

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

NEUDES ALVES ASSIS FILHO

**SISTEMA IOT APLICADO À MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLUÇÕES DE
HIDROPONIA**

Ilha Solteira
2025

NEUDES ALVES ASSIS FILHO

**SISTEMA IOT APLICADO À MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE SOLUÇÕES DE
HIDROPONIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
Orientador

Ilha Solteira

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A848s Assis Filho, Neudes Alves.
Sistema IoT aplicado à medição de parâmetros de soluções para hidroponia / Neudes Alves Assis Filho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
45 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Ricardo Tokio Higuti

Inclui bibliografia

1. Sistemas IoT. 2. Hidroponia. 3. Matlab.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos seis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e cinco, o discente **Neudes Alves Assis Filho**, matriculado sob o nº 191053007, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, o Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira e o Mestre Hugo Fernando Yamanaka, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Sistema IoT Aplicado à Medição de Parâmetros de Soluções para Hidroponia**", obtendo a nota 9,5 (NOVE E MEIO) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti
 - Orientador -



Neudes Alves Assis Filho
 - Discente -



Prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira
 - Membro da Banca -



Mestre Hugo Fernando Yamanaka
 - Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais **Neudes Alves Assis** e **Sandra Elaine Görden Assis** pelo amor, paciência e apoio durante toda a minha graduação. Ao meu irmão **Lauro Görden Neto**, pela parceria, confiança e sempre acreditar em mim.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e o presente do amanhã.

Minha querida família, pilar inabalável da minha existência.

A turma de 2019 do curso de Engenharia Elétrica, em especial, ao Thiago Judice Francé, pela amizade e companheirismo ao longo dos anos.

Ao Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, pela confiança depositada em mim quando aceitou ser meu orientador, pelo conhecimento transmitido e por abrir as portas do Laboratório de Ultrassom para a realização do estudo.

Ao Dr. Júlio César Eduardo de Souza, pela enorme ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de república, de grande importância nas horas de dificuldade e pelos momentos de felicidade.

RESUMO

A produção hidropônica consiste em uma técnica de cultivo sem a utilização de solo, em que as hortaliças são cultivadas em substrato ou em solução nutritiva. Considerando o cenário da produção alimentícia no Brasil e a necessidade de melhorar as condições de trabalho do pequeno produtor rural, desenvolveu-se um sistema IoT (do inglês, Internet of Things) de baixo custo, cujo principal componente é o microcontrolador ESP32, capaz de realizar o monitoramento em tempo real da temperatura e do nível de sólidos dissolvidos em água, parâmetros essenciais para garantir a qualidade da solução utilizada. Fez-se o uso de amostras de solução nutritiva com diferentes concentrações de 850, 1500 e 2500 μS e, com o auxílio de ferramentas matemáticas, como o Matlab, foram elaborados gráficos para análise do comportamento e precisão do sistema, comparando seus resultados com um modelo comercial. Por fim, elaborou-se um sistema hospedado pela plataforma Arduino, que exibia os dados transmitidos diretamente do microcontrolador, para o monitoramento remoto dos dados, via desktop ou dispositivo móvel.

Palavras-chave: Sistemas IoT. Hidroponia. Matlab.

ABSTRACT

Hydroponic production consists of a cultivation technique without the use of soil, in which vegetables are grown in substrate or in a nutrient solution. Considering the scenario of food production in Brazil and the need to improve the working conditions of small rural producers, a low-cost IoT (Internet of Things) system was developed, whose main component is the ESP32 microcontroller, capable of real-time monitoring of temperature and the level of dissolved solids in water, essential parameters to guarantee the quality of the solution used. Nutrient solution samples with different concentrations of 850, 1500 and 2500 μS were used and, with the help of mathematical tools such as Matlab, graphs were created to analyze the behavior and accuracy of the system, comparing its results with a commercial model. Finally, a system hosted by the Arduino platform was developed, which displayed the data transmitted directly from the microcontroller, for remote monitoring of the data, via desktop or mobile device.

Keywords: IoT systems. Hydroponic. Matlab.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Uma colheitadeira X9 1000, da fabricante John Deere, à esquerda, e um drone de pulverização DJI AGRAS T50, à direita.....	15
Figura 2	- Esquema de um sistema IoT.....	17
Figura 3	- Estufa de hidroponia do Campus 2.....	19
Figura 4	- Esquema de GPIOs do ESP32.....	20
Figura 5	- Imagem da tela inicial do Arduino IDE contendo um esboço.....	21
Figura 6	- Esquema da pinagem do ADS1115.....	23
Figura 7	- Curva de comportamento da resistência em função da temperatura no NTC 10K.....	24
Figura 8	- Esquema dos pinos do DS18B20.....	27
Figura 9	- Esquema de um sensor TDS.....	28
Figura 10	- Esboço do sistema completo.....	29
Figura 11	- Esquema de ligação dos componentes considerando as portas específicas.....	29
Figura 12	- Curvas de comportamento do erro de calibração do ADC interno do ESP32.....	30
Figura 13	- Erro percentual do respectivo meio de correção a partir da variação de tensão.....	31
Figura 14	- Imagem do NTC 10K e o DS18B20 instalados em um ESP32.....	31
Figura 15	- Imagem do termômetro de alta precisão milliK.....	33
Figura 16	- Sistema térmico disponível no laboratório.....	33
Figura 17	- Curvas de comportamento da temperatura lida pelos termômetros.....	34
Figura 18	- Erro percentual de cada termômetro.....	35
Figura 19	- Sensor TDS-3 utilizado na estufa.....	35
Figura 20	- Sensor TDS utilizado com o microcontrolador.....	36
Figura 21	- Imagem da página inicial da plataforma.....	37
Figura 22	- Imagem da seção “Things” exibindo as duas variáveis coletadas pelo módulo.....	38
Figura 23	- Imagem da seção “Devices” exibindo o microcontrolador utilizado no projeto.....	38
Figura 24	- Imagem do programa inserido na nuvem.....	39
Figura 25	- Dados coletados pelo microcontrolador sendo exibidos em tela....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Aferições de temperatura com NTC 10K e DS18B20.....	15
Tabela 2	- Dados obtidos pelo TDS projetado em comparação ao modelo comercial.....	25

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	Conversor analógico para digital
CI	Circuito integrado
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
GPIO	Porta de entrada e saída de uso geral
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado
IOT	Internet das coisas
LUS	Laboratório de Ultrassom
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
NTC	Coeficiente negativo de temperatura
TDS	Sólidos totais dissolvidos

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
3. INTERNET OF THINGS E SUAS APLICAÇÕES NO PROJETO PROPOSTO	17
4. MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1 DESENVOLVIMENTO E LOCAL DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.	19
4.2 MICROCONTROLADOR ESP32	19
4.3 ARDUINO IDE	21
4.4 LINGUAGEM C	22
4.5 CONVERSOR ADC EXTERNO ADS1115	22
4.6 SENSORES DE TEMPERATURA	23
4.6.1 TERMISTOR NTC 10KΩ.....	23
4.6.2 SENSOR DS18B20.....	26
4.7 SENSOR TDS	27
4.8 MONTAGEM COMPLETA DO SISTEMA.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 RESOLUÇÃO DO ERRO DO CONVERSOR ADC DO MICROCONTROLADOR	30
5.2 COMPORTAMENTO DOS SENSORES DE TEMPERATURA.....	31
5.3 PROJETO DO SENSOR TDS	35
5.4 EXIBIÇÃO DE DADOS NA PLATAFORMA IOT	37
6. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

A produção hidropônica, modelo de cultivo protegido e sem solo, corresponde a 45% do fornecimento de folhosas, estendendo-se entre 25 e 30 mil hectares e foi introduzida no Brasil na década de 80, pelos pesquisadores japoneses Takanoi Sekine e Shigueru Ueda (Anuário Brasil de Hidroponia, 2020).

Esta prática atraiu investidores e conquistou pesquisadores ao longo do tempo, devido à qualidade diferenciada dos produtos, sendo o estado de Santa Catarina, uma referência neste estilo de plantio (Anuário Brasil de Hidroponia, 2020).

Segundo Barcelos (2020), quando comparada a formas de plantio convencionais, a hidroponia também apresenta menores impactos ao meio ambiente, principalmente na quantidade de água utilizada na produção de hortaliças. O uso do recurso pode chegar a 80% menos do que em casos de plantio direto no solo.

Os modelos hidropônicos utilizados pelos Estados Unidos e na Europa diferem do modelo brasileiro principalmente na alta necessidade de investimento, resultando em monopólio por parte dos produtores que possuem poder aquisitivo e, conseqüentemente, baixo rendimento. Por outro lado, o modelo brasileiro, mais barato, é amplamente utilizado pelos pequenos produtores, o que resulta em uma rápida expansão pelo território nacional (Barcelos, 2020).

Segundo um estudo de mercado dirigido pela Mordor Intelligence (2024), o mercado de hidroponia movimentou cerca de 5,06 bilhões de dólares em 2024 e espera-se que até 2029 esses números cheguem a 7,94 bilhões de dólares.

A automação de sistemas faz parte da modernização da produção, por exemplo, as colheitadeiras com piloto automático conectado ao GPS da máquina, sistemas de irrigação automáticos ou, mais recentemente, a adoção de drones para monitoramento aéreo e pulverização, como visto na Figura 1, a seguir.

No cenário nacional atual, as estufas de hidroponia bem equipadas realizam o monitoramento de parâmetros da produção (pH, temperatura e condutividade elétrica) com instrumentos manuais, demandando tempo e desgaste físico dos produtores em um esforço diário. Com a automação de parte deste trabalho, é possível contribuir com a melhora da qualidade do trabalho, reduzindo a carga física e contribuindo para melhora do rendimento dos alimentos produzidos.

Figura 1. Uma colheitadeira X9 1000, da fabricante John Deere, à esquerda, e um drone de pulverização DJI AGRAS T50, à direita



Fonte: Adaptado de John Deere (2025) e DJI (2025)

Segundo Massruhá e Leite (2018), a produção alimentícia será um dos principais impasses da sociedade nos próximos 50 anos, o que possui forte ligação com o emprego da tecnologia no campo, facilitando que a segurança alimentar e, seguindo a tendência da indústria, surge também a Agricultura 4.0 ou agricultura digital, que emprega métodos computacionais, redes de sensores e IoT para dar suporte ao manejo, elevar índices de produtividade e otimizar o trabalho dos colaboradores, tecnologia estas muitas vezes focadas aos grandes produtores.

Por outro lado, para Lélis *et al.* (2023), é observado que, no Brasil, a prática da hidroponia já está sendo adotada pela agricultura familiar, pois, além de gerar mais renda, é menos trabalhoso, o que aumenta a variedade dos perfis dos produtores rurais, que vão desde o produtor familiar até empresas voltadas a produção hidropônica, como a brasileira Hidrogood e a portuguesa Schaefer.

No primeiro capítulo deste trabalho, tem-se uma pequena introdução aos conceitos de IoT e como deu-se o surgimento do termo. Em seguida, abordou-se todos os componentes que fazem parte do sistema, desde a localização até a composição dos sensores. Por fim, é apresentado os resultados gerados pelo módulo, bem como o impacto que cada dado coletado causou.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo a elaboração de um sistema IoT que realiza medições em tempo real de dois parâmetros essenciais: temperatura e condutividade elétrica e os disponibiliza para monitoramento remoto, além da configuração de uma plataforma hospedada na nuvem que exibe os dados coletados pelo módulo em tempo real ou durante um período determinado. A partir destes dados, é permitido ao usuário uma melhor distribuição do seu tempo e esforços físicos, removendo a necessidade de medições presenciais e melhorando a utilização dos insumos químicos.

3. INTERNET OF THINGS E SUAS APLICAÇÕES NO PROJETO PROPOSTO

A partir dos avanços em áreas estratégicas da tecnologia (comunicação, microeletrônica e sistemas embarcados, por exemplo), observou-se a necessidade da integração de informações oriundas de tais setores. O termo surgiu em 1999, criado por Kevin Ashton, pioneiro na criação do Laboratório Auto-ID, do MIT.

A Internet das Coisas consiste na interconexão de sensores e outros dispositivos que, uma vez conectados à internet, podem trocar informações com outros sensores ou sistemas (Gillis *et al*, 2021).

No mercado, a tecnologia IoT é, na maior parte das vezes, ligada aos dispositivos dos “lares inteligentes”; produtos como termostatos, câmeras, sistemas de áudio e segurança e iluminação (Laplante, Kassab *et al.*, 2019).

A estrutura desta tecnologia pode ser exemplificada da seguinte maneira, ilustrada também pela Figura 2:

Figura 2. Esquema de um sistema IoT



Fonte: Elaborado pelo autor

1. Dispositivo: o dispositivo, seja ele um termômetro, uma câmera ou um sistema de áudio, por exemplo, é instalado pelo usuário e então conectado à rede via Wi-Fi ou cabo;

2. Conectividade: o dispositivo é conectado à rede doméstica do usuário, permitindo

que o equipamento utilizado receba e também envie dados à nuvem;

3. Serviços da nuvem: os dados que agora são recebidos e enviados são analisados por meio de algoritmos e disponibilizados para o usuário;

4. Interface: neste nível, o usuário tem acesso aos dados coletados pelo equipamento. Por meio da própria interface, também é possível realizar o controle remoto de alguns eletrônicos, como é o caso de termostatos e de iluminação.

Além das possibilidades de uso doméstico, é possível citar a presença das tecnologias IoT em outros setores, como implantes cocleares (Aburukba e Al-Ali *et al.*, 2016), transportes, como é o caso de radares de velocidade (Xie e Wang, 2017), militar e na agricultura.

No sistema elaborado neste projeto, tem-se a utilização de:

- Sensores de temperatura: capazes de relacionar a variação de temperatura com outra grandeza física, como a variação de tensão (DS18B20) ou de resistência (NTC 10K Ω);
- Sensor TDS (**T**otal **D**issolved **S**olids): dispositivo capaz de verificar a condutividade elétrica de um fluido que será, então, convertido para ppm (**p**artes **p**or **m**ilhão), para aferição da concentração deste fluido.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 DESENVOLVIMENTO E LOCAL DE APLICAÇÃO DO SISTEMA.

O sistema foi elaborado utilizando as instalações do Laboratório de Ultrassom (LUS), localizado no Campus 3, da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP e disponibilizado para uso da estufa de hidroponia do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, no Campus 2, observado na Figura 3.

Figura 3. Estufa de hidroponia do Campus 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 MICROCONTROLADOR ESP32

A base do sistema elaborado foi o microcontrolador ESP32, responsável por integrar todos os sensores assim como receber e transferir informações para a nuvem. A placa utiliza um microprocessador Tensilica Xtensa LX6 capaz de operar entre 160 a 240 MHz, equipada com módulo bluetooth e Wi-Fi (Espressif, 2025).

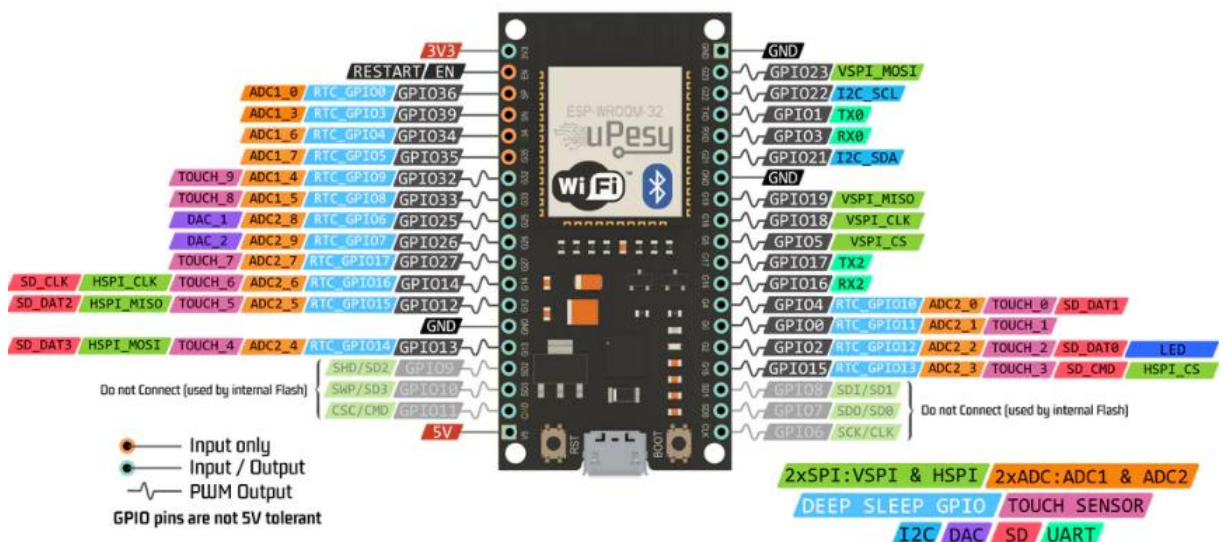
Possui 32 GPIOs (**G**eneral **P**urpose **I**nput/**O**utput), visualizadas na Figura 4, interface I2C, consumo (em modo standby) de 10 μ A, módulo Wi-Fi de 2.4 GHz com até 150 Mbps, módulo Bluetooth 4.2, podendo ser empregado em diversos tipos de aplicações, como serviços de saúde, sensoriamento, dispositivos de áudio, robótica, reconhecimento por imagem e voz, automação industrial e doméstica. Possui

botoeiras externas tanto para inicialização, quanto para reset do hardware, não necessitando a interação direta com a plataforma de programação (Espressif, 2025).

Além disso, é equipado com um conversor ADC (**A**nalog/**D**igital **C**onverter) de série, capaz de processar 18 entradas analógicas simultaneamente, descartando a utilização de um conversor externo. Esta tecnologia também está presente em seu antecessor, o ESP8266, entretanto, era capaz de processar apenas uma entrada por vez (Espressif, 2020).

Segundo a Espressif (2022), este microcontrolador possui um ADC altamente suscetível a ruídos provenientes da fonte de alimentação do microcontrolador ou de dispositivos que estejam conectados ao circuito, o que resulta em um erro na conversão de dados analógicos para digitais de até 6% para mais ou para menos, o que torna necessário o emprego de correções via *software*, a utilização de um ADC externo ou um capacitor conectado diretamente ao pino I/O que recebe dados. Aplicações que não exigem dados com muita precisão não necessitam de métodos de correção.

Figura 4. Esquema de GPIOs do ESP32



Fonte: Adaptado de uPesu (2023)

É possível encontrar este microcontrolador em produtos comerciais, tais como:

- DingTalk M1, um sistema biométrico de frequência;
- Pium, dispositivo de aromas para residências;
- MODUINO SERIES X, módulos de controle industriais.

4.3 ARDUINO IDE

O Arduino IDE (**I**ntegrated **D**evelopment **E**nvironment) é um aplicativo baseado em Java utilizado para promover a integração entre *hardware* e *software* (Arduino, 2024). Utilizando a linguagem C, é possível realizar a comunicação do *software* com o *hardware*.

Os programas produzidos neste ambiente são chamados de **esboços** (“*sketches*”, em inglês). É possível incluir bibliotecas, isto é, programas pré-estabelecidos utilizados em projetos específicos, usados principalmente para fornecer funcionalidades adicionais a um projeto, como a realização de sub-rotinas ou funções (Arduino, 2024).

A plataforma é de uso simples, como visto na Figura 5. A tela inicial contém funções importantes como:

- **VERIFY**: todo o programa é analisado pelo aplicativo antes de ser liberado para upload. Esta função é capaz de identificar erros que causem mau funcionamento do programa;
- **UPLOAD**: após a verificação, o *software* é transferido ao microcontrolador, que, por sua vez, realizará as tarefas contidas nas linhas de código.

Figura 5. Imagem da tela inicial do Arduino IDE contendo um esboço.

```

1  TDS_calibration.ino
2
3  //*****Notice and Trouble shooting*****
4  1. This code is tested on Arduino Uno with Arduino IDE 1.0.5 r2 and 1.8.2.
5  2. Calibration CMD:
6     enter -> enter the calibration mode
7     cal:tds value -> calibrate with the known tds value(25^c). e.g.cal:707
8     exit -> save the parameters and exit the calibration mode
9  *****/
10
11  //#include <EEPROM.h>
12  #include "GravityTDS.h"
13
14  #define TdsSensorPin 35
15  GravityTDS gravityTds;
16
17  float temperature = 25,tdsValue = 0;
18
19  void setup()
20  {
21     Serial.begin(115200);
22     gravityTds.setPin(TdsSensorPin);
23     gravityTds.setAref(5.0); //reference voltage on ADC, default 5.0V on Arduino UNO
24     gravityTds.setAdcRange(4096); //1024 for 10bit ADC;4096 for 12bit ADC
  
```

Output Serial Monitor x

Not connected. Select a board and a port to connect automatically.

Ln 11, Col 3 ESP32-WROOM-DA Module on COM4 [not connected]

Fonte: Elaborado pelo autor

Esta plataforma é parte crucial do sistema como um todo, visto que todo o *software*, assim como suas correções e ajustes, responsável por coletar dados e como disponibilizá-los a nuvem, é produzido via Arduino IDE.

4.4 LINGUAGEM C

É uma linguagem de programação de uso geral e baseada em processos, isto é, até que o resultado desejado seja obtido, o problema deve ser resolvido em partes, seguindo uma ordem determinada.

A linguagem de programação C surgiu nos anos 1970, criado por Dennis Ritchie e permaneceu por diversos anos como uma linguagem amplamente utilizada e popular (Munoz, 2015).

É sucessora da linguagem B, criada em 1969 pelo próprio Ritchie em colaboração com Ken Thompson, desenvolvida pela Bell Labs (Thompson, 1969).

As características mais marcantes da linguagem C são:

- Grande número de operadores aritméticos e lógicos;
- Memória pode ser alocada para programas que utilizam as sub-rotinas;
- Pequeno número de palavras chave, como “if/else”, “for”, “do/while”.

4.5 CONVERSOR ADC EXTERNO ADS1115

Como mencionado na seção 3.2, o microcontrolador escolhido para o projeto é equipado com um ADC integrado. Entretanto, este mesmo componente é responsável por erros no momento da conversão de dados analógicos para digitais, tornando necessário a utilização de um dispositivo externo.

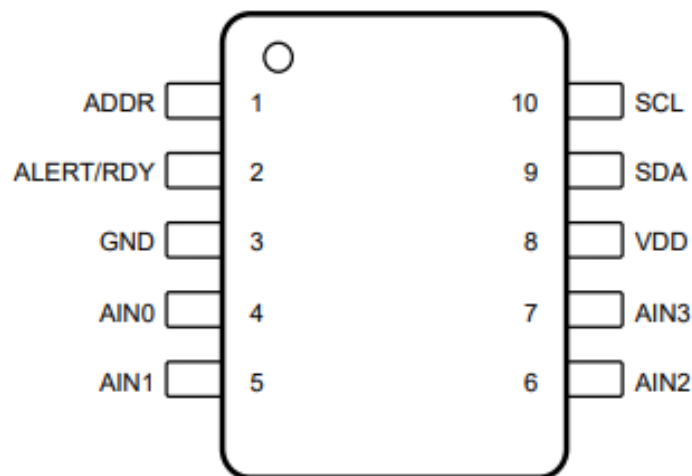
O modelo escolhido foi o ADS1115 pelo seu baixo custo, quatro canais de entrada, comunicação I2C, utilizada também pelo microcontrolador e 16 bits de resolução.

Por exemplo, um ADC de 10 bits, utilizado para um sinal entre 0V e 5V, pode assumir valores binários entre 0 (0000000000) e 1024 (1111111111), ou seja, 1024

níveis discretos deste sinal. Neste mesmo exemplo, para 2,5V, obtém-se o valor binário de 512 (1000010000).

Segundo a Texas Instruments (2009), o ADS1115, visto na Figura 6, é capaz de realizar conversões em uma taxa de 860 amostras por segundo, com um baixo consumo de corrente (150 μ A) e 16 bits (0 a 65.535).

Figura 6. Esquema da pinagem do ADS1115



Fonte: Texas Instruments, 2009

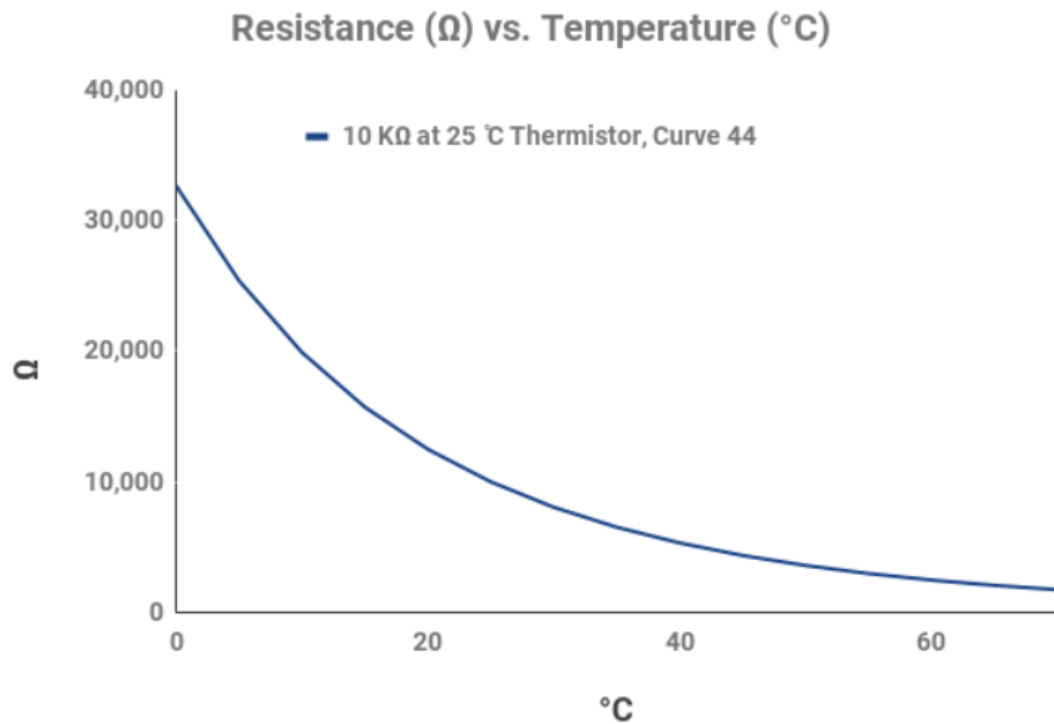
4.6 SENSORES DE TEMPERATURA

Os sensores de temperatura são equipamentos que podem ser analógicos ou digitais. Foram utilizados os sensores NTC 10K Ω (analógico) e o DS18B20 (digital), para a confecção de uma base de dados sólida da variação de temperatura, devido à influência destas flutuações na solubilidade de um fluido.

4.6.1 TERMISTOR NTC 10K Ω

O princípio de funcionamento do NTC (**N**egative **T**emperatura **C**oefficient) baseia-se na variação da resistência conforme as flutuações de temperatura. É tido como coeficiente negativo, pois a resistência oferecida diminui conforme o aumento da temperatura, conforme é apresentado na Figura 7.

Figura 7. Curva de comportamento da resistência em função da temperatura no NTC 10K Ω



Fonte: adaptado de North Star Sensors, 2025

Comercialmente, o sensor é disponibilizado como uma sonda, isto é, o semicondutor é encapsulado em uma pequena ponteira metálica e então selado, para evitar o contato com água ou outro fluido que possa danificá-lo, quando usado para tal fim.

Existem quatro formas básicas para determinar o comportamento da curva do NTC, sendo elas:

VALOR BETA (β):

- O Beta (β) é uma constante que descreve a relação entre a resistência de um termistor NTC e a temperatura. Ele é usado para modelar a variação da resistência em função da temperatura em uma faixa específica de temperatura (Kasap, 2001). A equação que usa o Beta para calcular a resistência $R(T)$ de um termistor é:

$$\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} = \frac{\beta}{T_1 T_2} \left(\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \right) \quad (1)$$

Sendo:

- T_1 e T_2 são as temperaturas em Kelvin;
- R_1 e R_2 são as resistências correspondentes nas temperaturas T_1 e T_2 ;
- β é a constante de Beta do material do NTC.

EQUAÇÃO DE STEINHART-HART

- A Equação de Steinhart-Hart é uma forma mais precisa de modelar a relação entre a resistência R de um NTC e a temperatura T , especialmente em uma ampla faixa de temperaturas (Steinhart, Hart, 1968). Ela é dada por:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln(R)) + C(\ln(R))^3 \quad (2)$$

Sendo:

- T é a temperatura em Kelvin;
- R é a resistência do NTC;
- A , B e C são constantes empíricas determinadas para cada termistor.

RAZÃO TEMPERATURA E RESISTÊNCIA

- A razão temperatura e resistência descreve a relação entre a resistência de um termistor e a temperatura. Para NTCs, a resistência diminui à medida que a temperatura aumenta. Essa relação é geralmente não linear, mas pode ser aproximada por uma função matemática ou por gráficos experimentais (Malvino e Bates, 1970). A mudança de resistência em relação à mudança de temperatura pode ser expressa por:

$$R(T) = R_o(1 - \alpha(T - T_o)) \quad (3)$$

Sendo:

- $R(T)$ é a resistência do termistor a uma temperatura T ;
- R_o é a resistência do termistor a uma temperatura de referência T_o ;
- α é o coeficiente de temperatura, geralmente expresso em $\frac{1}{^\circ\text{C}}$;
- T e T_o são as temperaturas em $^\circ\text{C}$.

VALOR ALFA (α):

- O valor Alfa (α) é o coeficiente de temperatura da resistência. Ele descreve a variação percentual da resistência de um termistor para uma mudança unitária na temperatura (Sze; Lee, 1985). A fórmula para o valor de Alfa é dada por:

$$\alpha = \frac{1 - \frac{R(T)}{R_o}}{T - T_o} \quad (4)$$

É comum encontrar os cálculos e as constantes Beta e Alfa específicas para cada termistor em seus respectivos *datasheets*.

4.6.2 SENSOR DS18B20

Para conferir maior precisão e comparar os resultados dos sensores de temperatura, optou-se pela adoção de um segundo dispositivo digital, diferentemente do anterior.

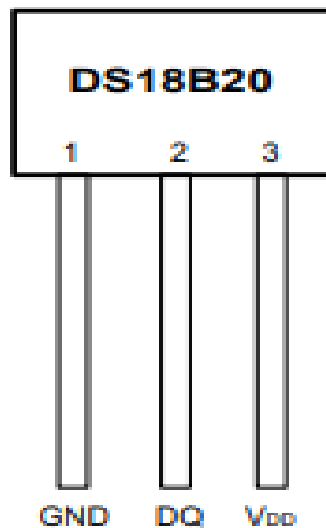
Este tipo de termômetro utiliza a interface 1 - Wire (um cabo), isto é, necessita de apenas uma porta I/O para comunicação, conforme a pinagem vista na Figura 8 (Maxim Integrated, 2019).

Pode ser utilizado em controles termostáticos, sistemas industriais, sistemas residenciais e produtos comerciais (Maxim Integrated, 2019).

Segundo a Maxim Integrated (2019), seus principais recursos são:

- Interface 1 – Wire;
- Faixa de operação entre -55 °C e 125 °C, com erro de 0.5 °C para mais ou para menos na faixa de -10 °C e 85 °C;
- Redução de CIs externos para operação;
- Modo “parasita”, no qual a alimentação do sensor pode ser feita a partir do pino de dados.

Figura 8. Esquema dos pinos do DS18B20



Fonte: Adaptado de Maxim Integrated, 2019

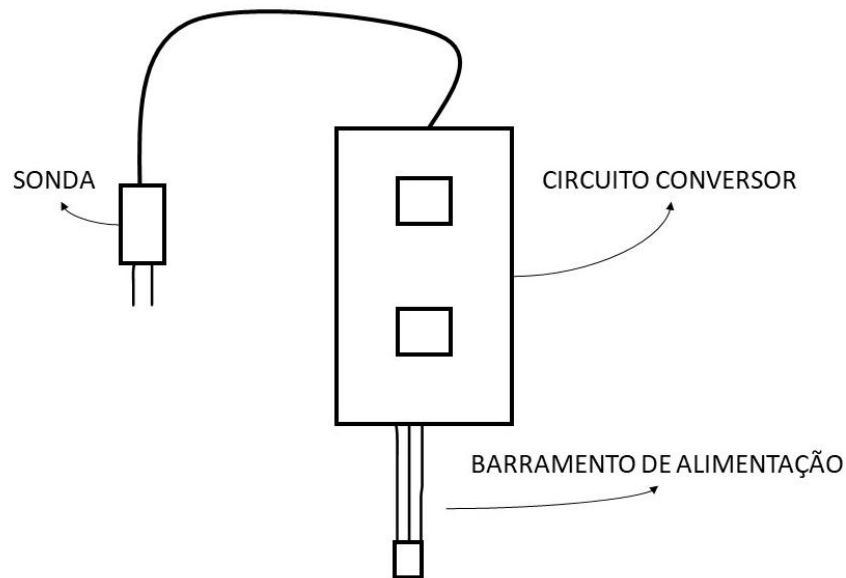
4.7 SENSOR TDS

O sensor TDS (**T**otal **D**issolved **S**olids) foi utilizado para aferir a concentração da solução nutritiva, isto é, a partir dos dados fornecidos por este dispositivo, é possível estimar se a solução utilizada no cultivo possui a quantidade correta de nutrientes que a planta necessita.

Os dados fornecidos por este sensor são obtidos a partir de medições da condutividade elétrica da água, medida em microsiemens (μS). A condutividade elétrica aumenta proporcionalmente à concentração de sólidos dissolvidos na água, ou seja, quanto maior a quantidade de substâncias dissolvidas, maior será a condutividade elétrica. Por outro lado, em condições de menor concentração de sólidos dissolvidos, a condutividade elétrica será reduzida (Osmotics, 2023).

Este dispositivo possui uma sonda que opera submersa em água. Nesta sonda encontram-se dois eletrodos responsáveis por aferir a condutividade elétrica. Esta sonda é conectada a um circuito que transforma os dados analógicos para digitais e, por fim, realiza a comunicação com o ESP32, como é visto na Figura 9.

Figura 9. Esquema de um sensor TDS

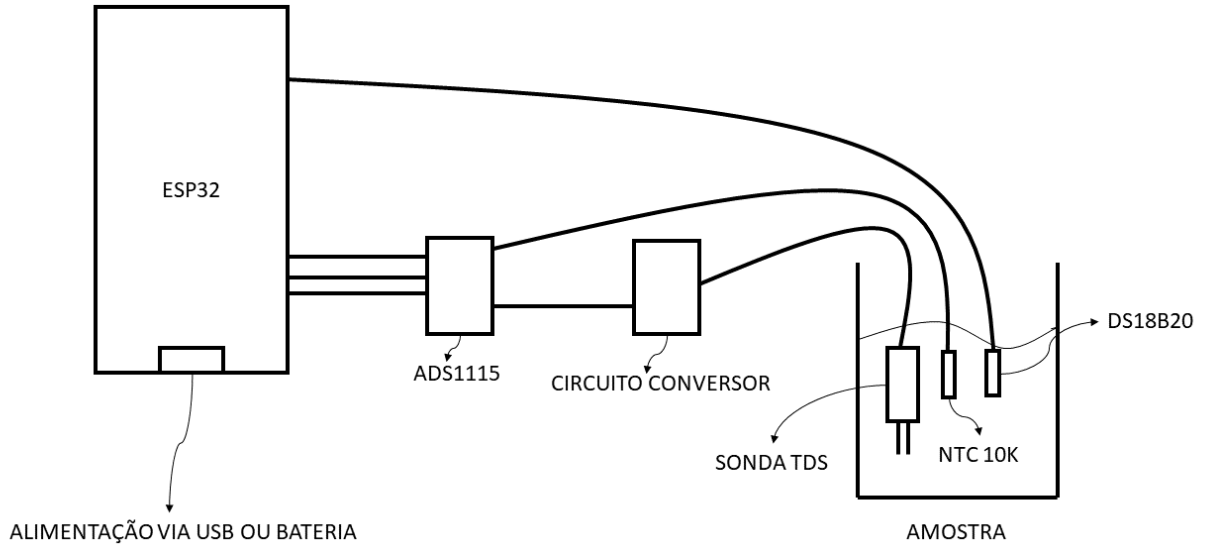


Fonte – Elaborado pelo autor

4.8 MONTAGEM COMPLETA DO SISTEMA

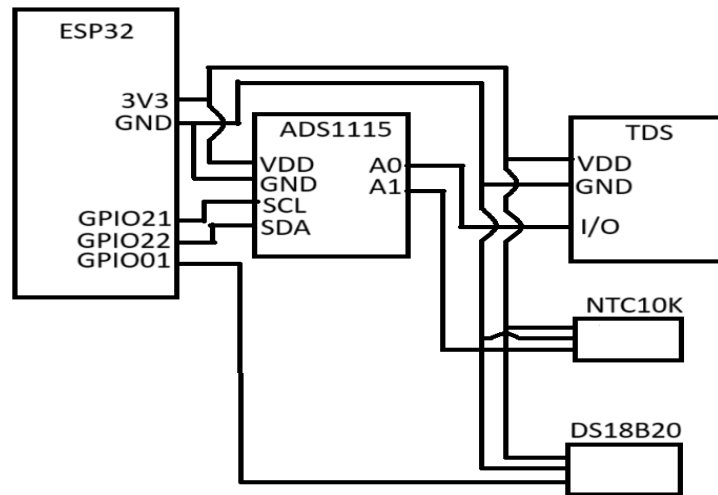
Todos os componentes são integrados pelo ESP32, que executa a maior parte das funções do sistema. Os sensores analógicos (NTC 10K Ω e TDS) são conectados ao ADC externo (ADS 1115) que, por sua vez, é conectado ao microcontrolador, conforme visto nas Figuras 10 e 11.

Figura 10. Esboço do sistema completo



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 11. Esquema de ligação dos componentes considerando as portas específicas



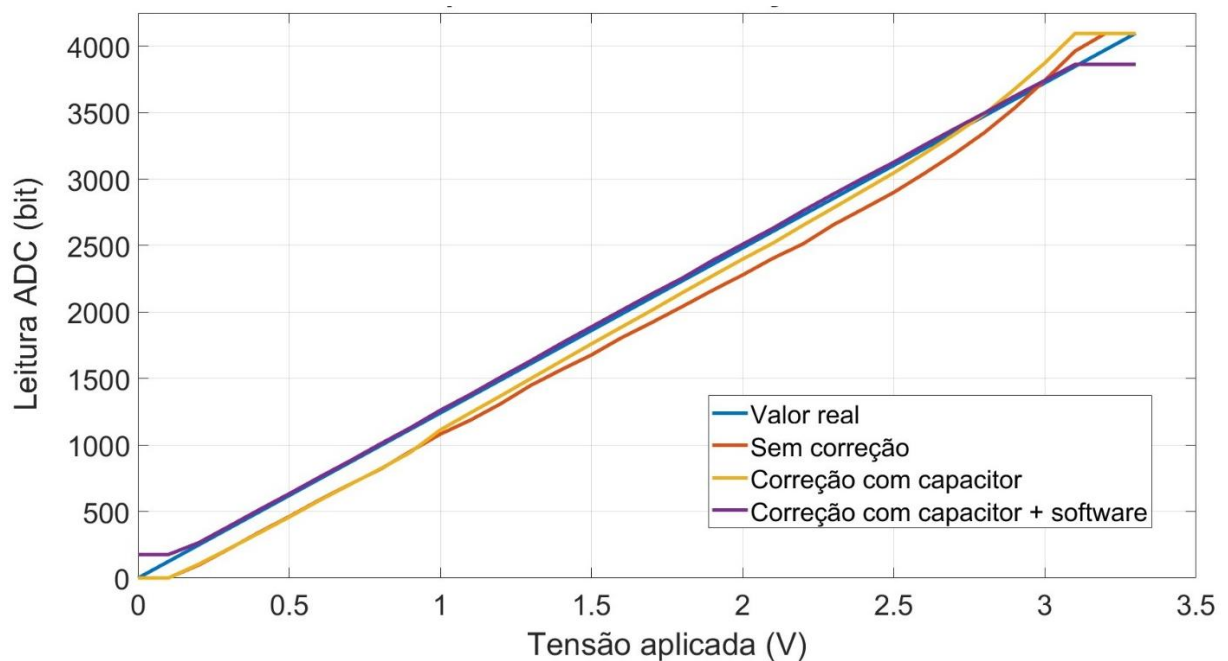
Fonte: Elaborado pelo autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 RESOLUÇÃO DO ERRO DO CONVERSÃO ADC DO MICROCONTROLADOR

Duas das três opções para a correção do erro do ADC foram estudadas no decorrer do projeto: o capacitor externo e a calibração por linhas de código. Os resultados obtidos foram plotados no Matlab e obteve-se o seguinte gráfico, visualizado na Figura 12.

Figura 12. Curvas de comportamento do erro na calibração do ADC interno do ESP32

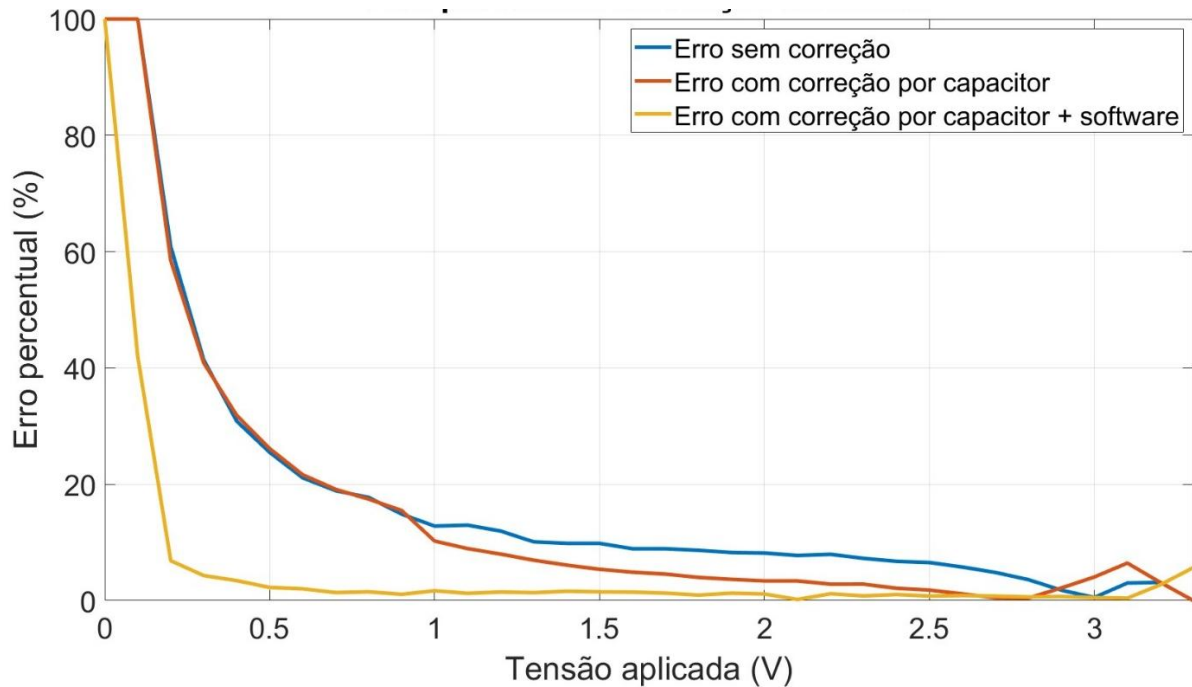


Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas foram obtidas a partir de uma faixa de tensões de 0 V até 3.3 V, com intervalos de 0.1 V. Percebe-se que com a utilização do capacitor e a calibração por *software* (ilustrada em verde), a curva de conversão aproxima-se com bastante precisão do valor real da conversão (ilustrada em azul claro). Nota-se também pequenos platôs no início e no fim das curvas em vermelho e verde. Nestes pontos, o ADC não possui a capacidade de operar com precisão, implicando que tensões como 3.2 V ou 3.3 V, por exemplo, assumam o mesmo valor em bits.

A partir do comportamento de cada meio de correção, foi possível identificar o erro percentual conforme o acréscimo da tensão, como é visualizado na Figura 13.

Figura 13. Erro percentual do respectivo meio de correção a partir da variação de tensão



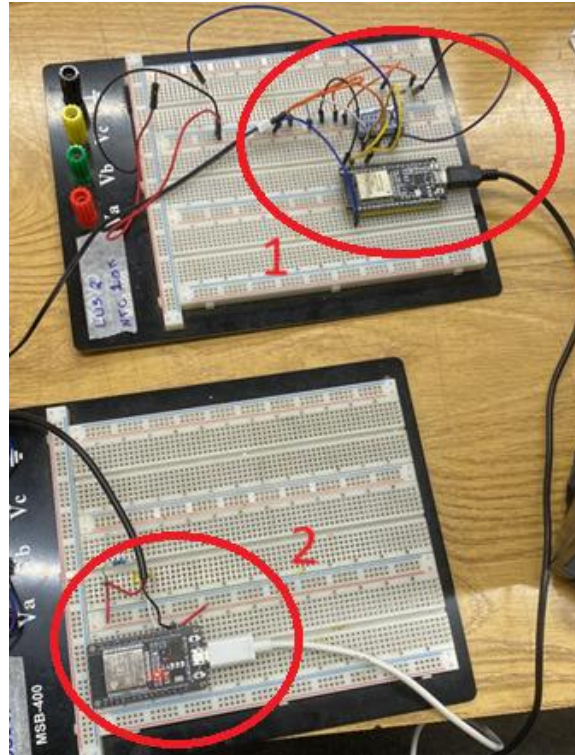
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a tensão é incrementada, o erro aproximou-se de zero próximo à tensão máxima suportada pelo microcontrolador para todos os métodos de correção.

5.2 COMPORTAMENTO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Assim que a coleta dos dados da correção do ADC foi concluída, utilizou-se um segundo ESP32 para a produção da base de dados dos termômetros, como visto na Figura 14.

Figura 14. Imagem do NTC 10K e DS18B20 instalados em microcontroladores ESP32



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se claramente a diferença na composição de cada módulo sensorial: no circuito de número 1, encontra-se o NTC 10K, que utiliza também o ADS1115, ao passo que, no circuito de número 2, encontra-se o DS18B20, conectado diretamente ao ESP32, por já ser um dispositivo digital.

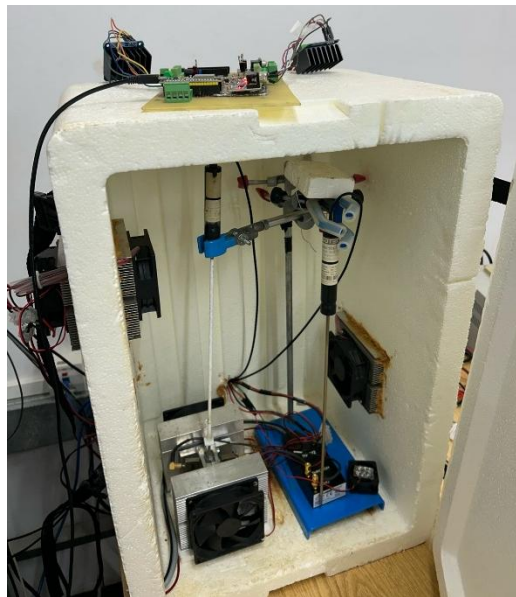
Ambos os termômetros foram inseridos em um recipiente com água e então posicionados em uma caixa de isopor selada. A temperatura do fluido era regulada por meio de um terceiro sistema disponível no Laboratório de Ultrassom que utilizava como base o termômetro de alta precisão milliK, da fabricante inglesa Isotech, como é visto nas Figuras 15 e 16, a seguir.

Figura 15. Imagem do termômetro de alta precisão milliK



Fonte: Adaptado de Isotech (2025)

Figura 16. Sistema térmico disponível no laboratório



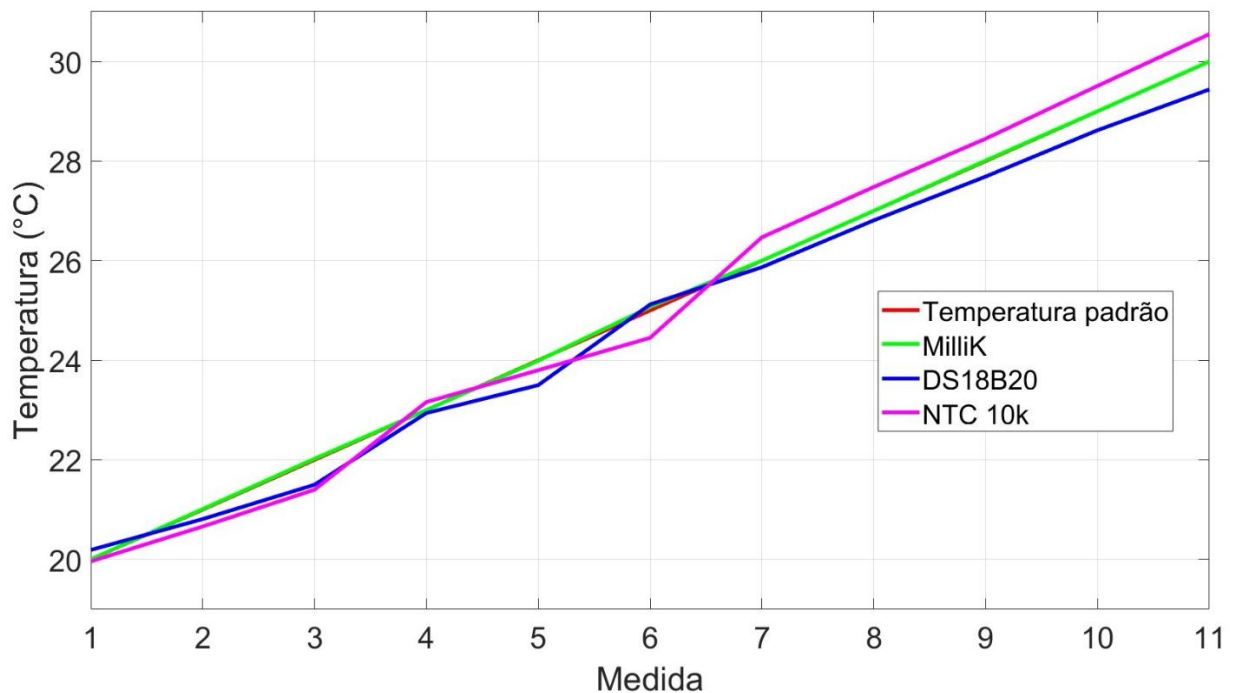
Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizadas três aferições para cada temperatura, dentro de um intervalo de 20 °C a 30 °C e, então, comparadas com o termômetro de precisão. Com a média das aferições, confeccionou-se a Tabela 1.

Tabela 1 – Aferições de temperatura com NTC 10K e DS18B20

TEMPERATURA (°C)	MILLIK (°C)	NTC10K (°C)	DS18B20 (°C)
20	20.00	19.96	20.19
21	21.01	20.66	20.81
22	22.02	21.40	21.50
23	23.00	23.16	22.94
24	23.99	23.80	23.50
25	25.07	24.45	25.12
26	26.00	26.47	25.87
27	27.00	27.48	26.81
28	28.01	28.45	27.69
29	29.00	29.51	28.62
30	30.00	30.55	29.44

Com base na Tabela 1, obteve-se o seguinte gráfico:

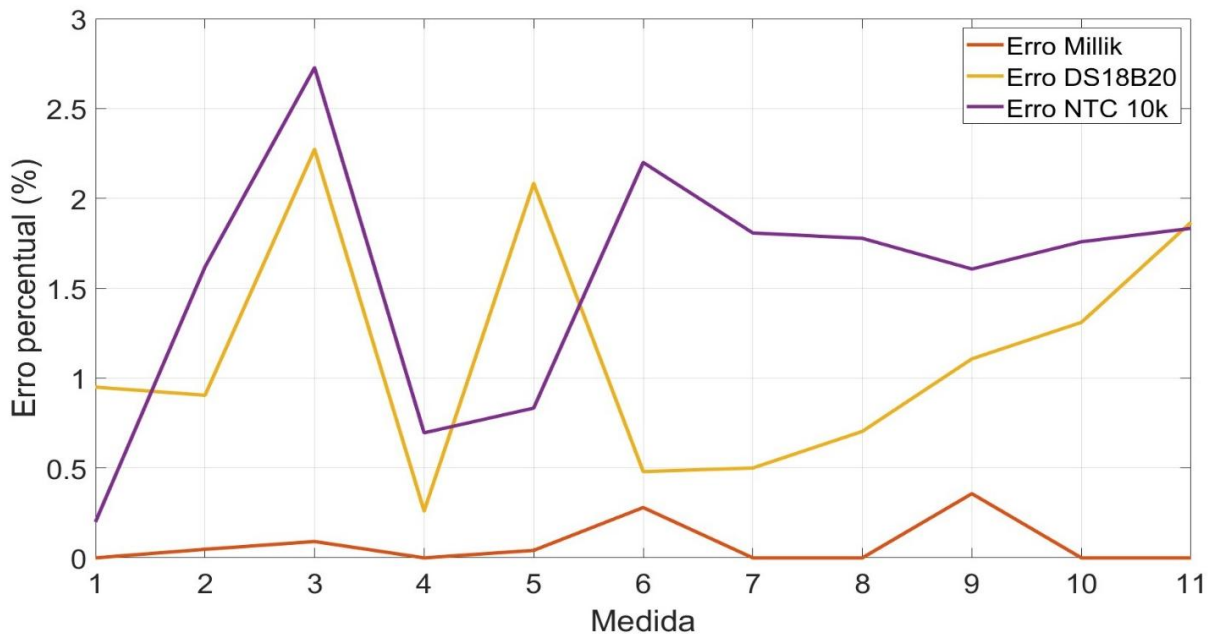
Figura 17. Curvas de comportamento da temperatura lida pelos termômetros

Fonte: Elaborado pelo autor

As curvas observadas na Figura 17 foram obtidas por meio da variação gradual da temperatura até que se atingisse o próximo grau. Uma vez atingida a temperatura desejada, o sensor era deixado imerso no fluido até que sua leitura também se estabilizasse. Assim que fosse coletada, o sensor era retirado do sistema térmico e deixado à temperatura ambiente por cerca de 10 minutos. Logo após este tempo, a próxima medição era realizada.

Os erros percentuais de cada medida são exibidos na Figura 18.

Figura 18. Erro percentual de cada termômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Percebe-se a diferença dos sensores utilizados no projeto para um termômetro industrial de alta precisão. Enquanto a variação máxima do Millik foi de apenas 0,07 °C, o NTC 10K apresentou uma variação máxima de 0,60 °C. Já o DS18B20 apresentou 0,56 °C.

5.3 PROJETO DO SENSOR TDS

Assim como realizado para os sensores de temperatura, os dados obtidos pelo TDS foram comparados com o modelo comercial utilizado na estufa, o TDS – 3, vistos nas Figuras 19 e 20.

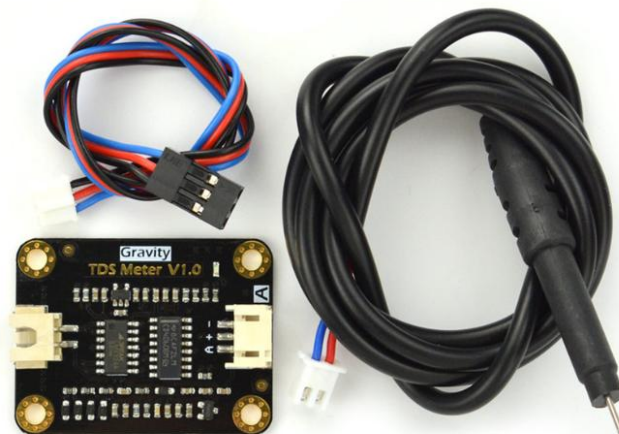
Figura 19. Sensor TDS-3 utilizado na estufa



Fonte: Adaptado de Metravi, 2025

Este é considerado um modelo de entrada, entretanto, possui resolução de até 9990 ppm e capacidade de operar em temperaturas de até 50°C e acurácia de 2% para mais ou para menos (Metravi, 2025). Por outro, o condutivímetro de bancada utilizado com o microcontrolador é ainda mais simples, com resolução de apenas 1000 ppm, com acurácia de 10% para mais ou para menos (DFRobot, 2025).

Figura 20. Sensor TDS utilizado com o microcontrolador



Fonte: Adaptado de DFRobot, 2025

A partir de nove amostras de solução nutritiva fornecidas pelo grupo de pesquisa de Hidroponia, foi possível confeccionar a Tabela 2.

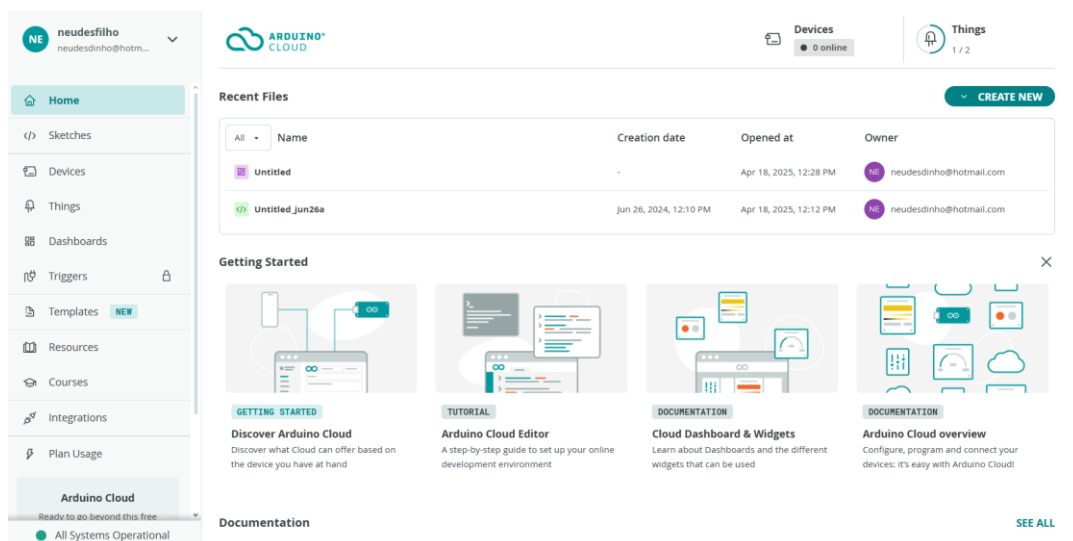
Tabela 2 – Dados obtidos pelo TDS projetado em comparação ao modelo comercial

AMOSTRAS (μS)	CONDUTIVÍMETRO COMERCIAL (μS)	CONDUTIVÍMETRO CONECTADO AO ESP32 (μS)	DIFERENÇA PERCENTUAL (%)
800	856	734	14.88
1500	1536	1286	17.72
2500	2500	1634	41.9

Nota-se a grande diferença entre um modelo disponível em mercado para o condutivímetro utilizado em conjunto com o microcontrolador, principalmente na faixa superior a 2000 μS , pois é o ponto máximo que o sensor TDS pode operar. Para a faixa de 800 e 1500 μS , a diferença percentual apresentada foi de 14.88% e 17.72%, respectivamente. Devido a natureza dos materiais utilizados, o erro esperado e considerado regular na literatura é entre 5% a 10%.

5.4 EXIBIÇÃO DE DADOS NA PLATAFORMA IOT

A finalização do projeto deu-se com a elaboração da interface IoT responsável por agrupar e exibir todos os dados coletados para o usuário. A Figura 21, a seguir ilustra a página inicial da plataforma.

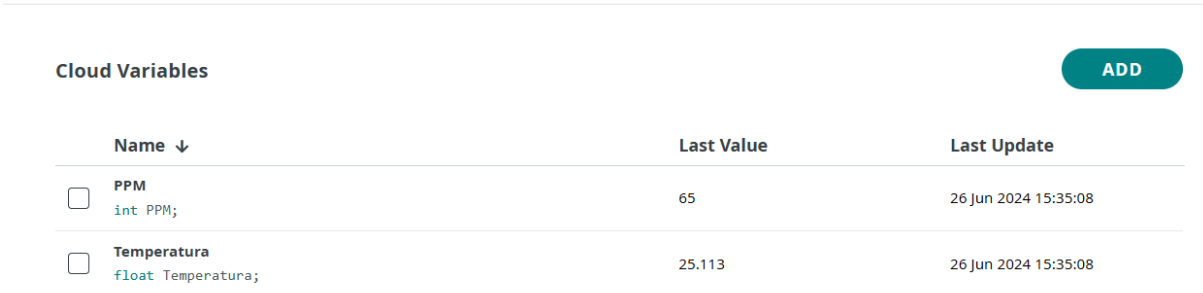
Figura 21. Imagem da página inicial da plataforma

Fonte: Elaborado pelo autor

A esquerda, tem-se todos os recursos que o programador poderá ter acesso enquanto produz os gráficos a serem exibidos para quem deseja monitorar os dados coletados de condutividade elétrica e temperatura. Estas variáveis só podem ser exibidas uma vez declaradas na aba “*Things*”. Por meio desta opção, é possível determinar se esta variável é um número inteiro (int) ou um número de pontos flutuantes (float), como é visto na Figura 22.

Na aba “*Devices*”, é fornecida a relação de todos os microcontroladores que estejam conectados à plataforma, bem como o histórico de atividade de cada dispositivo, como visto na Figura 23.

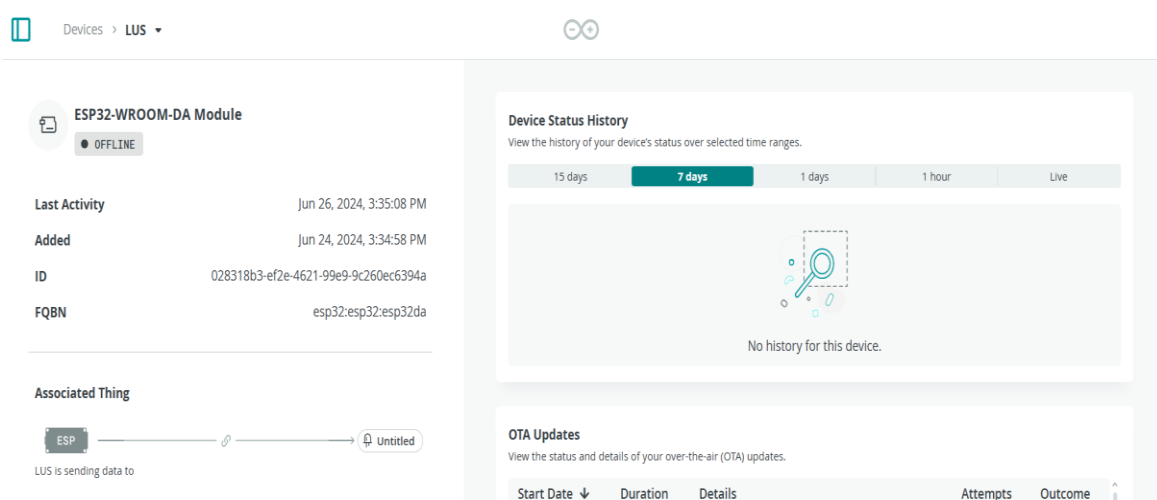
Figura 22. Imagem da seção “*Things*” exibindo as duas variáveis coletadas pelo módulo



Cloud Variables ADD		
Name ↓	Last Value	Last Update
<input type="checkbox"/> PPM int PPM;	65	26 Jun 2024 15:35:08
<input type="checkbox"/> Temperatura float Temperatura;	25.113	26 Jun 2024 15:35:08

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23. Imagem da seção “*Devices*” exibindo o microcontrolador utilizado no projeto



Devices > LUS ▾

ESP32-WROOM-DA Module
● OFFLINE

Last Activity Jun 26, 2024, 3:35:08 PM
Added Jun 24, 2024, 3:34:58 PM
ID 028318b3-ef2e-4621-99e9-9c260ec6394a
FQBN esp32:esp32:esp32da

Associated Thing
ESP → Untitled
LUS is sending data to

Device Status History
View the history of your device's status over selected time ranges.

15 days **7 days** 1 days 1 hour Live

No history for this device.

OTA Updates
View the status and details of your over-the-air (OTA) updates.

Start Date ↓	Duration	Details	Attempts	Outcome
--------------	----------	---------	----------	---------

Fonte: Elaborado pelo autor

Na coluna “Name”, é exibido a lista de variáveis. A coluna “Last Value” exibe qual o último valor da variável que foi coletado. Já a coluna “Last Update” mostra qual foi o último momento em que esta variável teve seus dados atualizados. De modo que a comunicação entra a nuvem e o microcontrolador ocorra de modo regular, tanto o programa contido na ESP32 quanto aquele presente na plataforma, devem ser o mesmo, conforme visto na Figura 24.

Figura 24. Imagem do programa inserido na nuvem

```

1  #include <Adafruit_ADS1X15.h>
2  #include "thingProperties.h"
3
4
5
6  // Parâmetros para o TDS
7  #define VREF 3.25      // tensão de referência do ADC
8  #define SCOUNT 50     // soma das amostras point
9  int analogBuffer[SCOUNT]; // guarda o valor analógico na ordem, lido do ADC
10 int analogBufferTemp[SCOUNT];
11 int analogBufferIndex = 0, copyIndex = 0;
12 float averageVoltage = 0;
13 float volt1 = 0, adc1corrigido = 0;
14
15
16
17
18 //Parâmetros para o NTC
19 float Vs = 3.25; // TENSÃO DE SAIDA DO ESP32
20 int R1 = 10000; //RESISTOR UTILIZADO NO DIVISOR DE TENSÃO
21 int Beta = 3380; // VALOR DE BETA
22 float To=298.15; // VALOR EM KELVIN REFERENTE A 25° CELSIUS
23 int Ro=10000;
24 float adcMax = 4095.0;

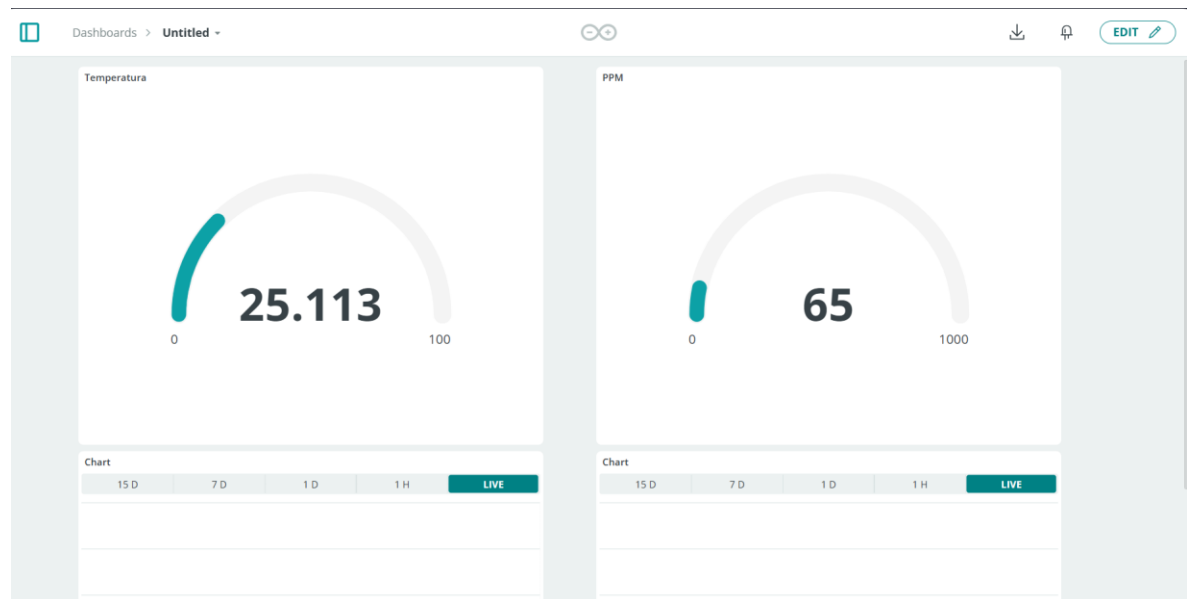
```

Fonte: Elaborado pelo autor

Para isto, o mesmo programa que o microcontrolador executa por meio do ambiente Arduino IDE deverá ser incluído na aba “Sketches”, visualizado na Figura 21.

A partir destas configurações e com os parâmetros estabelecidos anteriormente, a visualização dos dados coletados deu-se da seguinte maneira, conforme a Figura 25.

Figura 25. Dados coletados pelo microcontrolador sendo exibidos em tela



Fonte: Elaborado pelo autor

Para que os dados coletados pelo módulo fossem exibidos na plataforma IoT, como visto na Figura 25, realizou-se a configuração dos gráficos na aba “Dashboards”, também vista na Figura 21. Na esquerda, tem-se a exibição da temperatura coletada pelo DS18B20 enquanto que, na direita, tem-se os dados de condutividade elétrica já convertidos em ppm. Ambos os parâmetros contidos na Figura 25 apresentam dados coletados em laboratório.

Este *dashboard* pode ser editado conforme a necessidade do usuário, permitindo que mais informações sejam adicionadas ou retiradas, como, por exemplo, dados coletados por um sensor de pH.

Além disso, esta seção também fornece curvas, ou *charts*, do comportamento dos parâmetros em um intervalo de tempo ou em tempo real, que também podem ser vistos na Figura 25.

Uma vez realizadas todas as configurações, os dados são disponibilizados em tempo real para monitoramento tanto por computador quanto por celular,

6. CONCLUSÃO

O projeto mostrou-se desafiador, principalmente em questões que envolviam correções de erros contidos no microcontrolador. As falhas com o ADC evidenciaram que, para que o uso do ESP32 seja sustentado e justificado, devem haver melhorias na correção de dados durante a conversão de analógico para digital.

Mesmo não tendo sido instalada nas canaletas da hidroponia, os testes com as amostras da solução nutritiva utilizada na estufa indicaram, também, que o sistema é suscetível à oxidação das ponteiros do sensor TDS, tornando a vida útil de apenas três meses até que o equipamento seja comprometido.

Apesar dos dados coletados pelos sensores de temperatura serem satisfatórios para a confiabilidade dos dados fornecidos pelo módulo, o condutivímetro não apresenta leituras satisfatórias, com erro percentual para a faixa de 1500 μS próximo a 18% e, para 800 μS , 15%.

Tais resultados percentuais são fruto da propagação dos erros que foram exibidos anteriormente.

Em suma, o sistema seria beneficiado pela utilização de materiais e sensores de maior qualidade, tendo em vista o erro intrínseco do ADC do microcontrolador e a susceptibilidade do sensor TDS a oxidar.

Para versões futuras, é interessante considerar a implementação de um atuador, como uma bomba d'água, para realizar a irrigação de forma automática, com base na leitura de sensores de umidade do solo, ou ainda para fornecer nutrientes à planta de maneira controlada; investigar o uso do supervisório ScadaBR como alternativa para o monitoramento e manutenção do sistema; considerar o uso de sensores e atuadores adicionais para o controle de variáveis ambientais, como vazão e luminosidade, especialmente para plantas que demandam condições específicas de cultivo.

REFERÊNCIAS

ABURUKBA, Raafat; AL-ALI, A. R.; KANDIL, Nourhan; ABUDAMIS, Diala. **Configurable ZigBee-based control system for people with multiple disabilities in smart homes**. Sharjah, United Arab Emirates: IEEE, 13 mar. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7462435>. Acesso em: 28 mar. 2025.

ANUÁRIO BRASIL HIDROPONIA. **Produtores, empreendedores e pesquisadores na luta pelo avanço da Hidroponia**. *Hidroponia*, [s. l.], ed. 1, 2020. Disponível em: https://cdn.plataformahidroponia.com/wp-content/uploads/2024/01/Anuario_Brasil_Hidroponia_amostra_gratis.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

ARDUINO. **Overview of the Arduino IDE 1: Everything you need to know about the Arduino IDE 1, the classic offline editor**. [S. l.], 17 jan. 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/Environment/>. Acesso em: 28 mar. 2025.

BARCELOS, Jorge. **Vantagens da Hidroponia: Maior qualidade dos produtos e economia de insumos são alguns dos benefícios do cultivo sem solo**. Anuário Brasil Hidroponia, [S. l.], n. 1, p. 6-146, 1 jan. 2020. Disponível em: https://cdn.plataformahidroponia.com/wp-content/uploads/2024/01/Anuario_Brasil_Hidroponia_amostra_gratis.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

DFROBOT. **Gravity Analog TDS Sensor Meter For Arduino SKU SEN0244**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor___Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244. Acesso em: 18 maio 2025.

DJI. **DJI: Agriculture**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://ag.dji.com/pt-br>. Acesso em: 6 maio 2025.

ESPRESSIF. **ESP32 Series: Datasheet Version 4.8**. 4.8. ed. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

ESPRESSIF. **ESP8266: Technical Reference**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

GILLIS, Alexander S.; YASAR, Kinza. **Internet of things (IoT)**. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>. Acesso em: 28 mar. 2025.

ISOTECH. **MilliK Precision Thermometer**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://isotech.co.uk/products/millik-precision-thermometer/>. Acesso em: 29 abr. 2025.

JOHN DEERE. **Colheitadeira de Grãos Série X**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/colheitadeira-graos-serie-x/>. Acesso em: 6 maio 2025.

KASAP, S. O. **Principles of Electronic Materials & Devices**. 4. ed. [S. l.]: McGraw Hill Education, 2001.

LAPLANTE, Phillip A.; KASSAB, Mohamad; LAPLANTE, Nancy L.; VOAS, Jeffrey M. **Building Caring Healthcare Systems in the Internet of Things**. [S. l.]: National Library Of Medicine, 9 maio 2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6506834/>. Acesso em: 28 mar. 2025.

LÉLIS, Alexandre da Trindade et al. **O uso de um sistema hidropônico aplicado na agricultura familiar**. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, Curitiba - PR, v. 21, ed. 11, 2023.

MALVINO, Albert; BATES, David J. **Electronic Principles**. 7. ed. [S. l.]: McGraw Hill Education, 1070.

MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca Silveira; LEITE, Maria Angelica de Andrade. **Agro 4.0 - rumo à agricultura digital. JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil**, [s. l.], ed. 2, p. 28-35, 2018.

MAXIM INTEGRATED. DS18B20: **Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2025.

METRAVI. **Digital TDS Meter: TDS-3**. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.metravi.com/wp-content/uploads/Metravi-TDS-3-Digital-Portable-TDS-meter-Catalogue.pdf?srsltid=AfmBOopeN06gzQk3yUO_BpKTXmGR-To38HbgQ5OPKXAhkd31vfb5Q5jo. Acesso em: 18 maio 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de hidroponia e análise de ações - Tendências e previsões de crescimento (2024 - 2029)**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/hydroponics-market>. Acesso em: 28 mar. 2025.

MUNOZ, Daniel. **After All These Years, the World Is Still Powered by C Programming**. *Toptal Developers*, [S. l.], p. 1, 1 jan. 2015. Disponível em: <https://www.toptal.com/c/after-all-these-years-the-world-is-still-powered-by-c-programming>. Acesso em: 28 mar. 2025.

NORTH STAR SENSORS, LLC. **Calculating Temperature from Resistance**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.northstarsensors.com/calculating-temperature-from-resistance>. Acesso em: 31 mar. 2025.

OSMOTICS LTD. **Understanding TDS Meters: How Do They Work and Which Products to Consider**. [S. l.], 30 abr. 2023. Disponível em: https://www.osmotics.co.uk/blog/post/tds-meters-explained-osmotics?srsltid=AfmBOooYIKZgVY_EuDr8RBERt8f66zrqFbe0FrVp11WdXk993l-JTwfQ. Acesso em: 31 mar. 2025.

STEINHART, John S.; HART, Stanley R. **Calibration curves for thermistors**. 4. ed. [S. l.]: s. n., 1968.

SZE, S. M.; LEE, M. K. **Semiconductor Devices: Physics and Technology**. 3. ed. rev. United States of America: John Wiley & Sons, 2010.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator: Revised 2024**. [S. l.], 2009. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf?ts=1741452561637&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FADS1115. Acesso em: 31 mar. 2025.

THOMPSON, K. **Users Reference Guide to B**. [S. l.]: Bell Telephone Laboratories, 1969. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20150611114427/https://www.bell-labs.com/usr/dmr/www/kbman.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2025.

UPESY. **ESP32 Wroom Devkit Pinout: Use the ESP32 GPIO pins**. [S. l.], 21 mar. 2023. Disponível em: <https://www.upesy.com/blogs/tutorials/esp32-pinout-reference-gpio-pins-ultimate-guide>. Acesso em: 28 mar. 2025.

XIE, Xiao-Feng; WANG, Zun-Jing. **Integrated In-Vehicle Decision Support System for Driving at Signalized Intersections: A Prototype of Smart IoT in Transportation**. [S. l.]: National Academies - Transportation Research Board, 1 jan. 2017. Disponível em: <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1437314>. Acesso em: 28 mar. 2025.