Gráfico de dispersão para encontrar a relação entre as medições	27
Figura 19 – Seringa e conta gotas	28
Figura 20 – Diferença entre as medições dos dois turbidímetros	30
Figura 21 – QR code	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivo	10
1.2.1	Objetivos Específicos	11
1.3	Estrutura do Trabalho	11
2	TURBIDEZ	12
2.1	Ferramentas para medição de turbidez	14
2.2	Fundamentos teóricos	16
2.2.1	Nefelometria	16
2.2.2	Turbidimetria	17
2.2.3	Tubo de turbidez	17
2.3	Calibração de um turbidímetro	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Calibração	24
3.2	Materiais Utilizados	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32
	APÊNDICE A – REPOSITÓRIO	34

1 INTRODUÇÃO

A turbidez é uma propriedade óptica que indica a quantidade de partículas em suspensão em um fluido, ou seja, na medida em que a presença dessas partículas aumenta, mais turvo fica o líquido. De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2017), “A turbidez é a medida do grau de interferência à passagem de luz através do líquido”. Segundo Minella et al. (2008), há duas formas de medir a turbidez, sendo essas, a turbidimetria e a nefelometria.

A turbidimetria mede a luz que passa pelo meio líquido, enquanto a nefelometria mede a luz que é dispersa pelo meio líquido em diferentes ângulos. A turbidimetria é o método mais comum e simples de ser utilizado, mas é menos sensível a pequenas variações de turbidez. A nefelometria é um método mais sensível e preciso, mas requer um aparelho mais complexo e caro. A escolha do método depende do objetivo e do contexto da medição da turbidez.

Sobre a turbidez das águas dos rios brasileiros é possível afirmar que:

Grande parte das águas de rios brasileiros é naturalmente turva em decorrência das características geológicas das bacias de drenagem, ocorrência de altos índices pluviométricos e uso de práticas agrícolas, muitas vezes inadequadas (FUNASA, 2017, p. 19).

Dessa forma, é indispensável o tratamento e a análise da qualidade da água que chegará ao consumidor final. Por isso, o Ministério da Saúde disponibilizou o manual de controle da qualidade da água (FUNASA, 2017) a ser seguido pelos técnicos das Estações de Tratamento de Águas (ETAS), assegurando que, para fins de potabilidade, a turbidez deve ser inferior a 1 NTU (*Nephelometric Turbidity Units*).

Durante o processo de tratamento da água, um dos compostos químicos adicionados a ela, para eliminação de microrganismos, tais como bactérias, vírus e protozoários é o cloro. Dessa forma, a turbidez da água aumenta, e segundo a FUNASA (2017) pode chegar até 5 NTU. Portanto a criação de um turbidímetro de código aberto é importante para poder monitorar a qualidade da água, pois o cloro em excesso é prejudicial à saúde.

O turbidímetro, dispositivo responsável por medir a turbidez, assim como outros vários aparelhos utilizados em laboratório para analisar a qualidade da água, é de difícil operação e tem custo elevado (aproximadamente U\$ 4 mil, Instruments (2023)). Portanto, adquiri-lo para uso doméstico torna-se inviável. Dessa forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um turbidímetro de simples operação e baixo custo, composto apenas por dois sensores, um LCD (*Liquid Crystal Display*), um microcontrolador e um módulo micro SD para armazenar dados medidos pelos sensores.

Este projeto tem como tema central a criação de um dispositivo econômico que utiliza o método da turbidimetria para avaliar a quantidade de luz que atravessa um meio, mensurando especificamente a luz que não é dispersa. A importância dessa delimitação se dá pela necessidade de criar soluções acessíveis e eficientes para análises ópticas em diversos campos de atuação, como a análise da qualidade da água, por exemplo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A alta demanda por medidores de turbidez mais baratos surge devido ao custo proibitivo dos equipamentos convencionais, além das dificuldades associadas à aquisição de formazina - uma substância química tóxica que requer registro para compra e que é necessário para calibrar esses dispositivos. Diante desta realidade, diversos pesquisadores se empenharam no desenvolvimento de alternativas mais acessíveis e seguras para a medição da turbidez. A presente pesquisa, teve como foco métodos que poderiam ser facilmente aplicados em ambientes domésticos. Como resultado, foi possível conceber um turbidímetro de código aberto, cuja facilidade de uso e custo contrastam favoravelmente com as opções atualmente disponíveis no mercado.

Um benefício importante de possuir um turbidímetro doméstico é a capacidade de monitorar a qualidade da água consumida. O tratamento da água frequentemente aumenta a sua turbidez devido à adição de cloro, portanto, um dispositivo de monitoramento de uso doméstico poderia oferecer maior controle sobre a qualidade da água.

A relevância de um turbidímetro de baixo custo também se estende a outras áreas. Por exemplo, o setor de aquarismo - cujas exportações no Brasil atingiram U\$ 6,570 milhões em 2018, segundo a Embrapa (PET, 2022) - poderia se beneficiar da aplicação deste dispositivo. Um turbidímetro permitiria a análise regular da água do aquário, cuja clareza pode ser comprometida pela presença de algas. A monitorização constante poderia evitar o surgimento de problemas associados à alta turbidez da água e manter a saúde do aquário em condições ótimas.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho, teve como objetivo principal, desenvolver um aparelho medidor de turbidez, isto é, promover um sensor de custo reduzido, levando em conta o preço dos componentes disponíveis no mercado (ex.: *Multiparameter* Hanna HI-9829 custando aproximadamente U\$ 4 mil. Instruments (2023)). Há, no mercado atual, diversos modelos de dispositivos capazes de medir a turbidez. Contudo, esse equipamento é mais comumente utilizado em laboratórios e não em ambientes domésticos, tendo em vista que, seu alto valor agregado.

A transparência da água está diretamente ligada à sua turbidez, ou seja, quanto mais turva é a água menor sua transparência. Dessa forma, para que chegue cristalina até o

consumidor final, é necessário trata-la. Por isso, outro propósito é analisar a turbidez da água que chega à residência do consumidor final.

Ao final, a partir do método de alternativo proposto por [Lambrou, Anastasiou e Panayiotou \(2010\)](#), de adicionar leite desnatado à água, almeja-se calibrar o equipamento de forma que sua precisão traga resultados concisos.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral do projeto pôde ser alcançado por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Projetar e construir um circuito eletrônico para a medida de turbidez, considerando as características e especificações técnicas dos componentes, assim como o custo;
- Desenvolver o método de calibração do equipamento, de modo que detecte variações pequenas na turbidez;
- Analisar a água da torneira para identificar quão sensível ficou o turbidímetro desenvolvido.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste, o presente trabalho é composto por mais quatro capítulos. O segundo capítulo define o que é turbidez e como ela pode ser medida com diferentes aparelhos. O terceiro capítulo explica como calibrar o dispositivo desenvolvido usando um método alternativo que evita os riscos da formazina. O quarto capítulo descreve a metodologia utilizada no projeto, o circuito e os materiais necessários para confeccionar equipamento do início ao fim. O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos e o cronograma resumido das quinze semanas dedicadas ao desenvolvimento do projeto.

2 TURBIDEZ

A turbidez é uma medida da qualidade óptica de um fluido, que depende do tamanho, forma, cor e concentração das partículas em suspensão. A turbidez está relacionada à capacidade do material de dispersar e absorver a luz, resultando na redução da transparência. Quanto maior a quantidade de partículas suspensas, maior será a turbidez da água.

A turbidez é medida por dois métodos principais: turbidimetria e nefelometria (Figura 1). O primeiro método mede a atenuação (redução gradual da intensidade do fluxo luminoso) de um raio de luz ao atravessar um meio líquido. Já o segundo método mede a dispersão da luz em ângulos entre 45° e 90° , que ocorre quando o feixe de luz incide em uma superfície irregular e se reflete em várias direções.

Embora a norma ISO-7027 (ISO, 2016) especifique o uso do método nefelométrico para avaliar a turbidez em águas de baixa turbidez, caracterizando a dispersão de luz em uma faixa de 0,05 a 400 NTU, é importante notar que a turbidimetria também utiliza a unidade NTU. Essa sigla representa *Nephelometric Turbidity Unit* em inglês, que pode ser traduzido como ‘Unidade de Turbidez Nefelométrica’.

Figura 1 – Diferença entre a análise da nefelometria e turbidimetria



Fonte: Bender e Mühlen (2019).

Para explicar melhor os conceitos de atenuação e dispersão da luz, que são usados para medir a turbidez da água, é possível fazer uma analogia com vidros. Um veículo possui, de fábrica, vidros transparentes que permitem alta transmissão luminosa, mas isso resulta em altas temperaturas em seu interior, durante longos períodos de exposição à luz solar. Dessa forma, a instalação de películas que reduzam a transparência do vidro (Figura 2), acarretam tanto na atenuação da luz, quanto em temperaturas mais baixas dentro do veículo (Olahbrasil2, 2018). Essa atenuação da luz é semelhante à que ocorre quando um raio de luz atravessa uma amostra de água turva. Enquanto que, em banheiros ou locais que demandam mais privacidade, o vidro utilizado é opaco (Figura 3), este por sua vez, dispersa a luz, tornando-a menos nítida e reduzindo a visibilidade (difusão da luz)

(Redação, 2023). Essa difusão da luz é semelhante à que ocorre quando um feixe de luz incide em uma superfície irregular e se reflete em várias direções.

Figura 2 – Diferença entre vidro com e sem película



Fonte: Olahbrasil2 (2018).

A Organização Internacional de Padronização (ISO) descreve a turbidez como sendo a “redução da transparência de um líquido causada pela presença de matéria não dissolvida” (LAWLER, 2005). Como a transparência da água está diretamente associada à sua turbidez, em lagos e represas, a transparência geralmente é analisada ao perceber que a água se encontra turva (Figura 4). De acordo com a Fundação Nacional de Saúde:

A transparência é medida mergulhando-se na água um disco de aproximadamente 20 cm de diâmetro (disco de Secchi, em homenagem a seu inventor, um naturalista italiano) e anotando-se a profundidade de desaparecimento (FUNASA, 2017, p. 19).

O disco de Secchi é um instrumento simples e eficaz para estimar a turbidez da água, baseado na profundidade em que o disco deixa de ser visível. Existem diferentes tipos e modelos de discos de Secchi, bem como métodos alternativos para medir a turbidez, como instrumentos eletrônicos portáteis. A medição da turbidez requer cuidados e padronização para garantir resultados precisos e confiáveis.

O presente trabalho, apresenta o desenvolvimento de um sensor de custo reduzido, capaz de realizar a medição da turbidez em laboratório ou uso doméstico. Neste contexto, pode-se citar alguns trabalhos semelhantes:

- “Protótipo de Baixo Custo Utilizando Plataforma Arduíno Para Análise de Turbidez e Condutividade da Água” de Oliveira et al. (2021);

Figura 3 – Diferença entre vidro fosco e transparente

Fonte: [Redação \(2023\)](#).

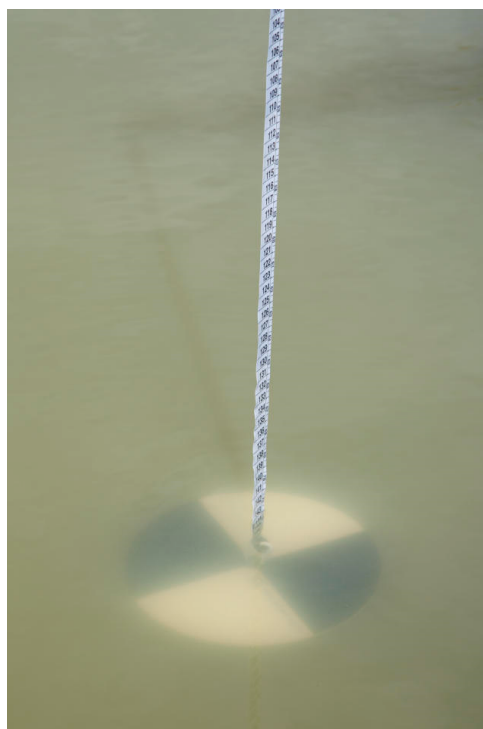
- “Sistema de baixo custo para monitoramento remoto da qualidade da água” de [Targino et al. \(2021\)](#).

O turbidímetro projetado por [Oliveira et al. \(2021\)](#) foi instalado próximo a um hidrômetro, o qual, utilizava um modelo manufaturado com auxílio de uma impressora 3D, onde sensores infravermelhos (emissor e receptor) encontravam-se posicionados a 180º um do outro (Figura 5). Já [Targino et al. \(2021\)](#) desenvolveu um sistema que, com o auxílio de uma placa de isopor para se manter na superfície, monitorava a qualidade da no interior de cisternas (Figura 6). Tal dispositivo era inserido no interior da cisterna, dessa forma, o sensor de turbidez era posicionado em um orifício na placa de isopor direcionado para baixo. A estrutura que abrigava o restante dos componentes era bem fechada, para evitar que o sistema viesse a ficar úmido e ficava flutuando assim como a placa de isopor.

2.1 FERRAMENTAS PARA MEDIÇÃO DE TURBIDEZ

Existem diversos dispositivos no mercado atual que podem medir a turbidez da água. No entanto, o mais comum é o turbidímetro, que tem um alto custo, mas também uma alta

Figura 4 – Análise da transparência da água (disco de Secchi)



Fonte: **CHRISTOFOLETTI (2013)**.

Figura 5 – Modelo estrutural para os sensores infravermelhos utilizado no trabalho de Oliveira et al. (2021)



Fonte: **Oliveira et al. (2021)**.

precisão (U\$ 4 mil, **Instruments (2023)**). Diante disso, **Targino et al. (2021)** desenvolveu um “Sistema de baixo custo para monitoramento remoto da qualidade da água”, que realiza a mesma função do turbidímetro convencional, usando apenas um microcontrolador e alguns sensores de fácil aquisição.

Figura 6 – Protótipo do sistema de monitoramento da qualidade da água desenvolvido por [Targino et al. \(2021\)](#)



Fonte: [Targino et al. \(2021\)](#).

Outra ferramenta menos popular é o tubo de turbidez, que, segundo [Falcade, Mannich e Colombo \(2017\)](#), é de maior confiabilidade para líquidos com turbidez mais alta, pois, o alvo presente no interior do tubo, durante seus testes para suas pequenas amostras, só deixou de ser visualizado para valores a partir de 20 NTU.

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Muito se discute sobre a turbidez da água durante o processo que a tornará potável. Para fins de potabilidade, como mencionado anteriormente no capítulo introdutório, a turbidez deve ser inferior a 1 NTU. Contudo, segundo [Lawler \(2005\)](#), a água potável clorada deve apresentar valores referenciais de 1 a 5 NTU. Dessa forma, os métodos mais utilizados para análise da turbidez do líquido serão descritos nas seções nefelometria, turbidimetria e tubo de turbidez.

2.2.1 NEFELOMETRIA

Quando um feixe de luz que atravessa o meio líquido colide com sólidos em suspensão, a passagem da luz é reduzida, esse efeito óptico é conhecido como efeito Tyndall ([SANTOS, 2021](#)). A nefelometria mede essa quantidade de luz dispersa em um ângulo entre

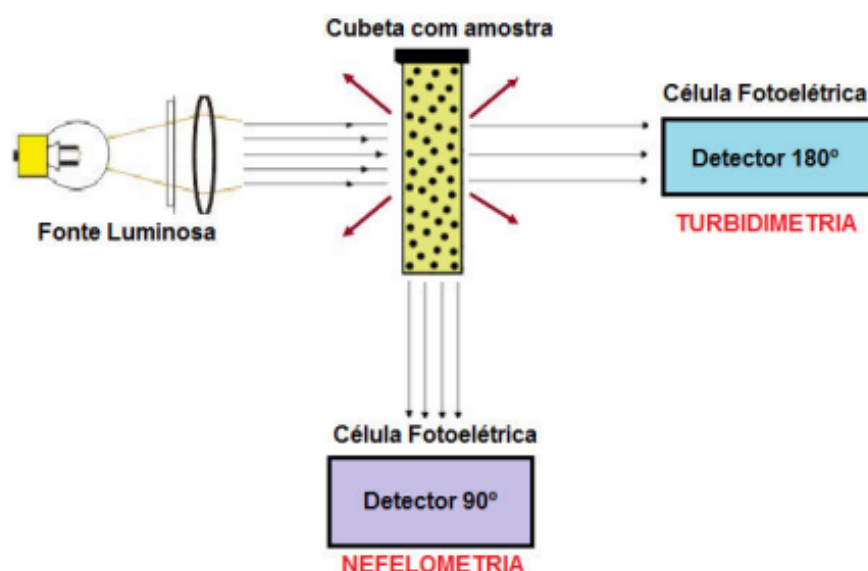
45° e 90° em relação ao feixe de luz incidente. Dessa forma, a quantidade de partículas suspensas é determinada pela intensidade da luz dispersa (HANNA, 2018). A leitura é então convertida em um valor de turbidez, geralmente expresso em unidades de nefelometria (NTU - *Nephelometric Turbidity Units*).

2.2.2 TURBIDIMETRIA

A turbidimetria mede a passagem da luz pelo meio líquido, ou seja, mede a quantidade de luz que atravessa a amostra de água, e chega a célula fotocondutora (resistência varia de acordo com a iluminação incidente) que está posicionada a 180° do emissor de luz (HANNA, 2018).

A Figura 7 mostra a diferença na determinação da turbidez pelos métodos de turbidimetria e nefelometria.

Figura 7 – Diferença entre as técnicas de turbidimetria e nefelometria

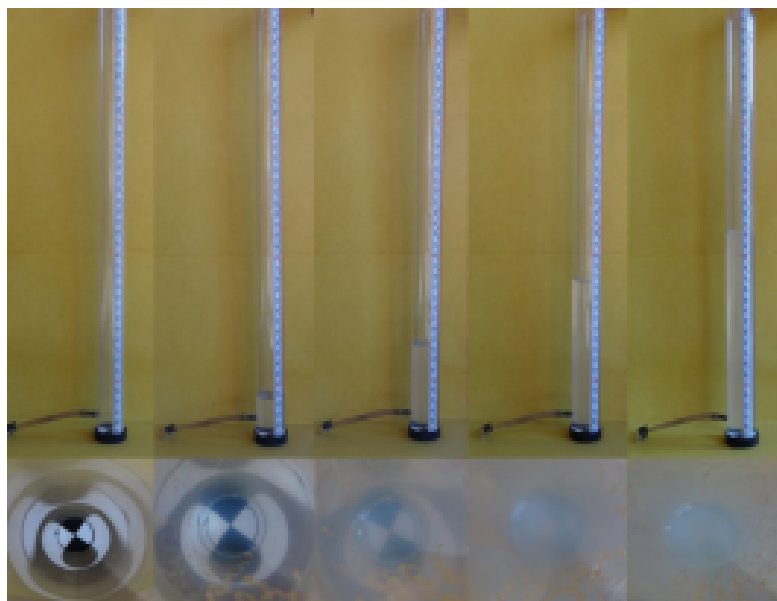


Fonte: Júnior (2018).

2.2.3 TUBO DE TURBIDEZ

O tubo de turbidez é um instrumento que mede a transparência da água. Ele possui um disco de Secchi (dispositivo descrito na seção turbidez) em seu interior, no fundo do tubo. Na parte externa, é fixada uma régua para determinar o ponto em que o disco não é mais visível. A Figura 8 mostra o processo de medição com o tubo de turbidez para uma amostra de 20 NTU, que evidencia o desaparecimento do disco à medida que o nível de água se eleva. A imagem foi registrada durante estudos de Falcade, Mannich e Colombo (2017).

Figura 8 – Tubo de turbidez



Fonte: [Falcade, Mannich e Colombo \(2017\)](#).

2.3 CALIBRAÇÃO DE UM TURBIDÍMETRO

Para converter os sinais elétricos que chegam a célula fotocondutora, ilustrada na Figura 7, em dados representativos para medida de turbidez, é necessário calibrar o equipamento, a fim promover uma alta resolução com baixos erros. Dessa forma, os dados obtidos são utilizados para ajustar as equações presentes no *firmware*, tornando-o capaz de realizar a conversão automática da tensão em dados de NTU.

A solução composta por água, sulfato de hidrazina e hexametenotetra, conhecida como formazina, além de apresentar alto valor agregado e ser um perigosa a saúde, segundo [Kelley et al. \(2014\)](#), devem ser adquiridas em turbidez especificada, já que se diluídas tornam-se instáveis. A concentração da formazina na solução diluída determina o nível de turbidez simulado. Quanto maior a concentração de formazina, mais turva será a suspensão resultante. Dessa forma, o padrão que a ISO 7027 ([HANNA, 2018](#)) adota para calibração, consiste em uma suspensão de 1,25 mg/L de sulfato de hidrazina e 12,5 mg/L de hexametenotetra em água resultando em uma Unidade Turbidimétrica de Formazina (FTU). A partir dessa calibração, é possível determinar o equivalente em NTU para uma dada medição. Contudo, mesmo que a formazina apresente riscos à saúde, devido à sua toxicidade e pelo fato de ser um soluto cancerígeno ([FISPQ, 2009](#)), ainda é o método mais famoso de calibração de turbidímetros.

Posto isso, neste trabalho foi utilizado um método alternativo, que consiste em utilizar uma seringa sem agulha e um conta-gotas com medidas em mililitros (ml), para desenvolver uma solução homogênea, compostas de leite desnatado (0,1% de gordura) e água filtrada. Dessa forma, para obter a relação de transformação mV para NTU, cada amostra

foi medida tanto pelo sensor de turbidez em calibração quanto por um turbidímetro de laboratório (Hanna HI-9829, Figura 9) usado como referência. Contudo, por se tratar de uma substância orgânica, o leite sofre deterioração com o passar do tempo. Dessa forma, a substância deixa de ser homogênea e passa a ser uma mistura heterogênea.

Figura 9 – Turbidímetro convencional Hanna HI-9829



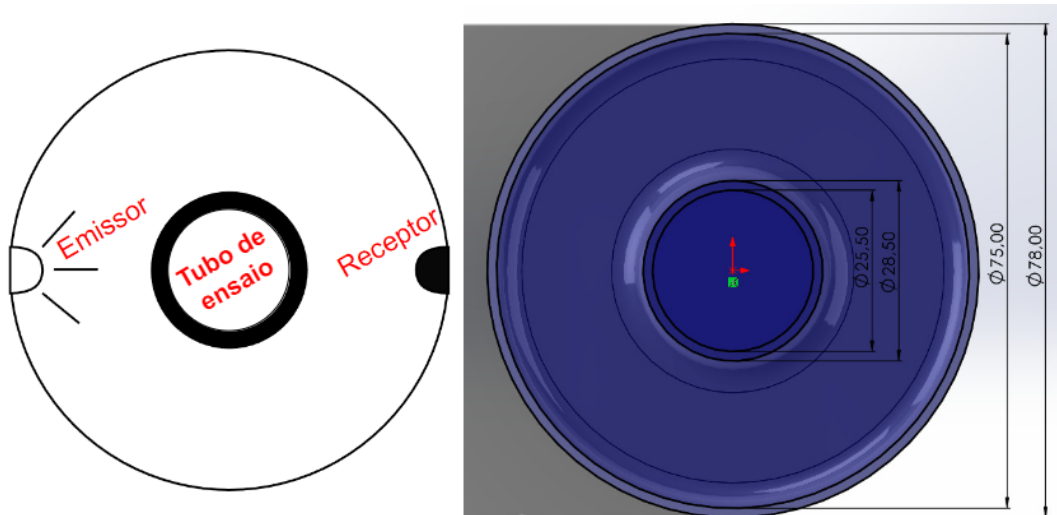
Fonte: [Instruments \(2023\)](#).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema desenvolvido neste trabalho expande a ideia de [Oliveira et al. \(2021\)](#), que propõem o uso de emissores e receptores infravermelhos para a medição da turbidez da água. Diferentemente de abordagens anteriores, este sistema inclui um recipiente personalizado, fabricado com uma impressora 3D. Este recipiente possui orifícios laterais, posicionados diretamente opostos um ao outro (a 180°), dimensionados especificamente para acomodar os sensores infravermelhos. Esta configuração foi escolhida para otimizar a captação de dados e alinha-se com os objetivos de detectar variações pequenas de turbidez e ter um custo mínimo, quando comparado a dispositivos medidores de turbidez convencionais.

A Figura 10 ilustra a vista superior do suporte que comporta os sensores, bem como o modelo feito no *software* SolidWorks para imprimir na impressora 3D. A Figura 11, representa a vista lateral com suas respectivas medidas em mm e a visão externa da estrutura, modelada. A amostra de água presente em um tubo de ensaio é posicionada no centro da estrutura cilíndrica. Assim, a luz infravermelha é emitida, atravessa a amostra de água e, dependendo da sua turbidez, é captada em diferentes intensidades pelo sensor receptor de infravermelhos.

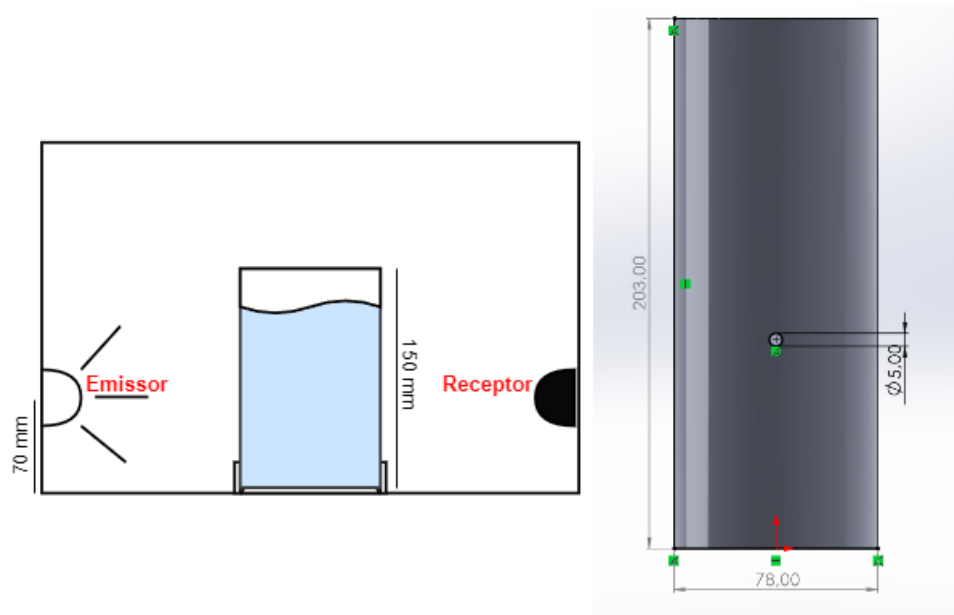
Figura 10 – Vista superior da estrutura onde foi instalada os sensores infravermelhos



Fonte: Autoria própria.

As aberturas laterais foram posicionadas no ponto médio do tubo de ensaio, tendo em vista que, segundo a [FUNASA \(2017\)](#), águas paradas ou locais com baixa velocidade de escoamento, a turbidez da água tende a ser mais baixa. Sendo assim, na medida em que o tempo passa e a água permanece parada, a concentração de sólidos em suspensão (CSS) reduz devido a ação da gravidade, passando a se acumular no fundo do recipiente.

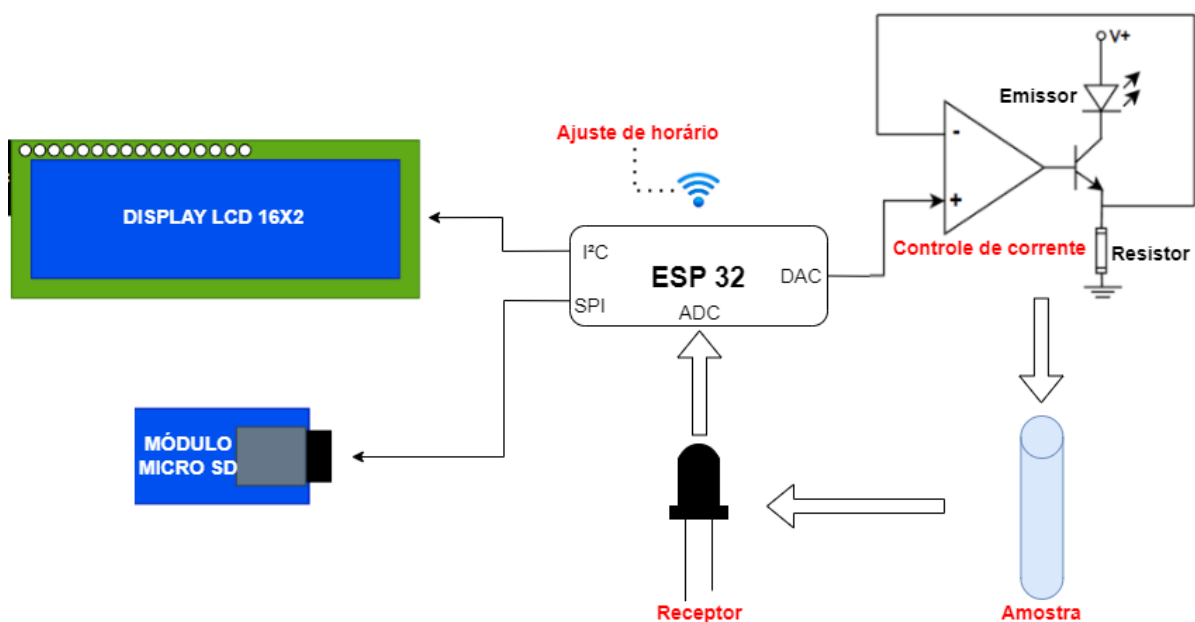
Figura 11 – Vista lateral da estrutura que comporta os sensores



Fonte: Autoria própria.

A Figura 12 representa o diagrama de blocos do sistema. Como foi optado em utilizar o microcontrolador ESP-32, o horário é obtido via *Wi-Fi*. A função *NTPClient*, utiliza o *Network Time Protocol* (NTP) para configurar o fuso horário para a região desejada. O módulo micro SD (Secure Digital), por sua vez, foi utilizado no projeto com o intuito de armazenar dados de forma automática.

Figura 12 – Ilustração do sistema de monitoramento de turbidez desenvolvido



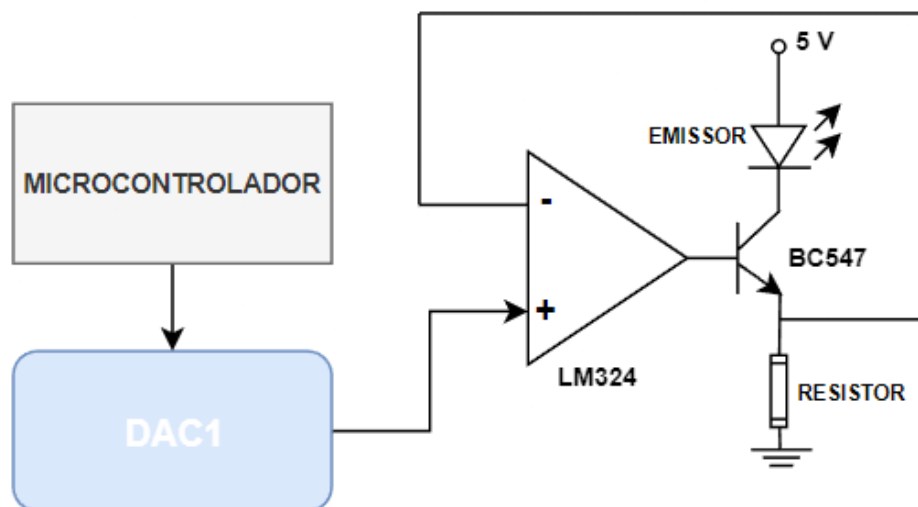
Fonte: Autoria própria.

A comunicação entre o microcontrolador e o LCD, foi realizada através do protocolo

I²C ou IIC (*Inter-Integrated Circuit*). Esse protocolo é caracterizado como uma conexão serial síncrona estabelecida entre dois circuitos integrados, em que a comunicação ocorre de forma unidirecional, fluindo apenas em um sentido (*half-duplex*). O I²C ou IIC permite a troca de informações entre os dispositivos conectados por meio de linhas de dados (SDA) e de clock (SCL), sendo amplamente utilizado para comunicação entre periféricos e controladores em sistemas embarcados. Já, o protocolo de comunicação utilizado entre microcontrolador e módulo micro SD foi do tipo SPI (*Serial Peripheral Interface*), que assim como o I²C é uma conexão serial síncrona, porém para pequenas distâncias. Contudo, o que difere tal protocolo da I²C, é que, os dados podem ser transmitidos nos dois sentidos ao mesmo tempo (*full-duplex*).

O modelo proposto por Oliveira et al. (2021), que detalha a ligação dos sensores, necessita de adaptações ao se alterar o microcontrolador utilizado. Para minimizar erros na leitura e garantir a consistência na emissão de luz do emissor, uma fonte de corrente controlada por tensão (Figura 13) foi projetada. Esta medida visa evitar variações que possam comprometer as leituras do receptor. Uma foto do sistema desenvolvido para este projeto é apresentado na Figura 14.

Figura 13 – Ilustração do circuito para controle de corrente no emissor

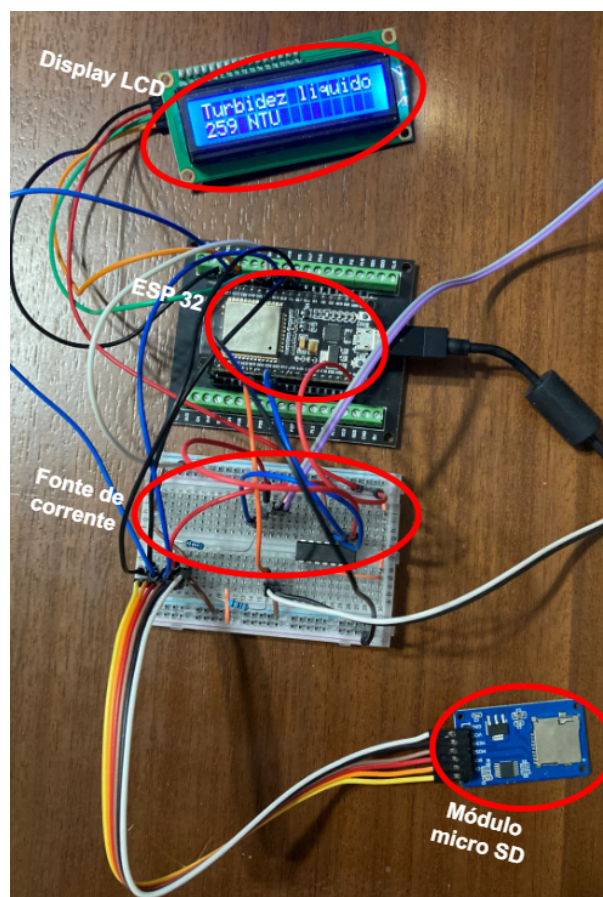


Fonte: Autoria própria.

O microcontrolador utilizado no desenvolvimento do projeto foi o ESP32 (Figura 15). O ESP32 está equipado com duas portas DAC (Conversores Digital para Analógico), denominadas DAC1 (GPIO 25) e DAC2 (GPIO 26), como pode ser visto na (Figura 16). Estas portas são capazes de converter valores digitais, variando de 0 a 255, em tensões correspondentes na saída do DAC, que variam de 0 a 3,3 V.

O circuito integrado (CI) LM324N é um amplificador operacional (amp op) quádruplo e foi utilizado no projeto devido a disponibilidade imediata no laboratório onde foi desenvolvido o protótipo. Embora outros amplificadores operacionais simples pudessem

Figura 14 – Foto do sistema de monitoramento de turbidez desenvolvido



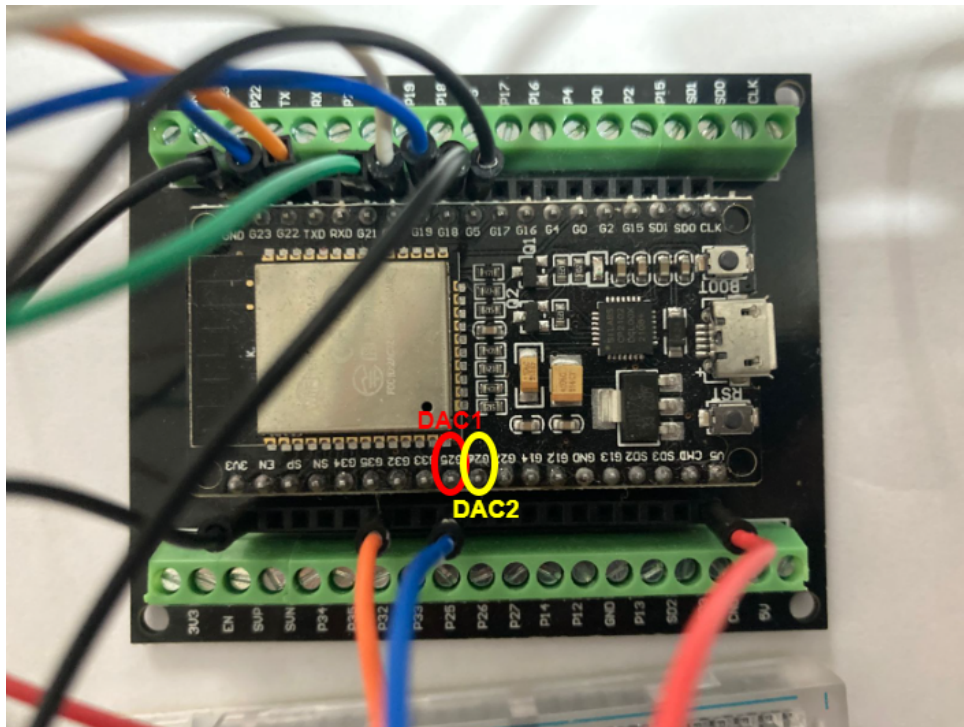
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 – Foto ilustrativa do microcontrolador Esp 32 utilizado no trabalho



Fonte: Oliveira (2023).

Figura 16 – Indicação dos DACs do ESP 32



Fonte: Autoria própria.

ser utilizados em teoria, a escolha do LM324N foi determinada pela limitação de opções disponíveis e pela não necessidade de características especiais em amplificadores para este projeto. Esta decisão pragmática permitiu o progresso do projeto sem a necessidade de aquisição de componentes adicionais ou mais específicos. O DAC1 (G25) foi ligado ao terminal positivo de um dos amp ops do CI, enquanto que, a saída do amp op foi ligada a base do transistor BC547. O emissor infravermelho, foi ligado na fonte de 5 V e ao coletor do transistor. No emissor do BC547, além de ligado ao resistor de 220 k Ω e na referência do circuito (GND), foi responsável por realimentar o negativo do amplificador. Portanto, a tensão de saída do DAC é aplicada sobre o resistor, gerando uma corrente no emissor que é diretamente proporcional à tensão no DAC, visto que a corrente de base do transistor pode ser desprezada. Portanto, tal circuito caracteriza uma fonte de corrente controlada por tensão, onde a corrente é constante, independentemente da carga.

O receptor IR, foi ligado a uma das portas ADC (*Analog-to-Digital Converter*) do ESP32, a G35 (GPIO35). A utilização desta porta traz uma resolução entre 0 e 4095 (12 bits), onde, para efeitos de calibração, 0 representa turbidez mínima que pode ser medida e 4095 a máxima.

3.1 CALIBRAÇÃO

Para calibrar o sensor de turbidez desenvolvido, foi utilizado o turbidímetro HI 9829 como referência. Primeiramente, 50 ml de água filtrada foram adicionados em cada tubo

de ensaio para o sensor desenvolvido, enquanto o recipiente do HI 9829 recebeu 80 ml. A fim de igualar a concentração de turbidez em ambos os dispositivos, utilizou-se leite como agente de turvação. O volume de leite adicionado ao turbidímetro HI 9829 foi ajustado para manter a mesma proporção no sensor desenvolvido, empregando uma relação de 0,625 na quantidade de leite. Esse fator foi calculado com base nos volumes de água utilizados, visando alcançar níveis de turbidez comparáveis entre os dois dispositivos para uma avaliação precisa. O objetivo dessa calibração é verificar a precisão do sensor desenvolvido em comparação com o padrão estabelecido pelo HI 9829.

Na primeira tentativa de calibração, ajustou-se o DAC1 para um valor de 70, gerando aproximadamente 0,91 V na porta GPIO25 (DAC1) do microcontrolador. No entanto, esta configuração resultou em uma alta intensidade luminosa do LED, causando a saturação do sensor em valores de turbidez abaixo de 60 NTU. Para contornar esse problema, o valor do DAC foi reduzido para 65, diminuindo a tensão para 0,84 V e, por conseguinte, a intensidade luminosa do LED. Essa alteração possibilitou a medição de valores menores de turbidez, evitando a saturação do sensor e permitindo uma calibração mais precisa do sistema.

Foram preparadas 6 amostras com diferentes concentrações, para obter a curva de calibração. As concentrações utilizadas no turbidímetro convencional para calibração do aparelho desenvolvido, estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de leite em ml adicionados na água filtrada

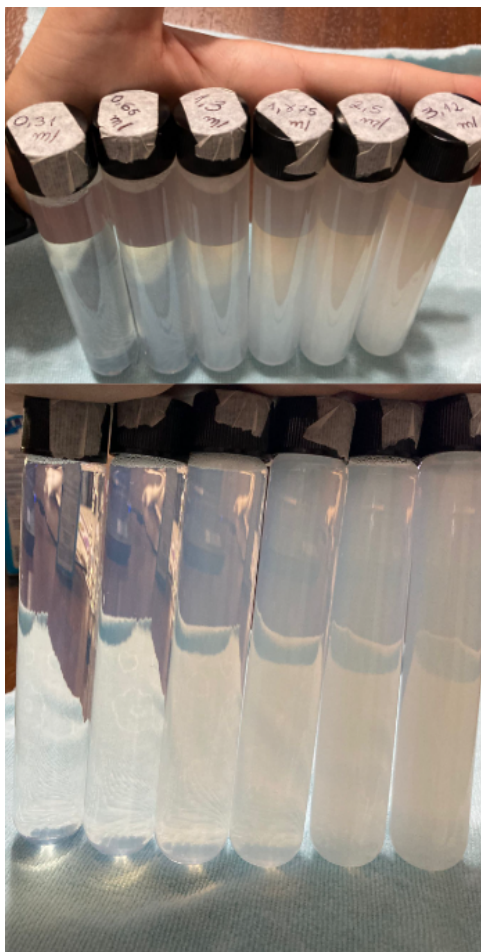
Número da Amostra	Recipiente do Turb.	Tubo de Ensaio	Concentração Resultante (%)
1	0,5	0,31	0,63
2	1,0	0,63	1,25
3	2,0	1,25	2,5
4	3,0	1,88	3,75
5	4,0	2,50	5,00
6	5,0	3,12	6,25

Fonte: Autoria própria, 2023.

A foto da Figura 17 mostra a visível variação da turbidez entre amostras elaboradas, isto é, é possível verificar visualmente que as amostras possuem diferenças quanto à turbidez.

Para obter a relação de transformação entre o valor medido no dispositivo desenvolvido e no turbidímetro convencional, foram feitas várias leituras de cada amostra. Com um total de 30 amostras coletadas em 3 segundos (a cada 100 ms era realizada a medição da turbidez), foi obtido a média entre esses valores antes de enviar os dados para o cartão SD. Dessa forma, a cada 3 s obtinha-se uma nova medição que era gravada em um arquivo de texto no cartão SD. Esse processo foi repetido 40 vezes para cada amostra, totalizando 120 s de medição. Com os dados coletados, o cartão SD foi removido e inserido em um computador para a extração dos dados.

Figura 17 – Amostras utilizadas na calibração



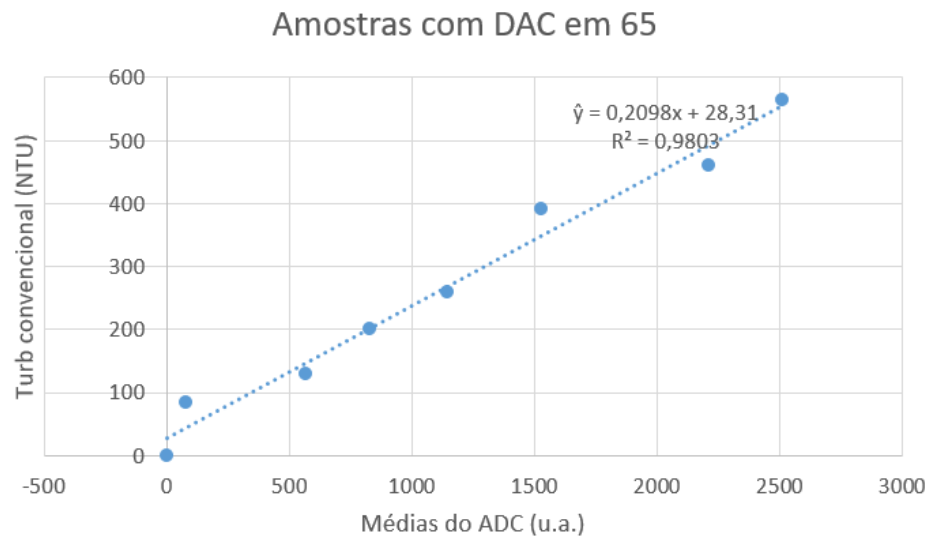
Fonte: Autoria própria.

Os dados do arquivo de texto foram convertidos em uma planilha, onde foi obtida a média e desvio padrão para cada nível de turbidez medido. Em seguida, foi gerado um gráfico de dispersão com as médias encontradas e adicionado uma linha de tendência para poder obter a relação entre o valor medido no turbidímetro projetado e no convencional (Figura 18). Os valores do eixo Y do gráfico representam as medições feitas com o Hanna, já o eixo X refere-se aos dados medidos com o sensor de turbidez criado. É importante destacar que, o modelo da regressão foi obtido através do método dos mínimos quadrados ordinários.

Após ser estabelecida uma relação entre a tensão gerada pelo receptor e a turbidez medida pelo turbidímetro convencional, a equação de equivalência foi inserida na programação do microcontrolador, para poder exibir a turbidez em NTU no *display* LCD. A relação estabelecida é expressa pela seguinte equação:

$$Y = 0,2098X + 28,31, \quad (1)$$

com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9803, o que demonstra uma boa linearidade.

Figura 18 – Gráfico de dispersão para encontrar a relação entre as medições

Fonte: Autoria própria.

No entanto, é possível notar tanto no gráfico da Figura 18 quanto na relação da Equação 1 uma limitação significativa da relação estabelecida. Para valores baixos de NTU (entre 0 e 80), um erro considerável é notado nessa faixa de turbidez, pois a equação prevê um mínimo de 28 NTU, mesmo para amostras sem turbidez. Dessa forma, para valores baixos de turbidez é necessário outra curva de calibração. Essa discrepância sugere que a relação atual não é adequada para valores abaixo de 80 NTU. Portanto, a análise deste trabalho foi restrita a amostras com turbidez acima de 80 NTU. Dessa forma, a calibração para valores próximos de 0 NTU é proposta como uma direção importante para pesquisas futuras.

Ao longo das medições, foi notado que, as amostras confeccionadas mudavam sua turbidez com o passar do tempo, chegando a praticamente dobrar seus valores de um dia para o outro. Foi possível notar que, o leite formava uma camada opaca no interior do tubo, afetando diretamente na precisão. Dessa forma, a medição precisa ser feita assim que uma amostra for coletada ou preparada. Em virtude disso, foi necessário preparar mais de uma vez amostras com mesma concentração. Para evitar variações na quantidade de leite adicionada na água em amostras que necessariamente deveriam ter a mesma concentração, foram utilizados um conta gotas e uma seringa (Figura 19), ambos com medidas em ml em seu corpo. Para garantir que todos os tubos de ensaio contivessem a mesma quantidade de água (50 ml), usou-se uma seringa para medir e transferir 5 doses de 10 ml cada.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento do sensor de turbidez, bem como a quantidade de cada um dos itens e seu respectivo custo podem ser vistos na Tabela 2.

Figura 19 – Seringa e conta gotas



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Materiais utilizados para desenvolvimento do sensor

Item	Quantidade	Preço Estimado (RS)
Esp32 38p	1	30,00
Protoboard 830 pontos	1	18,00
Placa de desenv.	1	12,45
Display LCD 16x2	1	10,10
CI LM324N	1	2,50
Módulo de cartão micro SD	1	2,67
Emissor e Receptor infravermelhos	1	3,88
Resistor	2	0,36
Transistor BC547	1	0,50
Jumpers	44	15,00
Total		95,46

Fonte: Autoria própria, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao término do projeto, o equipamento desenvolvido, mesmo que custando menos de 10% do valor de um turbidímetro comercial (ex. Hanna HI9829 que custa em torno de U\$ 4.000,00), apresentou uma alta precisão e acurácia, quando comparado ao comercializado, para medidas acima de 80 NTU.

A Tabela 3 apresenta a turbidez média das amostras antes da determinação da relação de transformação. Nela, é possível visualizar tanto os valores de turbidez medidos pelo turbidímetro convencional quanto os obtidos pelo sensor desenvolvido após sua calibração. Além disso, a tabela inclui a porcentagem de erro entre as medições realizadas com o equipamento convencional e o recém-desenvolvido.

Tabela 3 – Dados de medições realizadas em laboratório

Médias do ADC (u.a.)	HI9829 (NTU)	Dispositivo desenvolvido (NTU)	Erro (%)
0	0	28	
81,675	83	85	+ 2,40
570,025	130	131	+ 0,08
1147,95	260	253	- 2,70
1530,1	390	387	- 0,08
2203,95	460	449	- 2,40
2512,25	565	560	- 0,09

Fonte: Autoria própria, 2023.

O dispositivo, conforme mostrado na Figura 20, demonstra um erro de aproximadamente 5% em comparação ao equipamento convencional. Com o objetivo de facilitar sua aplicação em ambientes domésticos, tanto para monitorar a qualidade da água destinada ao consumo direto quanto indireto (como no preparo de alimentos), o design do equipamento foi concebido para ser intuitivo. Isso permite que qualquer pessoa o utilize facilmente, sem enfrentar dificuldades, em diversas situações cotidianas onde sua aplicação é viável.

Contudo, após realizado a calibração do sensor desenvolvido, por meio da regressão linear, a relação de calibração obtida a partir da medição em ambos os turbidímetros fez com que o aparelho desenvolvido fosse eficaz apenas para medições a cima de 80 NTU. Dessa forma, para utilizá-lo em medições de baixa turbidez, ainda é necessário mais estudos para melhorar sua sensibilidade a medidas de turbidez mais baixas.

Figura 20 – Diferença entre as medições dos dois turbidímetros



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O foco do trabalho foi o desenvolvimento de um sensor de turbidez de custo reduzido. A expansão da ideia de [Oliveira et al. \(2021\)](#) de utilizar sensores infravermelhos (emissor e receptor), posicionados a 180° um do outro para leitura da turbidez da água, combinado ao uso da estrutura confeccionada em impressora 3D, que abriga em seu centro um tubo de ensaio com a amostra, evita erros por perturbação externa.

O método alternativo de calibração, de diluir o leite na água, criando amostras com diferentes concentrações evita contato com a substância tóxica formazina, que é utilizada na calibração de turbidímetros convencionais. Contudo, as amostras confeccionadas a partir da mistura (água + leite) sofrem alterações em sua turbidez poucas horas após serem preparadas. Dessa forma, para novas medições, a fim de confirmar a calibração do aparelho, faz-se necessário preparar uma nova amostra com a mesma concentração.

Após a calibração do turbidímetro desenvolvido, o erro entre a medição realizada pelo aparelho convencional e o protótipo foram relativamente baixas (menor que 5%). Porém, a relação de calibração estabelecida ($0,2098x + 28,31$) inibe valores de turbidez menores que 80 NTU, o que impossibilita a medição de líquidos com turbidez abaixo disso.

Para aprimoramentos futuros, recomenda-se a criação de um maior número de amostras de diferentes concentrações. Analisar mais amostras poderia alterar a relação de calibração, de modo a abranger valores mais baixos de turbidez sem comprometer sua precisão. Além disso, adicionar um oxímetro (medidor de oxigenação), pode tornar ainda mais atrativo o dispositivo para o aquarismo e adicionar um sensor medidor de PH, o faz mais atrativo para quem almeja controlar a qualidade da água que está consumindo.

REFERÊNCIAS

- BENDER, A. L.; MÜHLEN, C. A. V. **Testes Laboratoriais Aplicados à Imunologia Clínica (IFSC)**. 2019. Disponível em: <<http://www.uoguelph.ca/mbnet/>>.
- CHRISTOFOLETTI, J. **PDisco de Secchi**. 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/1107001/disco-de-secchi>>.
- FALCADE, D.; MANNICH, M.; COLOMBO, G. Tubo de turbidez para determinação de baixo custo da turbidez em corpos d'água superficiais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, v. 14, p. 5–5, 8 2017.
- FISPQ. **Produtos químicos-Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente Parte 4: Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ) Chemicals-Information about safety, health and environment Part 4: Safety data sheet for chemicals (SDS)**. [s.n.], 2009. ISBN 978-85-07-01706-6. Disponível em: <www.abnt.org.br>.
- FUNASA. **MANUAL DE CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA TÉCNICOS QUE TRABALHAM EM ETAS FUNASA FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE**. 2017. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/biblioteca-eletronica/publicacoes/saude-ambiental/-/asset_publisher/G0cYh3ZvWCm9/content/manual-de-controle-da-qualidade-da-agua-para-tecnicos-que-trabalham-em-etas?inheritRedirect=false>.
- HANNA. **O Guia Completo para Medição de Turbidez na Água**. 2018. Disponível em: <<https://www.digitalwater.com.br/guia-medicao-de-turbidez-na-agua/>>.
- INSTRUMENTS, H. **Multiparameter pH/ISE/EC/DO/Turbidity Waterproof Meter with GPS option - HI9829**. 2023. Disponível em: <<https://www.hannainst.com/hi9829-multiparameter-ph-ise-ec-do-turbidity-waterproof-meter-with-gps-option.html>>.
- ISO. **Water quality-Determination of turbidity-Part 1:(E) ii COPY-RIGHT PROTECTED DOCUMENT**. 2016. Disponível em: <www.iso.org/TehSTANDARDPREVIEW>.
- JÚNIOR, L. **Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades Natural Products Used as Coagulants and Flocculants for Public Water Supply: A Review of Benefits and Potentialities**. 2018. Disponível em: <<http://rvq.sbgq.org.br>>.
- KELLEY, C. D. et al. An affordable open-source turbidimeter. **Sensors (Switzerland)**, MDPI AG, v. 14, p. 7142–7155, 4 2014. ISSN 14248220.
- LAMBROU, T. P.; ANASTASIOU, C. C.; PANAYIOTOU, C. G. A nephelometric turbidity system for monitoring residential drinking water quality. 2010. Disponível em: <<http://www2.ucy.ac.cy/~faniseng/>>.

LAWLER, D. Spectrophotometry: Turbidimetry and nephelometry. In: _____. [S.l.: s.n.], 2005. p. 343–351.

MINELLA, J. P. et al. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 1819–1830, 6 2008. ISSN 08856087.

Olahbrasil2. **Películas de controle solar reduzem a temperatura no interior de veículos** -. 2018. Disponível em: <<https://jornalbrasilpecas.com.br/peliculas-de-controle-solar-reduzem-o-calor-no-interior-de-veiculos/>>.

OLIVEIRA, E. **NodeMCU-32S**. 2023. Disponível em: <<https://blogmasterwalkershop.com.br/embarcados/esp32/conhecendo-o-nodemcu-32s-esp32>>.

OLIVEIRA, G. H. B. de et al. Protótipo de baixo custo utilizando plataforma arduino para análise de turbidez e condutividade da água. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Universidade Federal de Vicos, v. 7, 10 2021.

PET, R. N. **Aquarismo um mercado que precisa ser notado**. 2022. Disponível em: <<https://rnpet.com.br/aquarismo/aquarismo-um-mercado-que-precisa-ser-notado/>>.

Redação. **50 Modelos de Box para Banheiro para Você se Inspirar**. 2023. Disponível em: <<https://www.decorfacil.com/modelos-de-box-para-banheiro/>>.

SANTOS, L. M. T. dos. **Efeito Tyndall: o que é, por que acontece e exemplos**. 2021. Disponível em: <<https://www.todoestudo.com.br/quimica/efeito-tyndall>>.

TARGINO, I. F. et al. Sistema de baixo custo para monitoramento remoto da qualidade da água. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Companhia Brasileira de Producao Cientifica, v. 12, p. 665–680, 5 2021.

APÊNDICE A – REPOSITÓRIO

Os códigos desenvolvidos neste trabalho podem ser acessados no repositório <https://github.com/HectorVRD/Turbity-Sensor#turbity-sensor>, ou através do QR code da Figura 21.

Figura 21 – QR code



Fonte: Autoria própria.