



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOAQUIM FLÁVIO ALMEIDA QUIRINO GOMES

SISTEMA IOT MODULAR DE MONITORAMENTO PARA HIDROPONIA

**PALMAS – TO
2023**

JOAQUIM FLÁVIO ALMEIDA QUIRINO GOMES

SISTEMA IOT MODULAR DE MONITORAMENTO PARA HIDROPONIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, *Campus* Palmas, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus André Pereira Oliveira.

**PALMAS – TO
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

G633s Gomes, Joaquim Flávio Almeida Quirino
 SISTEMA IOT MODULAR DE MONITORAMENTO PARA
 HIDROPONIA / Joaquim Flávio Almeida Quirino Gomes. – Palmas, TO,
 2023.

 108 p. : il. color.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus
 Palmas, Palmas, TO, 2023.

 Orientador: Dr. Marcus André Pereira Oliveira

 1. Sistema de monitoramento para Hidroponia. 2. Sistema modular. 3.
 IoT. I. Oliveira, Marcus André Pereira. II. Título.

CDD 621

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

JOAQUIM FLAVIO ALMEIDA QUIRINO GOMES

SISTEMA IOT MODULAR DE MONITORAMENTO PARA HIDROPONIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência à obtenção do Título de Bacharel do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Tocantins, *Campus* Palmas.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente

MARCUS ANDRÉ PEREIRA OLIVEIRA

Data: 04/01/2024 10:41:02-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Marcus André Pereira Oliveira
Orientador
IFTO – *CAMPUS* PALMAS



Documento assinado digitalmente

WENDELL EDUARDO MOURA COSTA

Data: 09/01/2024 12:00:07-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Wendell Eduardo Moura Costa
IFTO – *CAMPUS* PALMAS



Documento assinado digitalmente

MAXWELL MOURA COSTA

Data: 10/01/2024 15:35:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor Maxwell Moura Costa
IFTO – *CAMPUS* PALMAS

AGRADECIMENTOS

A finalização deste trabalho de conclusão de curso marca não apenas o término de um ciclo acadêmico, mas também representa a concretização de um esforço conjunto, no qual diversos indivíduos desempenharam papéis fundamentais. Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram de maneira significativa ao longo desta jornada.

Primeiramente, manifesto meu profundo agradecimento à minha mãe, Alane Almeida Quirino, cujo apoio e orientação foram pilares essenciais durante toda a vida. À toda minha família, em especial aos meus avós Adelina Almeida e Nelson Quirino, mas também aos meus tios Soelicy Almeida e Adenilson Quirino, meus irmãos Hector Jean e Maria Alice. Estendo meu reconhecimento também aos familiares Adenisia Quirino, Erich Manoel e Hildo Riveira, pelos votos e apoio dedicados.

No âmbito acadêmico, agradeço aos professores que, para além do papel didático, desempenharam a função de mentores e amigos. Ao professor Dêmis Carlos, Marcos Dias e Marcus André, minha gratidão pela dedicação que se revelou crucial para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos, cuja presença foi constante, agradeço a amizade, compreensão e apoio incondicional. Juntos, enfrentamos desafios e celebramos conquistas, construindo memórias que levarei comigo. Cabendo um agradecimento especial ao Engenheiro Alisson Neres, por todo o empenho e apoio para a concretização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, influenciaram positivamente minha trajetória, meu profundo agradecimento. Este trabalho é resultado não apenas de esforço pessoal, mas também do suporte significativo proporcionado por cada um de vocês. Que este momento de gratidão traduza, igualmente, meu compromisso de aplicar os conhecimentos adquiridos para contribuir de forma efetiva para a sociedade.

Agradeço a todos!

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema IoT de monitoramento modular para hidroponia, visando maior flexibilidade e menores custos para a implantação. No decorrer do corpo do trabalho serão abordadas: as vantagens e desafios da hidroponia, a teoria e operação da medição de parâmetros de qualidade de água por meio de do desenvolvimento de circuitos eletrônicos. As etapas e decisões tomadas para o desse sistema, circuitos, equações e custos estarão incluídos bem como seus resultados e discussões.

Palavras-chave: Sistema de monitoramento para Hidroponia. Sistema modular. IoT.

ABSTRACT

This work describes the development of a modular IoT monitor system to hydroponia, aiming at greater flexibility and lower costs to implantation. Through the main body of the work will be approached about the benefits and challenges of hydroponia, including the theory and measurement water quality instrumentation through the development of electronic circuits. The steps and decisions for this system, circuits, equations, and costs will be included also like its results and considerations.

Keywords: Hydroponic monitor system. Modular System. IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de funcionamento do sistema NFT.	16
Figura 2 – Modelo de funcionamento do sistema DFT.	16
Figura 3 – Modelo de funcionamento do sistema DWC.	17
Figura 4 – Modelo de funcionamento do sistema aeropônico.	18
Figura 5 – Modelo de funcionamento do sistema com substrato inerte.	18
Figura 6 – Libelium Smart Water Pro	20
Figura 7 – SXH Hydroponics Nutrient.	21
Figura 8 – Egrower.	22
Figura 9 – Arquitetura típica de aplicações IoT.	24
Figura 10 – Circuito de operação da sonda de TSS.	26
Figura 11 – Relação entre turbidez e tensão.	26
Figura 12 – Estrutura de uma célula com dois eletrodos.	28
Figura 13 – Esquema de uma célula de condutividade	28
Figura 14 – Acúmulo de espécies iônicas na superfície do eletrodo	30
Figura 15 – Resistência de polarização	30
Figura 16 – Efeito das correntes de Foucault	31
Figura 17 – Migração de elétrons pela membrana.	34
Figura 18 – Composição do eletrodo de pH.	35
Figura 19 – Adição do referencial para medição	36
Figura 20 – Resistência do vidro de pH vs Temperatura	37
Figura 21 – Reta para calibração do sensor de pH.	38
Figura 22 – Modelo de comunicação estrela LoRa.	41
Figura 23 – Modelo AceLoRa.	43
Figura 24 – Diagrama do fluxo de mensagens na Gateway AceLoRa	44
Figura 25 – KoIoT - AcDc	45
Figura 26 – Dashboard desenvolvido no Grafana.	47
Figura 27 – Features do ESP32-S3.	48
Figura 28 – Esquemático de ligação ESP32-S3.	50
Figura 29 – Esquema de ligação modulo LoRa.	50
Figura 30 – Esquema de ligação de carregamento de bateria.	51
Figura 31 – Esquema de conexão do circuito de proteção contra baixa tensão.	52
Figura 32 – Esquema de conexão para monitoramento dos níveis de tensão.	53

Figura 33 – Esquema de chaveamento dos sensores.	53
Figura 34 – Esquema de ligação cartão microSD.....	54
Figura 35 – Socket para microSD.....	54
Figura 36 – Esquema de ligação do LED de alerta do LoRa.	55
Figura 37 – Esquema de ligação do LED de estado do painel solar.	56
Figura 38 – Conectores para update de firmware da AceLora.	57
Figura 39 – Conectores de potência da AceLoRa.	57
Figura 40 – Conectores para os módulos de sensores da AceLoRa.	57
Figura 41 – Modelo 2D da placa AceLoRa.	58
Figura 42 – Modelo 3D da placa AceLoRa.	58
Figura 43 – Conectores BNC macho e fêmea.	59
Figura 44 – Conectores família GX16 macho e fêmea.	59
Figura 45 – Sonda pH.....	60
Figura 46 – Esquema para condicionamento de sinal de pH.....	61
Figura 47 – Esquema de ligação dos moduladores de tensão.....	62
Figura 48 – Modelos 2D e 3D da placa PHM.	63
Figura 49 – Probe DJS-1E.	64
Figura 50 – Esquema de ligação do circuito gerador de frequência.....	65
Figura 51 – Esquema para condicionamento de sinal de condutividade.	65
Figura 52 – Circuito para adequação de tensão da ECM.	66
Figura 53 – Esquema de ligação do Charge Pump Voltage.	66
Figura 54 – Modelos 2D e 3D da placa ECM.	67
Figura 55 – Encapsulamento SEN0189.....	69
Figura 56 – Esquema de ligação do sensor TSS.....	70
Figura 57 – Circuito de regulação de tensão da TSS.....	70
Figura 58 – Modelos 2D e 3D da placa TSS.	70
Figura 59 – Curva de performance típica segundo o fabricante.....	71
Figura 60 - DS18B20.....	72
Figura 61 – Esquema de ligação do DS18B20.	72
Figura 62 – Modelos 2D e 3D da placa AWT.....	73
Figura 63 – Sensor PH-80.	75
Figura 64 – Sensor COM-80.	76
Figura 65 – Modelo 3D da caixa de proteção.....	79
Figura 66 – Fluxograma software AceLoRa.	80

Figura 67 – Diagrama de tasks da AceLoRa.	81
Figura 68 – Fluxograma da rotina de leituras dos sensores.....	82
Figura 69 – Diagrama de tasks Gateway AceLoRa.	83
Figura 70 – Estrutura utilizada no CSV.....	84
Figura 71 – Estrutura utilizada no JSON.....	84
Figura 72 – Interface de configuração da AceLora.	86
Figura 73 – AceLoRa montada em sua caixa de proteção.	86
Figura 74 – AceLora montada em sua caixa de proteção e com seus sensores conectados.	87
Figura 75 – Dashboard Grafana.....	88
Figura 76 – Captura do sinal da ECM.	89
Figura 77 – Fluxograma do filtro de software da ECM.	90
Figura 78 – Captura do sinal da PHM.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do libelium consultado.	20
Tabela 2 - Descrição estatística dos dados de temperatura dos três sensores com leituras simultâneas.	39
Tabela 3 – Formato do cabeçalho do protocolo LoRa.....	46
Tabela 4 – Modos de economia de energia ESP32-S3.....	48
Tabela 5 – Mapeamento de pinos utilizados no MCU.	49
Tabela 6 - Exibição de alertas LoRa no LED.....	55
Tabela 7 - Conectores da placa central AceLoRa.....	56
Tabela 8 - Relação tensão X pH a 25°C.....	60
Tabela 9 – Relação ajustada de tensão X pH a 25°C	62
Tabela 10 - Composição das soluções nutritivas obtidas.	74
Tabela 11 - Proporções para alcançar as soluções nominais de pH.	75
Tabela 12 - Quadro comparativo pós calibração PHM.	76
Tabela 13 - Proporções para alcançar as soluções nominais de EC.	77
Tabela 14 - Comparativo pós calibração ECM.	77
Tabela 15 - Comparativo pós calibração TDS.....	78
Tabela 16 - Descrição dos campos utilizados no JSON.	85
Tabela 17 - Comparativo das medições realizadas em campo.	89
Tabela 18 - Consumos da AceLoRa.	92
Tabela 20 – Custos de uma unidade da ECM.....	93
Tabela 19 – Custos de uma unidade da AceLoRa.	94
Tabela 21 – Custos de uma unidade da PHM.....	95
Tabela 22 – Custos de uma unidade da TSS.	95
Tabela 23 – Custos de uma unidade da AWT.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – vantagens e desvantagens da hidroponia em relação ao cultivo tradicional.....	15
--	----

LISTA DE SIGLAS

LoRa	<i>Long Range (Longo Alcance).</i>
IoT	<i>Internet Of Things (Internet das Coisas).</i>
MCU	<i>Micro Controler Unit (Unidade de microcontrolador).</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation (Notação de objectos em JavaScript).</i>
LED	<i>Light-Emiting Diode (Diodo emissor de luz).</i>
R	Resistencia.
ρ	Resistividade.
Ω	OHM.
G	Condutância.
κ	Condutividade.
A	Area transversal.
LPWAN	Redes de Grande Área e Baixo Consumo
SPI	<i>Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial).</i>
MODBUS	Protocolo de comunicação serial de propriedade da Modicon.
LOG	Registro em tradução literal.
AP	<i>Acess Point</i> , Ponto de Acesso de uma rede de computadores.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	13
1.3	OBJETIVOS.....	13
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	13
1.3.2	<i>Objetivo Específicos</i>	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	SISTEMAS HIDROPÔNICOS.....	14
2.1.1	<i>História</i>	14
2.1.2	<i>Cultivo tradicional X hidroponia</i>	14
2.1.3	<i>Modelos de sistemas hidropônicos</i>	15
2.1.3.1	Sistema NFT	15
2.1.3.2	Sistema DFT	16
2.1.3.3	Sistema DWC	17
2.1.3.4	Sistema aeropônico	17
2.1.3.5	Sistema com substrato inerte	18
2.2	ESTADO DA ARTE.....	19
2.2.1	<i>Libelium – Plug & Sense</i>	19
2.2.2	<i>Agrowtek</i>	21
2.2.3	<i>Egrowr</i>	22
2.3	ARQUITETURA IOT	22
2.3.1	<i>Dispositivos inteligentes</i>	23
2.3.2	<i>Gateways e Networks</i>	23
2.3.3	<i>Gerenciamento</i>	23
2.3.4	<i>Aplicação</i>	24
2.4	MEDIÇÕES	25
2.4.1	<i>Sólidos Totais Suspensos</i>	25
2.4.2	<i>Condutividade elétrica</i>	26
2.4.2.1	Fator de Temperatura	29
2.4.2.2	Polarização	29
2.4.2.3	Contaminação	31
2.4.2.4	Geometria.....	31
2.4.2.5	Resistência do cabo.....	31
2.4.2.6	Capacitância do cabo	32
2.4.3	<i>Sólidos Totais Dissolvidos</i>	32
2.4.4	<i>pH Meter</i>	33
2.4.5	<i>Temperatura</i>	39
2.5	COMUNICAÇÃO.....	39

2.5.1	<i>LP-WAN</i>	40
2.5.2	<i>LoRa e LoRaWAN</i>	40
2.6	ALIMENTAÇÃO	41
2.6.1	<i>Carregamento de bateria</i>	42
2.6.2	<i>BMS e saúde da bateria</i>	42
2.6.3	<i>MPPT</i>	42
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
3.1	DEFINIÇÕES DE PROJETO.....	43
3.1.1	<i>Nome do projeto</i>	43
3.1.2	<i>Hardware</i>	43
3.1.3	<i>Comunicação</i>	44
3.1.3.1	Gateway AceLoRa – Comunicação	44
3.1.3.2	Gateway AceLoRa – Hardware	45
3.1.3.3	Gateway AceLoRa – Protocolo	45
3.1.4	<i>Interface de gerenciamento e visualização dos dados</i>	46
3.2	PLACA CENTRAL - ACELORA.....	47
3.2.1	<i>Microcontrolador</i>	47
3.2.2	<i>LORA</i>	50
3.2.3	<i>Circuito de carregamento da bateria</i>	51
3.2.4	<i>Circuito de chaveamento dos sensores</i>	53
3.2.5	<i>Circuito de armazenamento de dados</i>	54
3.2.6	<i>LED para alertas do sistema</i>	55
3.2.7	<i>Conectores</i>	56
3.2.8	<i>Modelo da placa final</i>	57
3.3	MÓDULOS DE SENSORES.....	59
3.3.1	<i>PHM – pH Meter</i>	60
3.3.2	<i>ECM – Medidor de Condutividade Elétrica (Electrical Conductivity Meter)</i>	64
3.3.3	<i>TSS – Sólidos Suspensos Totais (Total Suspended Solids)</i>	69
3.3.4	<i>AWT – Temperatura do Ar e Água (Air and Water Temperature)</i>	71
3.4	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	73
3.4.1	<i>Calibração PHM</i>	74
3.4.2	<i>Calibração ECM</i>	76
3.5	CAIXA DE PROTEÇÃO.....	78
3.6	IMPLEMENTAÇÃO DE SOFTWARE	79
3.6.1	<i>Software da AceLoRa</i>	79
3.6.2	<i>Software da Gateway AceLoRa</i>	83
3.6.3	<i>Formato das mensagens</i>	84
3.6.4	<i>Interface para ajuste de parâmetros</i>	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86

4.1	DESEMPENHO GERAL.....	87
4.1.1	<i>Medições realizadas em campo</i>	88
4.1.2	<i>Características indesejadas na instrumentação dos sensores</i>	89
4.2	CONSUMO DO SISTEMA.....	91
4.3	CUSTOS DE HARDWARE.....	93
5	CONCLUSÕES	97
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os sistemas hidropônicos têm ganhado grande popularidade nos últimos anos devido a seu elevado rendimento e por produzir culturas saudáveis e sem o uso do solo, que por si só já é um grande “problema” para o aproveitamento da área cultivada. Isso se deve as diversas intempéries que interferem na qualidade nutritiva, dentre as quais podemos citar: estações do ano, localização geográfica, topologia, pragas provenientes do solo e variação de lençóis freáticos. Vale ressaltar, que todos os problemas citados anteriormente já possuem soluções que podem ser aplicadas (terraplanagem, adubação, fertilização, pesticidas, irrigação, estufas...), entretanto demanda um elevado custo financeiro de correção e manutenção das condições ideais para o plantio em solo.

Essa nova forma de cultivo se baseia na manutenção das plantas por meio de um sistema hídrico fechado que é alimentado por uma solução aquosa dotada de ativos nutritivos para o crescimento e amadurecimento da planta. Segundo MELONIO [2012], é possível: obter um crescimento acelerado; maior produtividade; aumento da proteção contra doenças, pragas e insetos; independência às condições climáticas e até 70% de economia de água em comparação a agricultura tradicional.

A adoção do manejo hidropônico pode ser desafiadora devido à necessidade de correções constantes na solução nutritiva para evitar desequilíbrios, que mesmo em curtos períodos podem levar a perda de toda a produção. No entanto, com a integração de tecnologias IoT, é possível automatizar o monitoramento e as correções necessárias para manter as condições ideais de produção, permitindo também o acesso remoto às informações da produção em tempo real, melhorando ainda mais a eficiência do processo e mantendo o total controle nas mãos do operador.

Várias são as etapas para a completa automatização de um cultivo hidropônico. O monitoramento da solução aquosa é a primeira e mais importante etapa nesse processo, pois serão decisivas para a etapa seguinte que realizará as atuações e correções necessárias no balanceamento nutritivo.

Embora o investimento inicial da aquisição de um sistema IoT, como o descrito, possa ser alto, a sua manutenção é relativamente baixa, e garantirá a produção contínua e eficiente durante todo o ano, diluindo rapidamente o seu custo.

1.2 JUSTIFICATIVA

As tecnologias de monitoramento remoto e o advento de sistemas IoT avançaram bastante nos últimos anos permitindo que as soluções se tornem mais acessíveis e eficientes, sendo possível encontrar diversas soluções de aquisição de dados, com as mais diversas qualidades e propósitos. Como será mostrado no capítulo 2.2, a maioria das soluções são produtos isolados que se propõem a resolver um escopo limitado de atividades, deixando o usuário com o problema parcialmente resolvido, forçando assim os produtores a contratarem equipes de engenharia para a construção de um sistema novo e personalizado para suas necessidades. Levando tudo isso em conta, este trabalho se justifica com a necessidade e o desejo de obter um equipamento de monitoramento flexível, com baixo custo de aquisição e a possibilidade de adicionar/remover sensores conforme a necessidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um protótipo funcional de um sistema IoT para monitoramento de sistemas hidropônicos com sensores modulares intercambiáveis.

1.3.2 Objetivo Específicos

Objetiva-se com esse trabalho:

- Abordar sobre as vantagens e desafios do cultivo hidropônico.
- Conhecer os princípios físicos dos sensores abordados e suas instrumentações.
- Desenvolvimento dos circuitos necessários para a instrumentação eletrônica.
- Analisar e otimizar o consumo no dispositivo IoT desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será explorado os principais conceitos e teorias que embasam o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 SISTEMAS HIDROPÔNICOS

2.1.1 História

Em 1929, o pesquisador William F. Gericke, da Universidade da Califórnia dos Estados Unidos formalizou um método de cultivo sem solo, que pouco tempos depois viria a se chamar Hidroponia. Entretanto, na época, os desafios de monitoramento e manejo constantes impediram a adoção comercial.

Em 1936 com a publicação do grande relatório sobre Hidroponia por W. F. Gericke e J. R. Travernetti, iniciou-se a adoção comercial:

[...] a nova técnica apresentava duas grandes vantagens: grandes produções em pequenas áreas, e o principal, permitia que se produzisse em áreas áridas, não agricultáveis, existentes em diversas partes do mundo.

Nas décadas seguintes, outros países adotaram a técnica e ela começou a se espalhar pelo mundo, atingindo países como Alemanha, França, Itália, Suécia, URSS, Israel e Espanha por volta de 1960. Ainda hoje a procura continua a crescer e novas pesquisas e melhorias continuam sendo demandadas.

2.1.2 Cultivo tradicional X hidroponia

A agricultura tradicional é caracterizada pelo uso de solo e cultivo em campo aberto sem proteção contra fatores abióticos (temperatura, volume excessivo de chuvas, ventos, etc.) que favorecem o surgimento e impactando o crescimento e desenvolvimento da planta (ANDRIOLO, 2000).

A hidroponia é uma forma de cultivo protegido que utiliza de estufas e dispensa o uso de solo devido à utilização de uma solução nutritiva composta por: água, nitrogênio, potássio, fósforo, magnésio e dentre outros (ANDRIOLO, 2000). Para que a solução se mantenha estável e nutritiva é necessário que sejam monitorados periodicamente os parâmetros de pH, temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido e amônia soluta.

As vantagens relacionadas do plantio em sistemas hidropônicos são diversas quando comparadas ao cultivo tradicional, entretanto sua complexidade é elevada e demanda maior assistência conforme demonstrado no Quadro 1.

Quadro 1 – vantagens e desvantagens da hidroponia em relação ao cultivo tradicional

Vantagens	Alta produtividade e colheita precoce
	Maior proteção contra doenças e pragas (insetos e ervas daninhas)
	Menor uso de agrotóxicos
	Economia de 70% do uso de água
	Trabalho mais leve e limpo
	Menor uso de mão-de-obra
Desvantagem	Maior tempo de prateleira
	Maior investimento financeiro inicial
	Necessidade de conhecimentos técnicos
	Dependência de energia elétrica
	Uso de gerador de energia próprio

Fonte: Adaptado de ALBERONI (1998).

2.1.3 Modelos de sistemas hidropônicos

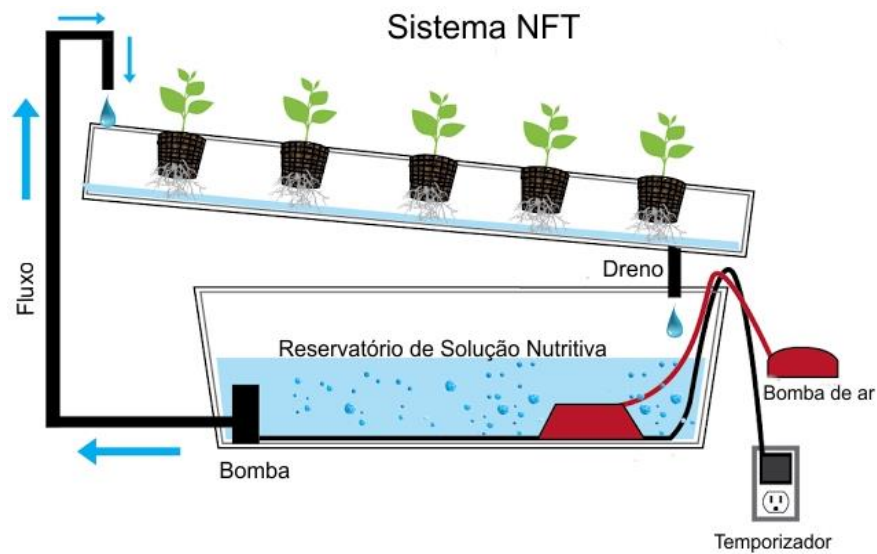
Os sistemas hidropônicos possuem uma estrutura base composta por um reservatório para a solução nutritiva e um mecanismo para fornecer contato com as raízes das plantas, o monitoramento e correções dos parâmetros de qualidade devem ocorrer nesse reservatório. Para melhor ilustrar estão demonstrados alguns modelos de hidroponia e sua operação neste capítulo.

2.1.3.1 Sistema NFT

Este é atualmente o sistema predominante no Brasil, denominado como técnica do Fluxo Laminar de nutrientes (NFT – *Nutrient Film Technique*), se destaca pela praticidade na implantação da cultura e pela qualidade do produto (ANDRIOLO et al., 2004).

Conforme o modelo ilustrado na Figura 1, o sistema é composto por: reservatório, bomba, aerador, canaletas, temporizadores e o dreno. A solução nutritiva deverá ser bombeada para as raízes das plantas que estarão dentro de canaletas ou canos e por fim retornarão ao reservatório. As plantas não poderão estar continuamente expostas ao fluxo de água para evitar que se “afoguem” ou se saturem com os nutrientes e tampouco poderão ficar muito tempo sem acesso ao fluxo de água. Para isso adota-se a utilização de um temporizador para acionar a bomba, circulando a solução para as plantas (WERNER e ESTEVES, 2020).

Figura 1 – Modelo de funcionamento do sistema NFT.



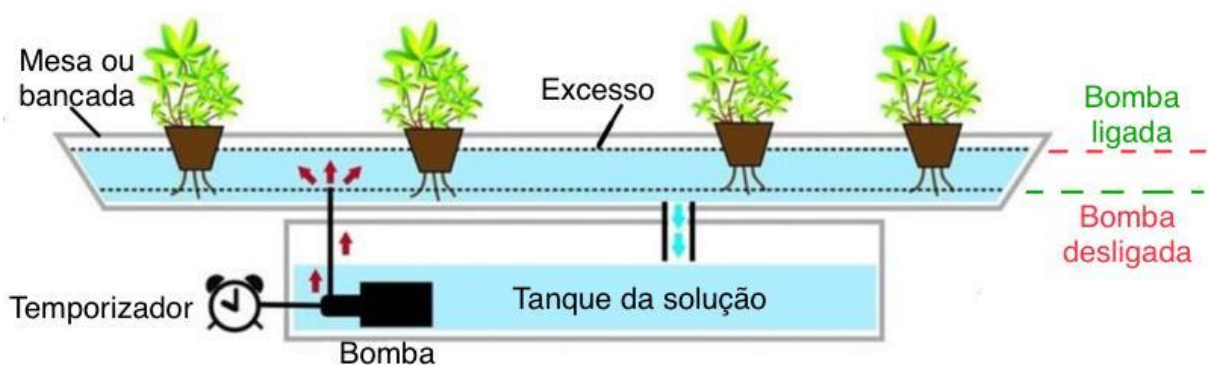
Fonte: Canal do Horticultor (2018).

2.1.3.2 Sistema DFT

A técnica de filme profundo (DFT – *Deep Film Technique*) ou “Flutuante”, consiste em um grande tanque de solução nutritiva coberto com placas flutuantes que comportam as plantas e mantêm as raízes constantemente submersas (WERNER e ESTEVES, 2020). Devido a sua construção é um sistema mais simples que o NFT e dispensa o uso de bombas e canaletas e facilita a gestão de grandes linhas de produção devido ao uso de placas que podem ser recolhidas e adicionadas com grande facilidade (WERNER e ESTEVES, 2020).

É um sistema fechado e dinâmico e exige a utilização constante de bombeamento de oxigênio para a solução nutritiva, e cuidados especiais com a formação de lodo e outros contratempos (WERNER e ESTEVES, 2020).

Figura 2 – Modelo de funcionamento do sistema DFT.

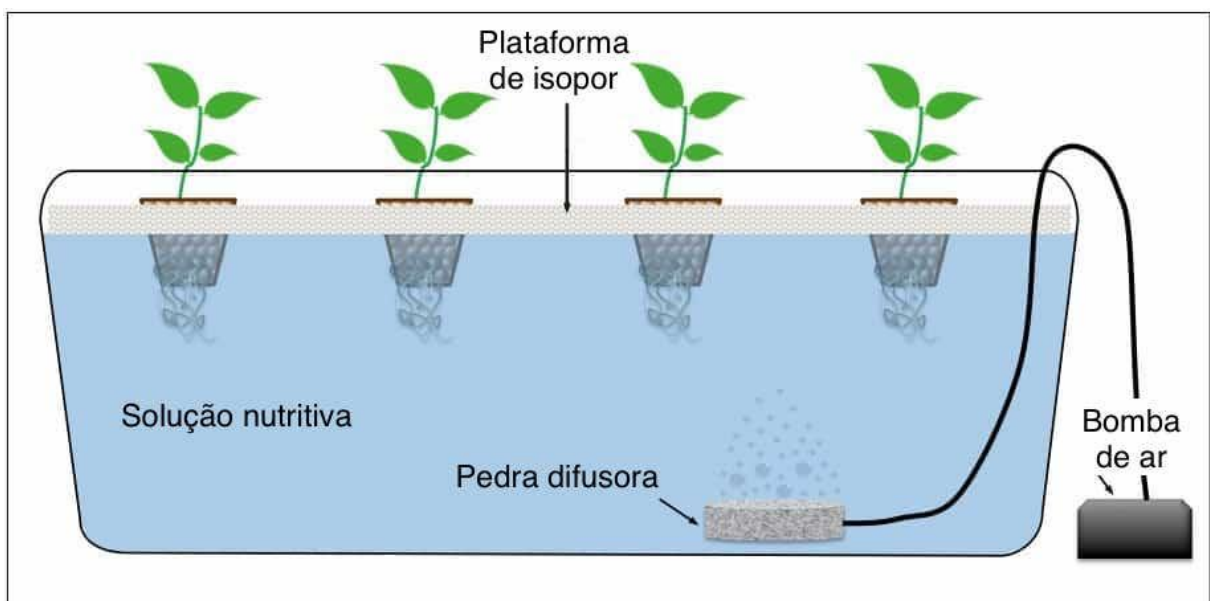


Fonte: Delgado (2016).

2.1.3.3 Sistema DWC

O sistema de cultura em água profunda (DWC – *Deep Water Culture*) se assemelha muito ao sistema DFT ao possuir um reservatório de solução nutritiva em contato constante com as raízes das plantas. No entanto as plantas estarão fixadas a uma base estática no topo (WERNER e ESTEVES, 2020). O reservatório irá variar o volume conforme o acionamento temporizado de uma bomba d'água para realizar a aeração forçada (WERNER e ESTEVES, 2020).

Figura 3 – Modelo de funcionamento do sistema DWC.

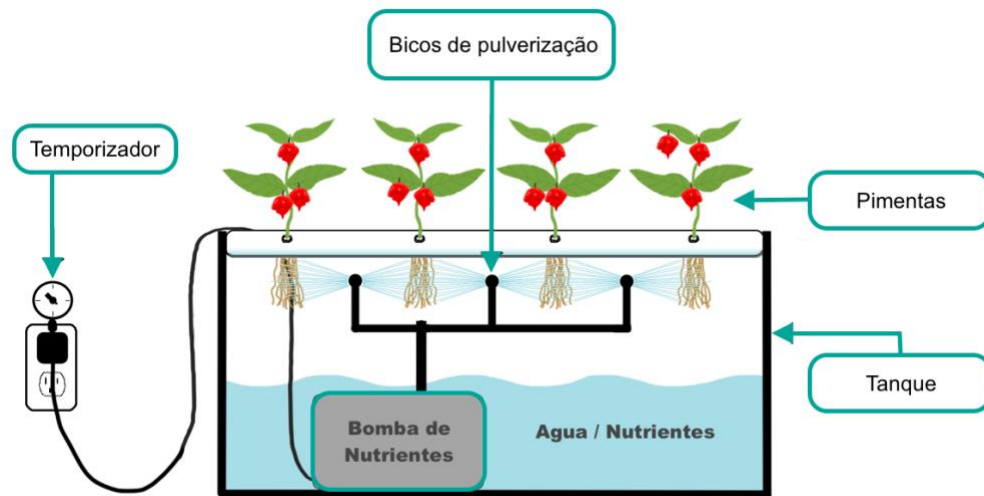


Fonte: Souza (2021).

2.1.3.4 Sistema aeropônico

Neste sistema a solução nutritiva é nebulizada nas raízes que ficam suspensas em uma câmara escura e tem como objetivo mantê-las sempre úmidas. Este sistema é muito sensível à luz e deverá ter uma calibração muito boa para que as raízes não fiquem secas ou húmidas ao extremo (WERNER e ESTEVES, 2020).

Figura 4 – Modelo de funcionamento do sistema aeropônico.

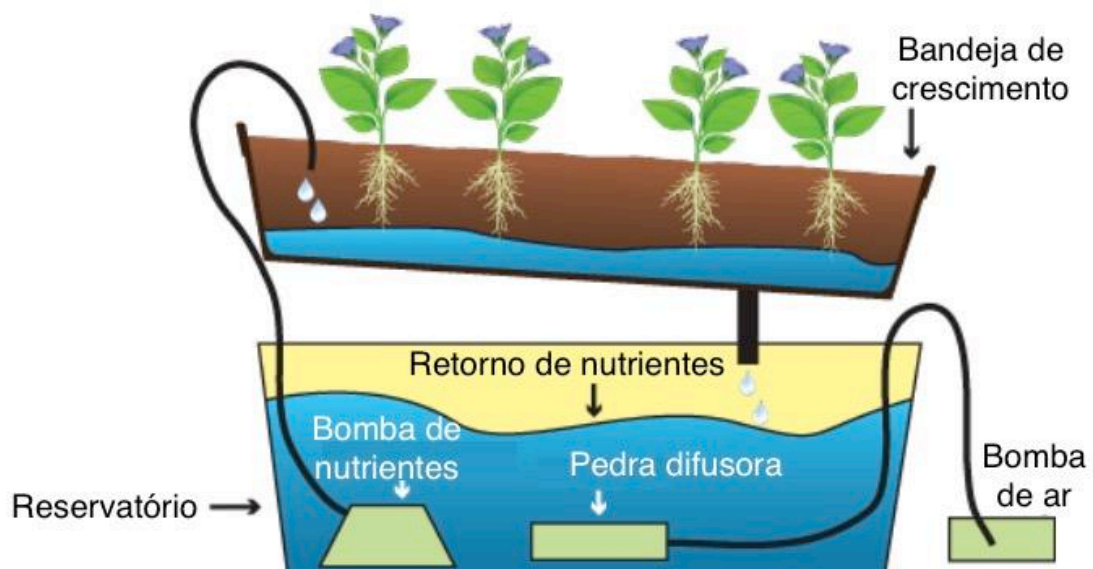


Fonte: El Holandês Picante.

2.1.3.5 Sistema com substrato inerte

Esse sistema tem o intuito de permitir que plantas que alcançam alturas relevantes e necessitem de solo firme para fixação, possam ser cultivadas em sistemas hidropônicos. Para resolver esse problema é utilizado um vaso com substrato inerte (sem nutrientes) que servirá exclusivamente para fins de fixação mecânica da planta, conforme Figura 5 (WERNER e ESTEVES, 2020).

Figura 5 – Modelo de funcionamento do sistema com substrato inerte.



Fonte: Hidroponik-Store.

2.2 ESTADO DA ARTE

Devido à grande necessidade de monitoramento constante, o desenvolvimento de soluções de monitoramento e automação de processos para hidroponias andou a passos largos e o mercado já dispõe de soluções para esse propósito. Neste capítulo estão citados alguns exemplos e um breve resumo dos pontos mais relevantes:

2.2.1 Libelium – Plug & Sense

Segundo o fabricante, essa plataforma consiste em um robusto encapsulamento a prova d'água com conectores externos específicos para a conexão de sensores, painel solar, antena e conexão USB para reprogramação do nó. Possui como principal *features*:

- Fácil configuração: intercambie os sensores em segundos;
- IP65;
- Painel solar opcional;
- Rádios suportados: 802.15.4, Zigbee, 868MHz, 900MHz, WiFi, 4G, Sigfox e LoRaWAN;
- *Over the air programming – OTAP* (apenas em 4G ou WiFi);
- Acelerômetro integrado de 3 eixos;
- Protocolos industriais opcionais: RS-485, Modbus, CAN Bus;
- Módulos de bateria externa;

Esse produto é basicamente uma caixa capaz de receber vários módulos externos para se adequar as necessidades do ambiente, e no seu site oficial, são disponibilizadas algumas variações pré-configuradas para propósitos específicos. Utilizaremos para exemplificar a versão “*Smart Water Pro*” (Figura 6) por ser a mais adequada para o monitoramento de sistemas hidropônicos, contando com os sensores listados abaixo. Ressalta-se que existem outros modelos mais completos que adicionam ainda mais sensores ao pacote.

- pH;
- Potencial de Oxirredução – ORP;
- Oxigênio Dissolvido – DO;
- Condutividade;
- Temperatura;

Informações de tamanho de bateria e consumo típico do produto e modos de economia de energia ou operação não são fornecidos no site oficial da empresa.

Figura 6 – Libelium Smart Water Pro



Fonte: Libelium.

Não foi possível consultar os valores diretamente com o fabricante, no entanto foi localizado uma loja online (“Micus ENGINEERING”) que disponibiliza alguns modelos para venda. Os valores obtidos estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores do libelium consultado.

Modelo	Custo (SGD\$)	Link
Smart Water Pro – LoRa 900MHz	1.333,33	http://amicus.com.sg/index.php?route=product/product&path=327&product_id=4461
Smart Water Pro – Com GPS	1.925,00	http://amicus.com.sg/index.php?route=product/product&path=327&product_id=5268

Fonte: Amicus.

2.2.2 Agrowtek

Na seção de “sobre nós” do site oficial é dito que a Agrowtec Inc. é um dos principais fabricantes de sistemas de fertirrigação e controles de automação para horticultores exigentes, sua linha de produtos abrange sistemas de controle ambiental, dosagem de nutrientes e sensores digitais de precisão para atmosfera e água.

Eles possuem os módulos de medição e automação que juntos podem automatizar as etapas de manutenção da solução nutritiva de sistemas hidropônico. Assim, com a Libelium, eles possuem algumas variações dos módulos de sensores que podem conter mais ou menos sensores. Utilizaremos o módulo “*SXH Hydroponics nutrientes*” que é específico para hidroponia para fins de ilustrar o funcionamento.

O “*SXH Hydroponics nutrientes / pH Monitor & Controller with Probes*” é capaz de realizar medições de: pH, temperatura, Condutividade e Potencial de Oxirredução; se comunica exclusivamente por meio do protocolo proprietário “GrowNet”. Porém, com a utilização de um módulo externo, é possível utilizar a conexão MODBUS. Possui memória interna para armazenamento de logs e deve ser alimentado por meio de uma fonte DC externa. Seu custo de aquisição pode ser obtido no site oficial: US\$ 629,00.

Figura 7 – SXH Hydroponics Nutrient.



Fonte: Agrowtek.

2.2.3 Egrowr

Na seção de “sobre nós” do site oficial é dito que: os dispositivos “Egrowr” são desenvolvidos na França e fabricados na Polônia pela Wamrom eletronic, seus clientes são fazendas verticais, jardins urbanos, *greenhouses* e hidroponias.

Seu produto é descrito como uma solução “*all-in-one*” (tudo em um, em tradução livre) se propondo a ser o produto de melhor custo-benefício do mercado. É capaz de medir: pH, condutividade, luminosidade, temperatura e umidade do ar. Utiliza WiFi de 2.4GHz para se conectar a seus serviços em nuvem. Não possui sistemas de bateria e deve ser alimentado por meio de fontes AC-DC externas. Seu custo de aquisição pode ser obtido no site oficial: US\$ 393,87.

Figura 8 – Egrowr.



Fonte: Egrowr.

2.3 ARQUITETURA IOT

Em sua monografia, Jefferson Robert (2018) infere que a Internet das Coisas (*Internet Of Things – IOT*) é uma extensão da Internet padrão e que proporciona, em quaisquer que sejam os objetos do dia a dia, a capacidade de comunicação da Internet e por tanto viabiliza acessar, monitorar e controlar as “coisas” remotamente.

O termo “coisas” nesse contexto se refere a objetos físicos do mundo real que possuem valores monitoráveis e/ou passíveis de ações. Uma vez que essas “coisas” estão conectadas à Internet é possível que os dados gerados sejam armazenados e processados a fim de obter informações úteis para as otimizações nas atuações ou usos necessários (Jefferson Robert, 2018).

A arquitetura de *IoT* é composta por diferentes camadas de tecnologias que podem ser divididas entre as camadas: dispositivos inteligentes; Gateways e Networks; Gerenciamento; Aplicação (Patel, 2016) .

2.3.1 Dispositivos inteligentes

Camada mais baixa da arquitetura, sendo composta pelos dispositivos eletrônicos dotados de sensores e/ou atuadores capazes de converter dados do mundo real (temperatura, pressão, umidade etc.) em pulsos e valores elétricos que podem ser interpretados e então disparados pelo dispositivo para alguma rede de comunicação (Patel, 2016) . Esses dispositivos devem trabalhar com o menor consumo energético possível para que possam operar durante longos períodos alimentados por baterias tão pequenas quanto possível.

2.3.2 Gateways e Networks

Volumes massivos de dados serão produzidos pelos múltiplos dispositivos inteligentes instalados em uma área e isso exige uma infraestrutura robusta e de alta performance para troca de dados e suporte a grandes quantidades de nós (Patel, 2016) .

Apesar de cada dispositivo gerar poucos volumes de dados, usualmente geram dados com grandes frequências e deverão estar ativamente conectados a rede de dados para que possam executar ações no instante que for necessário.

O problema principal que deve ser resolvido nesta camada é a operação de diferentes protocolos que devem ser convertidos para que possam ser disparados pela Internet. Atualmente os principais protocolos utilizados são: GSM, LoRaWAN, ZigBee, Bluetooth, WIFI, NBIOT, SIGFOX, entre outros.

2.3.3 Gerenciamento

O serviço de gestão torna o processamento de informações possíveis por meio de análises, protocolos de segurança, modelos de processo e gerenciamento dos dispositivos (Patel, 2016). No contexto de *IoT* a funcionalidade mais importante é a mecânica de regras de negócio e processos que deverão formular as logicas para tomada de decisões e automatizar processos por meio de gatilhos (Patel, 2016).

Na área de análises são utilizadas várias ferramentas para extrair informações relevantes dos volumes massivos de dados brutos em tempo real, ou seja, deverá haver um *stream* de processamento capaz de ingerir todo o fluxo de dados que em questão de segundos deverá tomar

possíveis ações necessárias (Patel, 2016). Para exemplificar, pode-se utilizar os dispositivos *IoT* aplicados na área médica que realizarão medições contínuas sobre o estado do paciente e deve ser capaz de notificar ou agir caso sejam detectados sinais que encadearão em um estado de emergência (Patel, 2016).

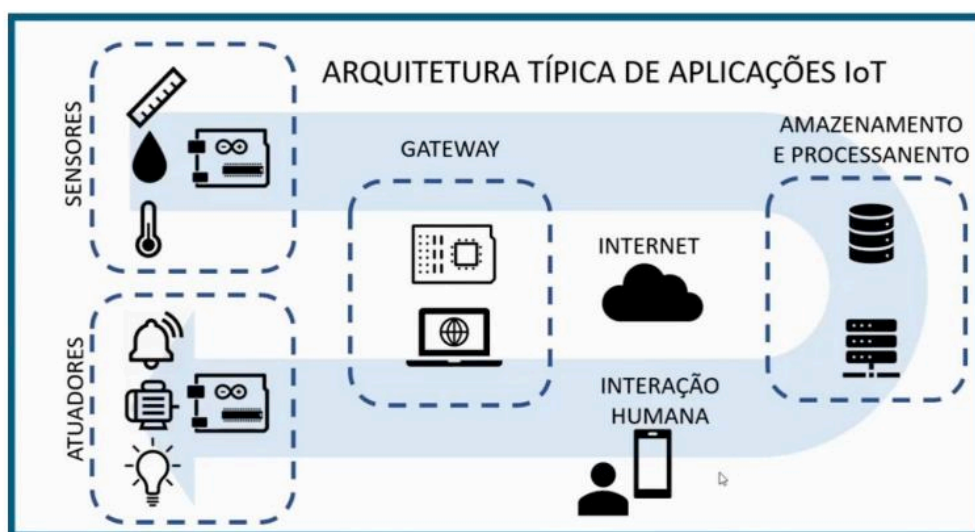
Outra grande preocupação deve ser com o acesso e segurança dos dados gerados e armazenados, que deverão ser o mais anônimos possível evitando que os dados explicitem seus proprietários e por tanto exponham dados sensíveis (Patel, 2016).

2.3.4 Aplicação

Aqui se concentra a etapa que cobre o conceito de ambientes “inteligentes ou *smart*”, em seus domínios: transportes, construções, cidades, estilos de vida, agricultura, fabricação, cadeia de suprimentos, saúde, gestão de energia, cultura, turismo (Patel, 2016). Esta camada também se preocupa em como os usuários humanos irão ser impactados e como poderão interagir com os novos recursos digitais.

Muitos modelos podem ser desenhados para representar a comunicação entre essas camadas e podem sofrer algumas adaptações conforme a aplicação desejada, entretanto a arquitetura típica, ilustrada na Figura 9, sempre estará implementada. Nela pode-se notar que teremos sensores disparando informações por meio de *Gateways* que conectam a informação à internet, podendo então ser armazenada em servidores e entregue para os usuários que por fim poderão verificar as informações obtidas e enviar comandos para os atuadores ao final do fluxo de dados.

Figura 9 – Arquitetura típica de aplicações IoT.



2.4 MEDIÇÕES

2.4.1 Sólidos Totais Suspensos

A medição da concentração de sólidos totais em suspensão (*Total Suspended Solids – TSS*) é um importante parâmetro para medição da poluição na solução aquosa. Existem várias técnicas disponíveis para esta medição, incluindo técnicas ópticas, acústicas, de impedância elétrica, entre outras.

Uma técnica comum e barata para medição aproximada de TSS é através de uma medição indireta da turbidez da solução, que mensura a quantidade de luz dispersa entre um emissor luminoso e um sensor de luz por entre uma área previamente conhecida. A intensidade luminosa captada irá variar conforme o tamanho, forma e composição das partículas em suspensão, bem como pelo ângulo e comprimento de onda da luz incidente.

Para converter a medida de turbidez em concentração de TSS, é necessário calibrar o sensor usando soluções padrão de TSS conhecidas. A curva de calibração geralmente segue uma relação linear entre a turbidez e a concentração de TSS, dessa forma a equação de calibração é comumente expressa como:

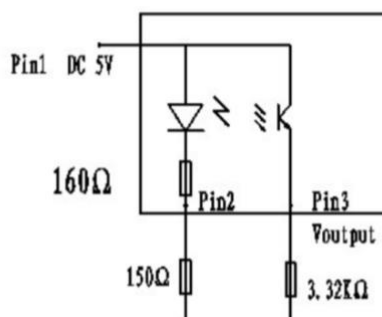
$$TSS = a * Turbidez + b \quad (1)$$

onde *TSS* é a concentração de sólidos totais em suspensão (mg/L), *Turbidez* é a medida de turbidez (NTU), *a* é o coeficiente angular da curva de calibração e *b* é o coeficiente linear. Além disso, é importante mencionar que a escolha do sensor a ser utilizado depende das propriedades da solução a ser medida, tais como tamanho e composição das partículas em suspensão, densidade, viscosidade, entre outras (Giacomini et al., 2017; Zou et al., 2019).

Usualmente as sondas de medição adotam o método de medição indireta e utilizam um LED infravermelho em conjunto com um fototransistor que irá alterar a tensão de saída conforme a TSS da solução (RUSYDI, 2018). A Figura 10 ilustra o esquema de funcionamento do sensor, e a Figura 11 apresenta a curva de calibração fornecida por um fabricante, que relaciona turbidez com a tensão de saída do sensor.

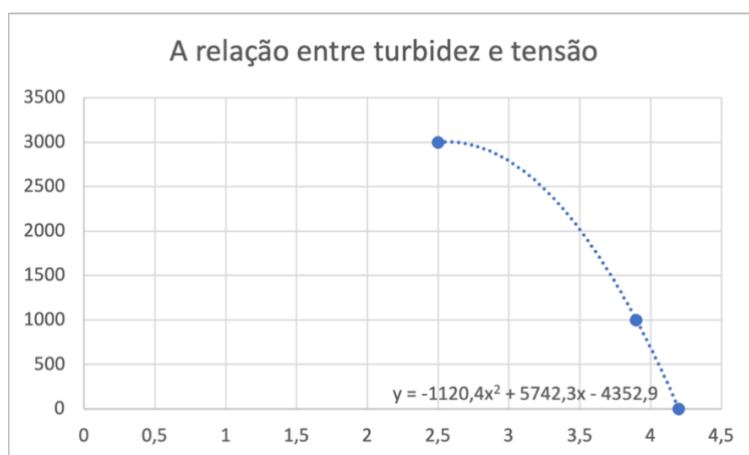
Figura 10 – Circuito de operação da sonda de TSS.

O sensor e seu circuito de teste



Fonte: Keyestudio (2021).

Figura 11 – Relação entre turbidez e tensão.



Fonte: DFROBOT.

2.4.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é o parâmetro que define a capacidade de propagação de corrente elétrica em um determinado meio ou material. A aplicação de uma diferença de potencial entre dois eletrodos inertes e imersos em uma solução iônica promove o deslocamento dos cátions e ânions da solução que irão transportar a corrente elétrica. Esses íons possuem massa considerável e por isso a passagem de corrente é acompanhada pelo transporte de matéria (DO VAL et al, 2013).

A resistência (R) e a resistividade (ρ) representam respectivamente a força de oposição a passagem de corrente proporcional a um comprimento (ℓ) e inversamente proporcional a área

de seção reta (A) medido em Ω , e a resistência elétrica de um dado meio ou material por unidade de medida (pelo S.I. metros) medido em $\Omega.m$ (DO VAL et al, 2013). Dessa forma, tem-se:

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2)$$

Condutância (G) e condutividade (κ) são analogamente inversos à resistência e à resistividade, respectivamente, e medidos em Siemens S e S/m . Logo,

$$G = \frac{1}{R} \quad (3)$$

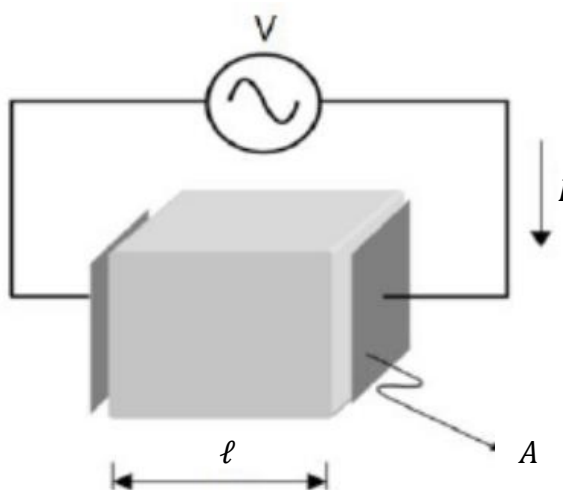
$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Portanto:

$$\kappa = \frac{\ell}{R.A} = G \frac{\ell}{A} \quad (5)$$

Na Figura 12 apresenta-se um circuito que exemplifica as equações acima. Nele, podemos verificar duas chapas de área transversal A , conectadas aos terminais de uma fonte de tensão senoidal que circula uma corrente I . Esses eletrodos estão em contato com um material de mesma seção transversal e um comprimento ℓ .

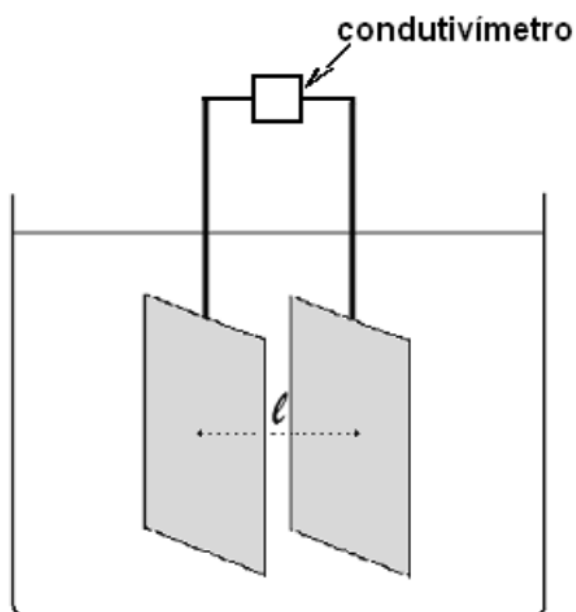
Figura 12 – Estrutura de uma célula com dois eletrodos.



Fonte: FUJIWARA (2015, pg. 26).

A condutividade pode ser medida aplicando corrente elétrica alternada entre dois eletrodos mergulhados na solução, afastados fixamente por uma distância ℓ , de modo a permitir medir o potencial resultante. Dessa forma na Figura 13 tem-se um arranjo muito semelhante ao mostrado na Figura 12, porém com a adição de um dispositivo capaz de medir a condutividade da solução, caracterizando assim um “condutímetro” (DO VAL et al, 2013) (SAS, 2004).

Figura 13 – Esquema de uma célula de condutividade.



Fonte: DO VAL et al (2013, pg. 148).

Nesse caso, a razão $\frac{\ell}{A}$ é chamada de constante da célula (K) e vem estipulada pelo fabricante. A condutividade é então determinada por:

$$\kappa = G * K \quad (6)$$

Segundo SAS (2004), a precisão das medições é influenciada diretamente por alguns fatores que estão mais bem descritos nos próximos tópicos:

2.4.2.1 Fator de Temperatura

A temperatura é o fator que mais influência a condutividade elétrica do meio, se tornando mais elevada em altas temperaturas e mais reduzida em baixas temperaturas (KAMALEDDI, 2016; HAMID, 2016; MASHHA, 2016). Para realizar essa correção é necessário adicionar a compensação de temperatura que pode ser obtida por aplicando a equação abaixo, onde β é uma constante que depende dos materiais solutos na água, podendo ser mais bem definido após alguns testes (KAMALEDDI, 2016; HAMID, 2016; MASHHA, 2016).

$$EC_T = EC_{25}[1 + \beta(T - 25)] \quad (7)$$

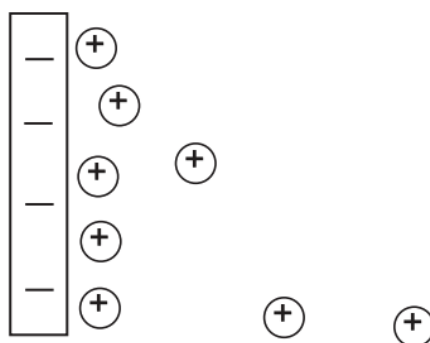
A constante β indica o coeficiente de variação da condutividade por grau Celsius ($\%/^{\circ}\text{C}$) e pode ser determinado por meio de testes laboratoriais. Para isso, é necessário realizar medições de condutividade em duas temperaturas de referência e por fim aplicar a equação abaixo (SAS, 2004). Recomenda-se que T_1 seja a temperatura de referência (25°C) e T_2 a temperatura de trabalho desejada.

$$\beta = \frac{(\kappa_{T_2} - \kappa_{T_1})}{(T_2 - T_1) * \kappa_{T_1}} \quad (8)$$

2.4.2.2 Polarização

Aplicar corrente elétrica na solução pode causar um acúmulo de íons próximos a superfície do eletrodo, conforme Figura 14, gerando uma resistência parasita nessa superfície que induzirá erros nas medições.

Figura 14 – Acúmulo de espécies iônicas na superfície do eletrodo.

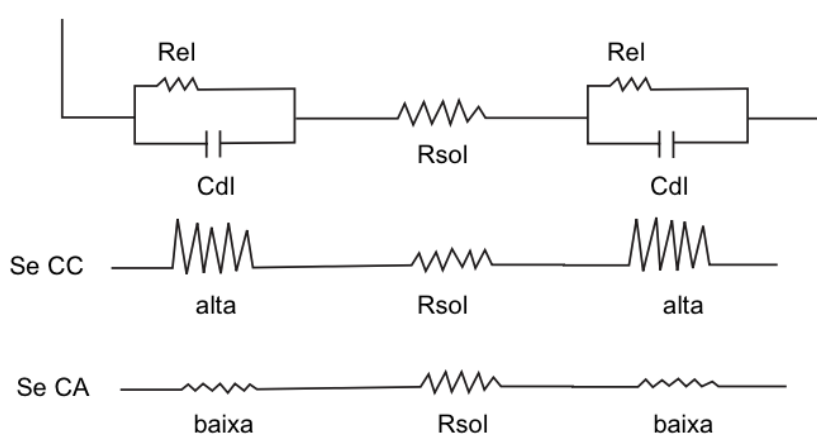


Fonte: SAS (2004, pg. 16).

Para prevenir a polarização, algumas técnicas podem ser adotadas, seguindo o modelo elétrico exposto na Figura 15:

- **Uso de corrente alternada:** a corrente fluirá pela capacitância (C_{dl}) ao invés de gerar a queda de tensão (referida anteriormente) sobre a resistência do efeito de polarização (R_{el}). E devido a característica alternada os íons tendem a se movimentar de um lado para o outro evitando grandes acúmulos.
- **Ajustar a frequência:** A frequência deve ser adequada à condutividade medida. Para baixos níveis de condutibilidade o efeito da polarização pode ser desprezado quando comparada a resistência da solução (R_{sol}) e para altos níveis, altas frequências devem ser aplicadas para minimizar ao máximo a resistência do efeito de polarização (R_{el}).

Figura 15 – Resistencia de polarização



Fonte: SAS (2004, pg. 17).

- **Otimizar a área dos eletrodos:** incrementar a área superficial ativa do eletrodo com “preto de platina” irá reduzir a densidade de corrente e por consequência o efeito da polarização.
- **Utilizar células de 4 polos:** A resistência de polarização não possui influência na medição.

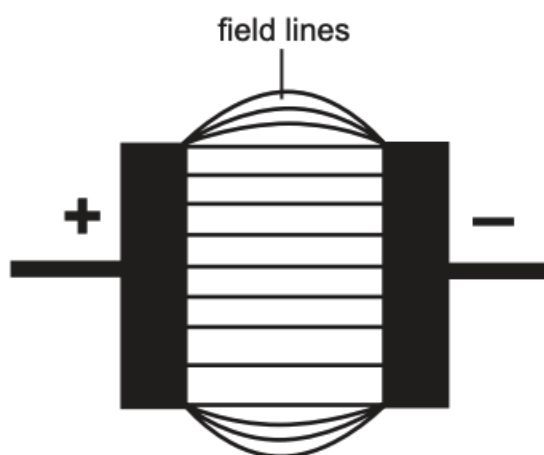
2.4.2.3 Contaminação

O depósito de resíduos presentes na solução no eletrodo irá criar efeitos similares aos de polarização. Este efeito também será reduzido com o uso células de 4 polos.

2.4.2.4 Geometria

Erros podem ser causados devidos a corrente parasita de Foucault que poderá ser dissipadas caso algo (detritos sólidos, paredes do Becker, etc.) interfira em seu campo. Esse efeito é mais perceptível em células de 2 polos sendo atenuado com células de 3 ou mais polos pois todas as linhas de campo estarão contidas no corpo da célula.

Figura 16 – Efeito das correntes de Foucault



Fonte: SAS (2004, pg. 18).

2.4.2.5 Resistência do cabo

Ao utilizar células de 2 ou 3 polos em soluções de alta condutibilidade (menor que 50 Ω), é necessário realizar uma compensação utilizando o valor informado pelo fabricante.

2.4.2.6 Capacitância do cabo

Ao utilizar células de 4 polos com cabo blindado em soluções de baixa condutância (menor que $4 \mu S$), a capacitância do cabo não pode ser desprezada e deverá ser compensada com o valor informado pelo fabricante.

2.4.3 Sólidos Totais Dissolvidos

Os sólidos totais dissolvidos (*Total Dissolved Solids – TDS*) representa o montante de substâncias inorgânicas e orgânicas presentes em líquidos, expresso pelas unidades de miligramas por litro – mg/L ou partes por milhão – PPM (SAS, 2004). É um parâmetro essencial para o balanço dos nutrientes necessários para sistemas hidropônicos ou para determinar o grau de purificação de água potável.

Existem algumas formas para realizar as medições de TDS, dentre as quais pode-se listar:

- Método Gravimétrico: esse método envolve a evaporação de um volume conhecido de água para que reste apenas a massa dos resíduos que estavam dissolvidos.
- Método de Titulação: Esse é o método mais preciso de todos e envolve a adição de um reagente a uma amostra de água que irá reagir com os sólidos dissolvidos, forçando-os a precipitar. A quantidade de reagente necessária para formar o precipitado é então medida e a concentração de TDS é calculada.
- Método Ótico: Mede-se a absorção de luz da amostra de água em comprimentos de onda muito específicos, podendo assim realizar uma proporcionalidade com a concentração de TDS. Esse método apresenta resultados precisos, porém exige equipamentos caros e estudo para o levantamento da curva de proporcionalidade desejada.
- Método de condutividade: A condutividade da água possui uma relação linear com a concentração de TDS, apresentando resultados precisos com baixo custo.

O método de condutividade elétrica é o mais utilizado para medições em campo por possuir boa precisão e processo simples de medição que dispensa a processos laboratoriais.

Para Rusydi (2019, pg. 6), a relação entre TDS e a eletro condutividade – EC não é sempre linear e dependerá diretamente dos níveis de salinidade que se deseja medir, onde quanto mais “natural” estiver a água mais linear se tornará a relação. Para realizar essa correção é necessário então utilizar o coeficiente de “fator TDS” (K) adequado para a medição desejada, usualmente o fabricante informará uma tabela com esses valores.

$$TDS = K * EC \quad (9)$$

Caso seja necessário realizar a definição dessa constante, será necessário o levantamento de uma nuvem de pontos utilizando diversos valores de constantes que poderão ser definidos a sentimento e por fim escolher qual curva se adequa mais a curva de referência por meio dos parâmetros estatísticos: Correlação de Coeficientes (R), Raiz do erro quadrático médio (RMSE), Erro Médio de Viés (MBE), Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Máximo (ME), Erro Relativo (RE), Coeficiente de Massa Residual (CRM), Erro Padrão (SE) e Coeficiente de Variação (CV) (Siosemarde, 2010, pg. 1).

2.4.4 pH Meter

O nível de pH é o parâmetro que mensura a acidez ou alcalinidade de uma solução, indicando a relação entre a concentração de íons de hidrogênio (H^+) livres e a presença de cátions de hidroxila (OH^-) num intervalo de 0 a 14, sendo 7 a igualdade entre ambos, ou seja, ionicamente balanceado (KUPHALDT, 2022).

Esse valor pode ser facilmente ajustado conforme a necessidade e propósito da solução. Como exemplo, podemos citar a água potável que deve ser o mais próximo de 7 quanto possível pois isso implica em uma água mais filtrada.

A teoria define que o valor de pH é definido pelo logaritmo de aH^+ (Equação (10)), entretanto o coeficiente de atividade (α) para o hidrogênio (H^+) é 1 então a definição prática para o pH é o logaritmo de H^+ (Equação (11)) (IC CONTROLS, 2017).

$$pH = \log_{10} \frac{1}{aH^+} = -\log_{10} aH^+ \quad (10)$$

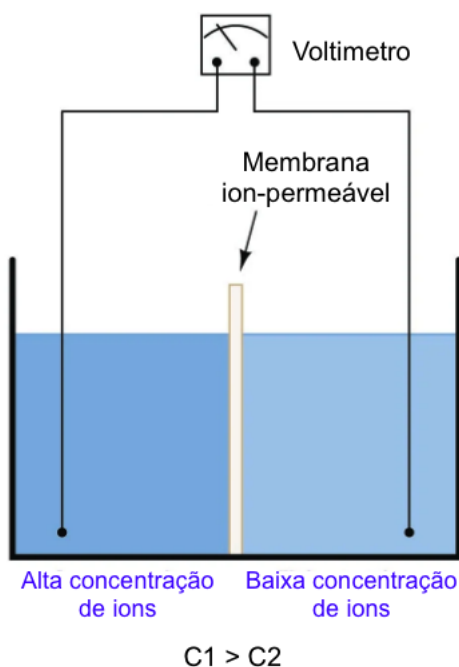
$$pH = \log_{10} \frac{1}{H^+} = -\log_{10} H^+ \quad (11)$$

Existem duas formas de se medir o pH. A primeira é pelo método colorimétrico, que envolve a adição de compostos à solução que irão exibir uma cor correspondente ao nível aferido. Entretanto, esse método possui grandes limitações e está muito sujeito a variações e interpretações. A segunda forma é pelo método “Potentiometric” que envolve o uso de um

eletrodo especial capaz de reagir ao pH, permitindo realizar medições mais efetivas e continuadas (IC CONTROLS, 2017).

“O eletrodo de medição de pH atua como metade de uma bateria cujo potencial varia com a concentração de íons de hidrogênio na solução” (IC CONTROLS, 2017). Esse processo se baseia na equação de Nernst que descreve o potencial elétrico criado pela migração de íons por uma membrana permeável, conforme Figura 17, que caracteriza o processo natural de busca de equilíbrio eletrostático das duas concentrações (KUPHALDT, 2022).

Figura 17 – Migração de elétrons pela membrana.



Fonte: KUPHALDT (2022, pg. 1767).

$$\text{Equação de Nernst} \rightarrow V = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (12)$$

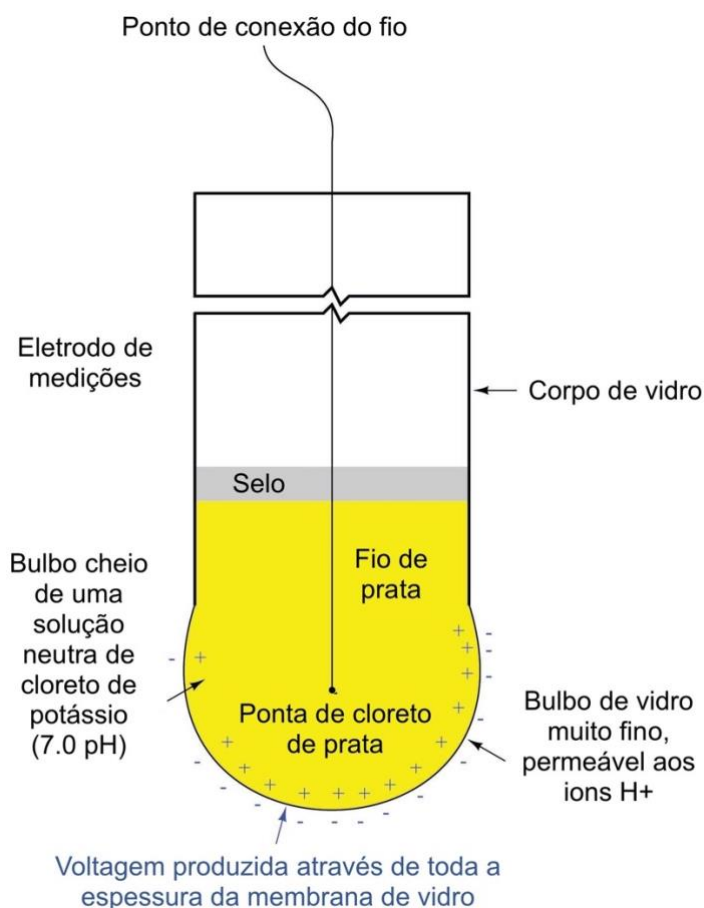
Na equação de Nernst, leia-se:

- V = Tensão produzida por entre a membrana na troca de íons;
- R = constante universal dos gases (8.315 J/mol*K);
- T = Temperatura absoluta (Kelvin);
- n = Número de elétrons transferidos por troca de íons;
- F = constante de Faraday, em coulombs por mol (96485 C/mol e-);
- C_1 = Concentração de íons na solução medida (mols por litro, M);

- C_2 = Concentração de íons na solução de referência (mols por litro, M);

Baseando-se no efeito de migração de elétrons e na equação de Nerst, o eletrodo utiliza um vidro especial composto por silicatos alcalinos (normalmente composto por Sódio, Potássio, Lítio, Sílica, Oxigênio e Hidrogênio) que envolve e sela uma solução “buffer” especialmente formulada para manter o pH sempre neutro (pH = 7.0) (KUPHALDT, 2022) (IC CONTROLS, 2017). Pode-se observar na Figura 18 que o vidro opera como a membrana de transporte de íons entre a solução buffer e a solução a ser medida, gerando uma diferença de potencial no processo que é captada pelo cabo de medição.

Figura 18 – Composição do eletrodo de pH.



Fonte: KUPHALDT (2022, pg. 1769).

O sinal de tensão capturado no fio está na casa dos milivolts (mV) tendo sua amplitude variando entre um máximo positivo quando $pH = 14.0$ e para um máximo negativo quando $pH = 0$, logicamente emitindo $0V$ quando $pH = 7.0$. Ajustando a equação para refletir essa operação e expressar o potencial gerado entre essas duas soluções, tem-se:

$$V = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2} = \frac{2.303RT}{nF} \log \frac{C_1}{C_2} \quad (13.1)$$

$$V = \frac{2.303RT}{nF} (\log C_1 - \log C_2) \quad (13.2)$$

$$\text{Como } pH = -\log H^+, \text{ portanto:} \quad (13.3)$$

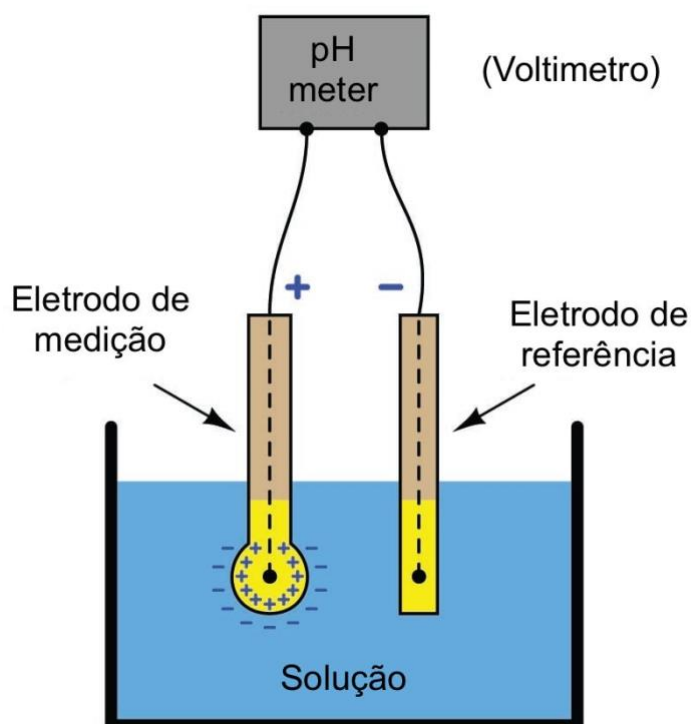
$$V = \frac{2.303RT}{nF} (pH_2 - pH_1) \quad (13.4)$$

$$V = \frac{2.303RT}{nF} (pH_2 - pH_1) \quad (13.5)$$

Fonte: adaptado de KUPHALDT (2022).

Devido a utilização de apenas um condutor no interior do eletrodo não é possível realizar a medição devido a falta de referencial de tensão. Para resolver esse problema é necessária a introdução de uma nova estrutura equivalente a mostrada na Figura 18 entretanto sem a utilização de um vidro reagente, sendo totalmente isolado e constante para servir como o referencial de medição conforme a Figura 19 (KUPHALDT, 2022).

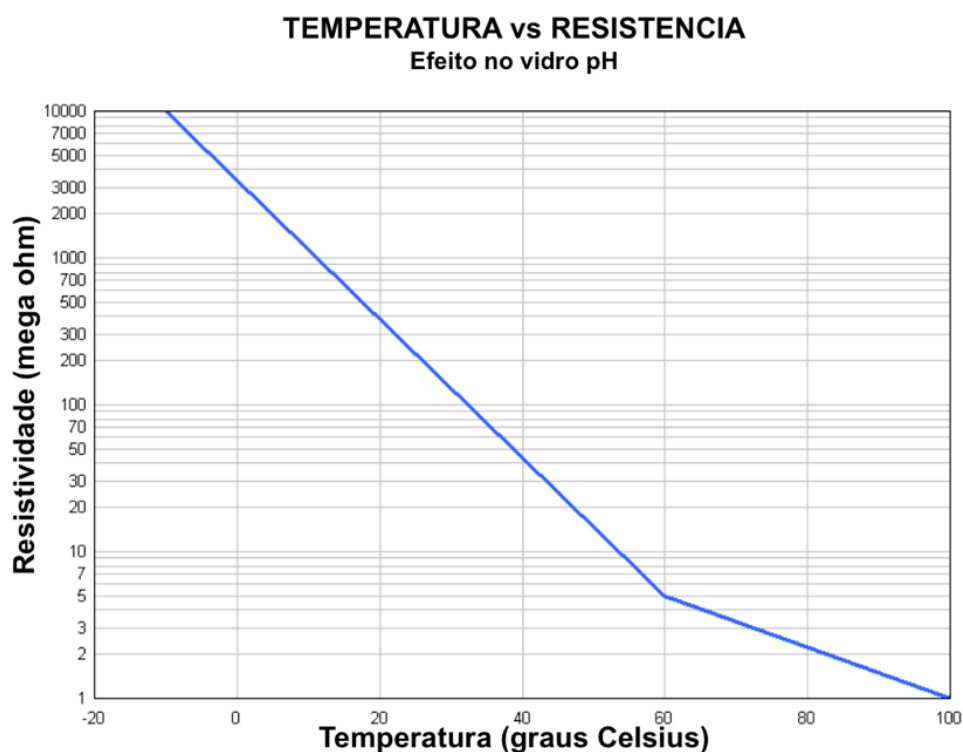
Figura 19 – Adição do referencial para medição.



Fonte: KUPHALDT (2022, pg. 1772).

A temperatura afeta a resistência do vidro e por tanto sua condutividade ($G = 1/R$) e dessa forma altera a permissividade na transferência dos íons por entre essa membrana. Usualmente recomenda-se utilizar o vidro adequado para a temperatura de trabalho pois a resistência decai muito rapidamente em função da temperatura como pode-se verificar na Figura 20.

Figura 20 – Resistencia do vidro de pH vs Temperatura.



Fonte: IC Controls (2017, pg. 3).

O principal efeito da temperatura é expresso por meio do coeficiente “slope” que representa a taxa de inclinação da curva (ou derivada) que relaciona a tensão lida e o valor de pH, podendo ser matematicamente expresso como uma porção da equação de Nerst (Equação (14)).

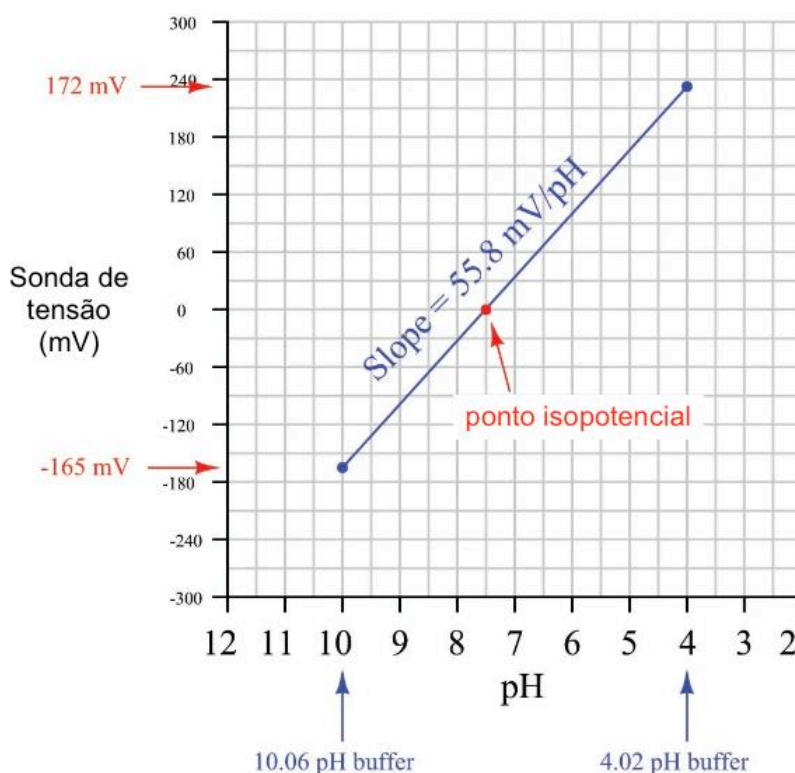
$$Nerst\ Potential = \frac{2.303RT}{nF} \log\left(\frac{C_1}{C_2}\right) \rightarrow Slope = \frac{2.303RT}{nF} \quad (14)$$

A teoria dessa equação descreve que apenas a temperatura é uma variável, no entanto, como demonstrado anteriormente, a temperatura influencia as propriedades elétricas dos componentes físicos da sonda de medição. Na prática cada sonda possui valores construtivos

ligeiramente diferentes entre cada unidade e por isso é necessário que a seja realizado o processo de calibração para cada sonda e para suas respectivas temperaturas de trabalho.

Geralmente são utilizados apenas dois valores medidos em duas soluções previamente calibradas e com valores padrão, que definirão uma reta (Figura 21) que pode ser considerada uma relação linear valida para se obter o *Slope*.

Figura 21 – Reta para calibração do sensor de pH.



Fonte: KUPHALDT (2022, pg. 1786).

No entanto esse método não apresentará resultados tão precisos para soluções que experiencie grande amplitude térmica, já que o *Slope* está calibrado para uma determinada temperatura de trabalho. Uma técnica muito adotada para realizar essa correção de forma dinâmica consiste em realizar a calibração do equipamento à 25°C e então realizar a correção conforme a Equação (15) (HACH COMPANY, 2013).

$$Slope(T_{atual}) = Slope(T_{25^{\circ}C}) * \frac{T_{atual} + 273.15}{T_{25^{\circ}C} + 273.15} \quad (15)$$

2.4.5 Temperatura

A temperatura é o fator de maior influência nas medições a serem realizadas. Como visto nos tópicos anteriores, quase sempre é necessário realizar alguma compensação devido aos efeitos térmicos na água.

Tomando como base as pesquisas de Martinazzo, foi possível verificar a comparação entre os três principais tipos de sensores de temperatura usados em projetos eletrônicos: Termistor, LM35 e DS18B20. Durante essa pesquisa o autor realizou diversas medições utilizando todos os sensores em um ambiente de temperatura controlada, obtendo ao final a Tabela 2 e um gráfico que demonstram a precisão de cada um dos sensores com base na média aritmética, desvio padrão e coeficiente de variação. Durante o processo de medições foi utilizado como referência um termômetro de mercúrio que marcava 25°C ($\pm 0,5$).

Tabela 2 - Descrição estatística dos dados de temperatura dos três sensores com leituras simultâneas.

Sensor	Temperatura (°C)		
	Média (°C)	Desvio padrão (°)	Coeficiente de variação (%)
Termistor	24,57	0,04	0,15
LM35	23,40	0,73	3,13
DS18B20	25,25	0,00	0,00

Fonte: MORALES (2006, pg. 51).

2.5 COMUNICAÇÃO

Após a coleta dos dados, é crucial que o operador do sistema tenha acesso instantâneo a essas informações, a fim de permitir uma intervenção oportuna em caso de desequilíbrio da solução que possa comprometer a safra. Para garantir isso, é essencial que os dados sejam transmitidos em tempo real do local de aquisição até o usuário, proporcionando uma atualização imediata dos dados assim que são adquiridos.

Sistemas hidropônicos são usualmente instalados em zonas rurais e/ou possuem grandes extensões, caracterizando problemas com fontes de alimentação e entrega de sinal para comunicação. Dito isso a utilização de fontes de comunicação por cabo se torna inviável devido a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura para suportar as adversidades do ambiente (terra, eventuais animais, chuva, vento, etc).

2.5.1 LP-WAN

Para a larga distribuição de dispositivos *IoT* é necessária uma conexão wireless de baixo consumo energético devido as limitações para alimentação e posicionamento dos dispositivos sensores/atuadores. A fim de resolver esses problemas, um novo paradigma de *IoT*, as *Low Power Wide Area Network – LPWAN* (em tradução livre: Redes de Grande Área e Baixo Consumo) surgiram como uma classe padrão de comunicação que se destaca pela capacidade de cobrir grandes áreas, com baixa taxa de transferência de dados, pequenos pacotes de dados e operação de longa duração da bateria (CHAUDHARI, 2020).

2.5.2 LoRa e LoRaWAN

Existem algumas soluções disponíveis no mercado quando se trata de LP-WAN, sendo a tecnologia *Long Range – LoRa* a que obteve maior relevância nos últimos anos devido a grande popularidade na comunidade de desenvolvedores de soluções *IoT* e a adoção dessa tecnologia por grandes *players* de mercado como a *Amazon Web Service – AWS*. Esse grande sucesso se deve principalmente por ser um projeto open-source que conta com padronizações já bem estabelecidas que permitem qualquer pessoa utilizar e estender a tecnologia, sem que tenha que desembolsar custos com licenças ou *royalties*.

LoRa é a camada física que trabalha em uma faixa não licenciada de sub-GHz e pode operar em diferentes frequências dependendo da região: 866 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia. É capaz de transmitir dados a uma taxa variável de 300 bps até 50 kbps dependendo do canal adotado e do fator de espreamento (CHAUDHARI, 2020).

Para uma efetiva comunicação entre os dispositivos de Internet Das Coisas (*IoT*) e a “internet” é necessário que sejam implementados protocolos e gateways. O protocolo é um conjunto de regra que definirá como as comunicações deverão ser formatadas para serem consideradas validas dentro da camada física. Já o gateway é um equipamento de rede responsável unicamente pela tradução de protocolo e roteamento de mensagens.

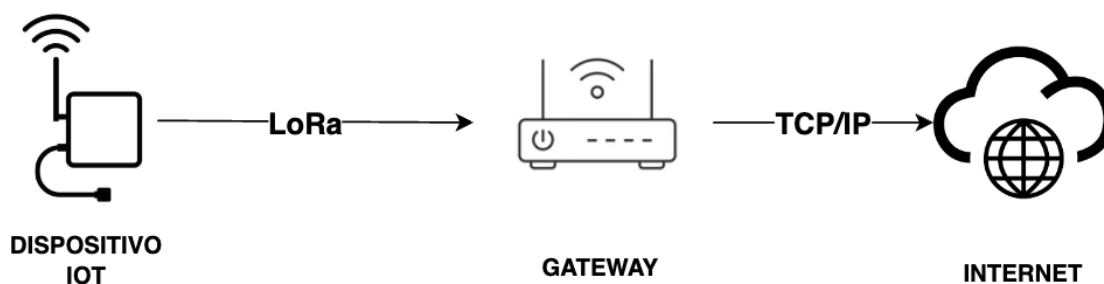
Vale ressaltar que não é possível que o LoRa se comunique diretamente a “internet” assim como um roteador doméstico. Isso é devido a dois fatores principais: incompatibilidade de frequências do radio LoRa as redes de dados já disponibilizadas de forma comum (roteadores domésticos e redes de comunicação telefônica) e a não implementação do protocolo TCP. Por isso faz-se necessário o uso de equipamentos de conversão (o gateway).

Para a comunicação LoRa foi utilizada a topologia de rede estrela, na qual os *gateways* retransmitem mensagens entre os dispositivos finais e um servidor de rede central, conforme

Figura 22. Os *gateways* são conectados aos servidores de rede por meio de conexão TCP/IP padrão e atuam como um tradutor de protocolos em mão dupla.

Neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento de um gateway e protocolos próprios para trafegar os dados do sistema construído.

Figura 22 – Modelo de comunicação estrela LoRa.



Fonte: Autor (2023).

2.6 ALIMENTAÇÃO

O consumo elétrico é um aspecto determinante para sistemas isolados devido as restrições de disponibilidade das baterias. No entanto, com o advento de circuitos eletrônicos capazes de coletar energia do meio ambiente as capacidades do sistema puderam ser drasticamente elevadas (SLONGO, 2013). A aplicação de sensores sem fio ocorre majoritariamente em locais que propiciam a coleta de energia solar devido a sua simplicidade estrutural desse método (SLONGO, 2013).

Mesmo que atualmente seja possível disponibilizar maiores quantidades de energia, a otimização de seu uso ainda deve ser uma preocupação, principalmente, financeira na aquisição de baterias e painéis fotovoltaicos.

A utilização de baterias de Lítio se tornou o padrão para o desenvolvimento de sistemas embarcados, devido a sua capacidade de carga superior e dimensões reduzidas. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados para uma operação segura desse elemento. Neste capítulo será abordado um breve resumo sobre a operação e gerenciamento de carga no sistema proposto.

2.6.1 Carregamento de bateria

Para que seja possível carregar baterias, é necessário que a tensão fornecida seja superior a tensão nominal da bateria, caso contrário não haverá diferença de potencial entre a bateria e o carregador, logo não haverá corrente.

2.6.2 BMS e saúde da bateria

Baterias de íons de lítio apresentam grandes melhorias quando comparadas a baterias de chumbo ácido, possuindo dimensões reduzidas e com maior capacidade de descarga. No entanto, alguns cuidados devem ser tomados para evitar desgaste prematuro de suas células.

Informações como temperatura, corrente e tensão devem ser continuamente monitorados nas baterias e caso situações de perigo para a saúde da célula sejam detectadas, o circuito deverá interromper a alimentação. O circuito responsável por isso é conhecido como *Battery Manage System* – BMS, ou em tradução literal, sistema de gerenciamento de baterias.

2.6.3 MPPT

O dispositivo de *Maximum Power Point Tracking* – *MPTT* (Rastreador e ponto de máxima potência) é responsável por controlar a tensão e corrente extraídos de um painel solar afim de obter a maior potência possível. Isso é necessário pois os painéis solares possuem uma relação inversamente proporcional entre as grandezas de tensão e corrente, onde o produto entre elas não é sempre constante e pode ser prejudicado conforme a relação adotada.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 DEFINIÇÕES DE PROJETO

Com base em todo o conteúdo exposto no referencial teórico deste trabalho foi possível realizar um levantamento de requisitos e desejos a cerca de qual deverá ser a implementação ideal para um medidor de parâmetros de qualidade de água, especialmente focado em sistemas hidropônicos. Todas as decisões que foram tomadas estarão expostas no próximo capítulo.

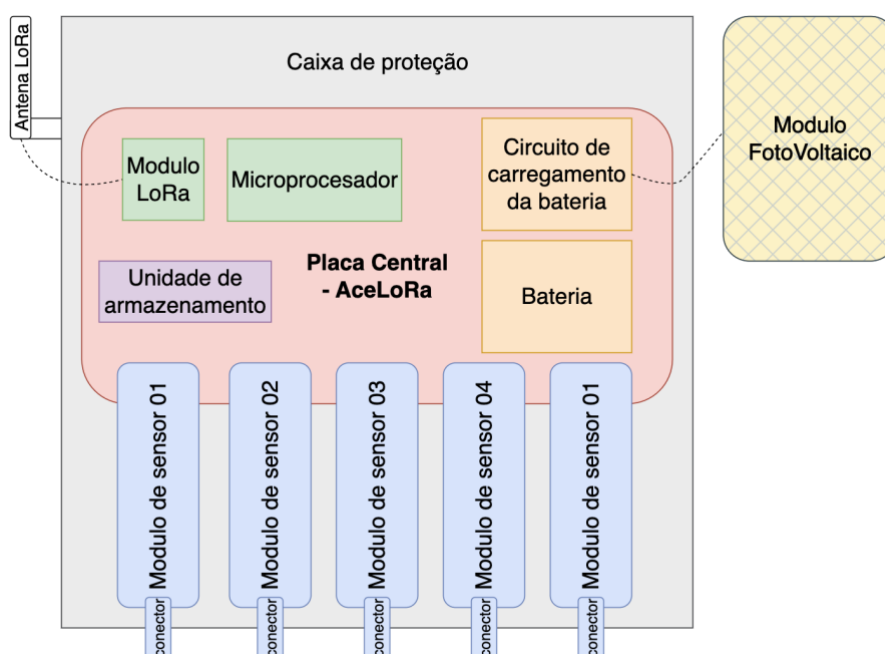
3.1.1 Nome do projeto

O projeto foi denominado AceLoRa devido a união das palavras “acerola” e o canal de comunicação, LoRa, que foi adotado.

3.1.2 Hardware

Como verificado no tópico 2.1, o ambiente de hidroponia se aproxima das condições típicas rurais. Nesses cenários o acesso a recursos de energia elétrica e comunicação cabeada é restrito e exige um alto custo financeiro para que esse recurso possa ser distribuído neste ambiente. Por isso, o sistema proposto deverá possuir bateria e placa solar embutidos somados à comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo elétrico. Na Figura 23 está ilustrado o modelo para o posicionamento dos elementos que compõem o hardware.

Figura 23 – Modelo AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

O sistema está dividido em uma placa central (AceLoRa) responsável por realizar o processamento dos dados, conexões sem fio e o carregamento da bateria, juntamente a módulos de medição que tem como único propósito comportar o circuito que realiza as medições, filtros e ajustes necessários no sinal medido. Essa decisão traz flexibilidade na escolha de quais unidades de medição serão utilizados bem como a precisão desejada e permite melhorias contínuas nos circuitos de medição por meio de versionamentos e a adição de novos módulos ao “catálogo” de opções.

Como o local de instalação é propício a adversidades climáticas e a proximidade com líquidos, os circuitos estão protegidos por uma caixa impermeável e que possui o mínimo de furos possíveis para minimizar pontos de infiltração. Com isso em mente, as únicas conexões que estão expostas para fora da caixa são os conectores de: antena, painel fotovoltaico e sensores.

3.1.3 Comunicação

Foram desenvolvidos neste trabalho, tanto o protocolo quanto o *gateway* para a comunicação com via LoRa, conforme debatido no capítulo 2.5.

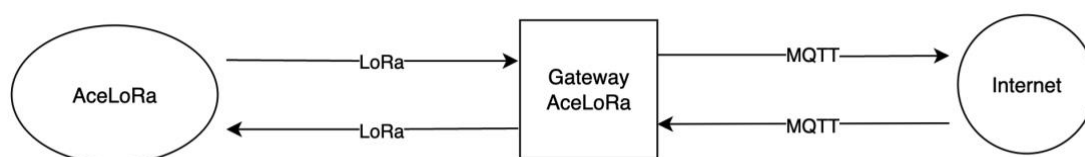
O *gateway* contará apenas com um canal de comunicação físico para o canal LoRa, suportando por tanto, uma única frequência para escritas e leituras. Para realizar a comunicação a internet foi utilizada uma conexão WiFi proveniente de um modem 4G. Dessa forma ele sempre direcionará todas os comandos recebidos via LoRa para essa conexão WiFi e vice-versa.

Nos subcapítulos que se seguem são demonstrados a construção e o protocolo definido para essa solução de comunicação.

3.1.3.1 Gateway AceLoRa – Comunicação

Como dito anteriormente, esse dispositivo é responsável apenas por realizar a conversão em duas vias, das mensagens que chegarem por meio do radio LoRa para um protocolo da internet, no caso o MQTT. Na Figura 24 está ilustrado um diagrama do fluxo de mensagens.

Figura 24 – Diagrama do fluxo de mensagens na *Gateway AceLoRa*



Fonte: Autor (2023).

3.1.3.2 Gateway AceLoRa – Hardware

Foi utilizada uma placa de desenvolvimento IoT denominada “KoIoT – AcDc”, estando ilustrada na Figura 25. Seu hardware é composto basicamente por um ESP32, para se conecta ao WiFi, acrescido de um chip LoRa (SX1276).

Figura 25 – KoIoT – AcDc.



Fonte: Autor (2023).

3.1.3.3 Gateway AceLoRa – Protocolo

Para que haja uma comunicação efetiva entre todas as partes é necessário que seja adotado um protocolo de comunicação que irá padronizar como as conversas e endereçamentos devem ser feitos.

Na etapa que comunica a Gateway a internet, foi utilizado o protocolo MQTT por já ser um protocolo bem-conceituado para aplicações IoT. De forma resumida ele é baseado em mensagens, aqui denominadas de “*payloads*”, que são publicadas em endereços que são chamados de “tópicos”. Uma vez publicado qualquer outro nó de rede que esteja subscrito a esse tópico receberá a mensagem e assim poderá processá-la conforme necessidade.

Já na etapa que comunica a Gateway a AceLoRa via LoRa, foi necessário criar um protocolo próprio que dividirá a mensagem em duas partes, sendo a primeira um cabeçalho e a segunda o corpo da mensagem. A mensagem disparada pode ter um tamanho máximo de 255 *bytes*, sendo que 4 primeiros bytes da mensagem estão reservados para o cabeçalho, sobrando 251 *bytes* para a mensagem. A mensagem deverá ser um JSON e o cabeçalho deve ser preenchido conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Formato do cabeçalho do protocolo LoRa.

Posição do byte	Descrição
1	ID em hexadecimal do destinatário
2	ID em hexadecimal do remetente
3	ID em inteiro sequencial da mensagem
4	Tamanho da mensagem que foi enviada

Fonte: Autor (2023).

Esse protocolo está pronto para aceitar mais do que um nó de rede de forma estável, no entanto a quantidade de nós máxima está limitada a quantidade de endereços que pode ser representada por 1 *byte*, ou seja, 255 endereços possíveis, onde um deles deverá pertencer a própria Gateway. Existe uma preocupação quanto ao ruído que 255 dispositivos poderão gerar ao se comunicarem utilizando um único canal e seriam necessários testes práticos para definir qual a quantidade máxima real de dispositivos suportados com esse protocolo.

É possível que os dispositivos possam se comunicar nó a nó sem que seja necessário a intervenção direta da Gateway, mas vale ressaltar que apenas as mensagens que a ela forem direcionadas serão roteadas para o protocolo MQTT.

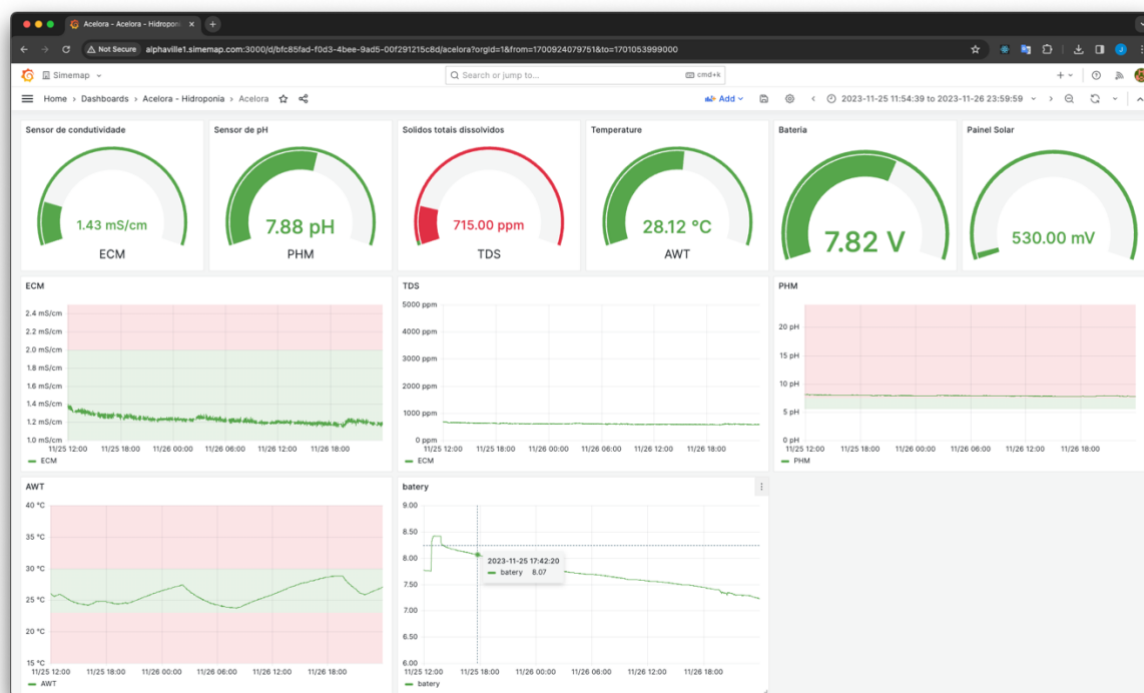
3.1.4 Interface de gerenciamento e visualização dos dados

Foram desenvolvidas duas interfaces gráficas neste sistema. A primeira é designada para as configurações do dispositivo e somente pode ser acessada quando o operador estiver fisicamente próximo a placa e utilizar o seu *access point*. E a segunda foi designada para visualização dos dados e alertas gerados, sendo adotado o uso da ferramenta de gerador de dashboards “Grafana”.

A interface de configuração está ilustrada na Figura 26, e se trata de um pequeno dashboard escrito em HTML que permite a configuração de quais sensores estão sendo utilizados em quais portas, sendo possível também a visualização dos níveis de tensão do painel solar/bateria e qual o espaço livre disponível no cartão SD (caso esteja conectado a placa).

O Grafana permite muita personalização dos gráficos e informações exibidas, sendo ideal para a construção de *dashboards* rápidos. A intenção com a sua utilização é apenas prover uma maneira rápida e fácil dos operadores do sistema acessarem os dados históricos da placa. Esse painel pode ser acessado na internet por meio do navegador sem a necessidade de instalação de quaisquer programas ou a realização de configurações.

Figura 26 – Dashboard desenvolvido no Grafana.



Fonte: Autor (2023).

3.2 PLACA CENTRAL - ACELORA

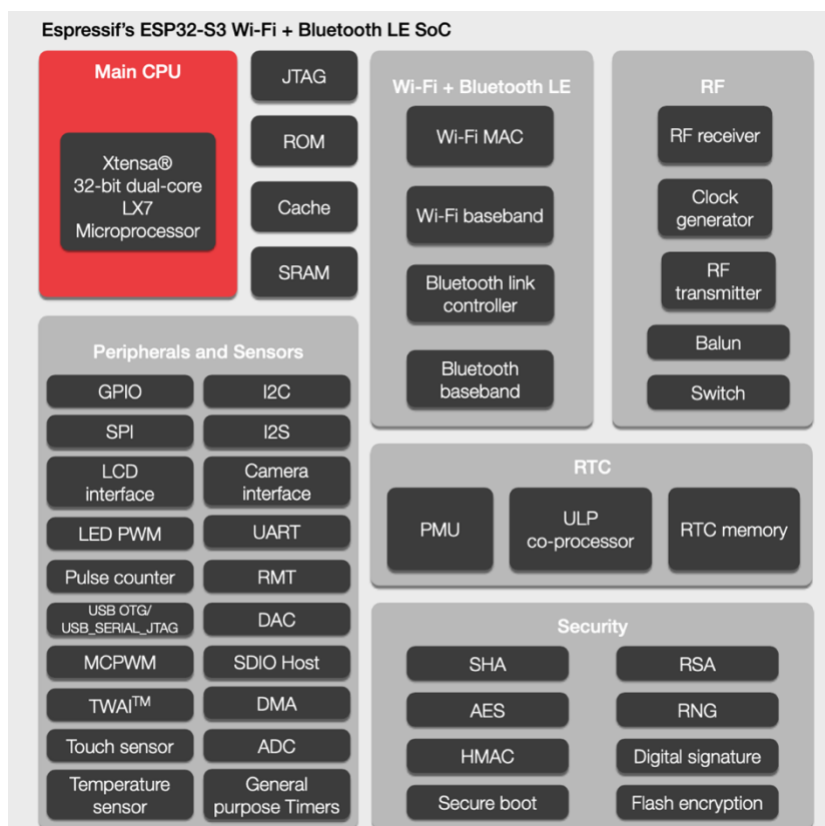
A placa central, denominada “AceLoRa”, é o cérebro do sistema e é responsável por realizar as rotinas de medições, disparos de mensagens e gerenciamento de bateria. Ela pode ter seus parâmetros de medições ajustados por meio de uma interface WEB fornecida em uma rede WiFi local da própria placa ou remotamente através de comunicação LoRa.

3.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido foi o módulo ESP32-S3 da Espressif, devido ao baixo consumo, boa capacidade computacional e baixo custo. Na Figura 27 está ilustrada as principais *features* deste microprocessador, dentre as quais merecem destaque:

- Processador: Dual-core de 32 bits com 240 MHz;
- Memória RAM: 512 KB;
- Memória FLASH: até 16 MB;
- WiFi e Bluetooth integrados ao modulo;

Figura 27 – Features do ESP32-S3.



Fonte: Espressif (2020).

O ESP32-S3 possui modos de economia que podem reduzir drasticamente o seu consumo por meio de configurações do firmware. Na Tabela 4 consta um resumo dos modos disponíveis no datasheet do componente.

Tabela 4 – Modos de economia de energia ESP32-S3.

Modo de energia	Descrição		Consumo de energia
Modem-sleep	CPU ligada	40MHz Dual-core	18.7 ~ 28.8 mA
		Single-core	16.2 ~ 25.4 mA
	WiFi/Btt ligado	80MHz Dual-core	33.1 ~ 56.3 mA
		Single-core	28.4 ~ 49.6 mA
		160MHz Dual-core	49.6 ~ 81.1 mA
		Single-core	39.9 ~ 69.2 mA
Light-sleep	VDD_SPI e WiFi desligados e todas as GPIOs em modo de alta impedância	240MHz Dual-core	66.2 ~ 107.9 mA
		Single-core	51.2 ~ 87.9 mA
Modem-sleep	Apenas o RTC e periféricos acionados		8 uA
Power off	Chip desligado		1 uA

Fonte: adaptado de Espressif (2023).

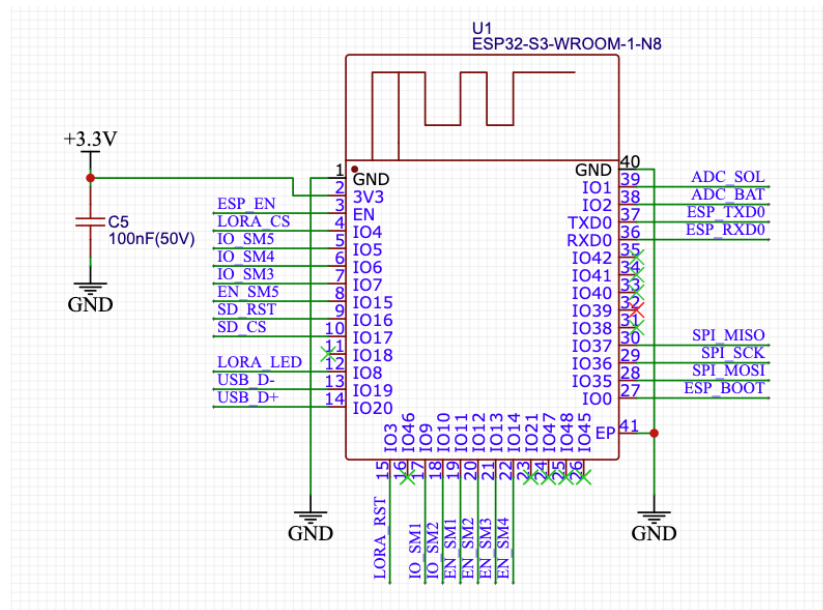
Na Figura 28, consta o esquemático de ligação necessário para utilizar o microprocessador e na Tabela 5 são listados todos os pinos utilizados e seus devidos propósitos.

Tabela 5 – Mapeamento de pinos utilizados no MCU.

Pino / IO	Referência utilizada	Descrição
03 / EN	ESP_EN	<i>Enable</i> do MCU
04 / IO4	LORA_CS	Modulo LoRa - Clock
05 / IO5	IO_SM5	Pino ADC para o modulo de sensor 5
06 / IO6	IO_SM4	Pino ADC para o modulo de sensor 4
07 / IO7	IO_SM3	Pino ADC para o modulo de sensor 3
08 / IO15	EN_SM5	Pino digital para habilitar o sensor 5
09 / IO16	SD_RST	Pino de reset do cartão microSD
10 / IO17	SD_CS	Pino de clock do cartão microSD
12 / IO08	LORA_LED	Pino de controle do LED de alerta do LoRa
13 / IO19	USB_D-	USB D-
14 / IO20	USB_D+	USB D+
15 / IO3	LORA_RST	Pino para reset do chip de LoRa.
17 / IO9	IO_SM1	Pino ADC para o modulo de sensor 1
18 / IO10	IO_SM2	Pino ADC para o modulo de sensor 2
19 / IO11	EN_SM1	Pino digital para habilitar o sensor 1
20 / IO12	EN_SM2	Pino digital para habilitar o sensor 2
21 / IO13	EN_SM3	Pino digital para habilitar o sensor 3
22 / IO14	EN_SM4	Pino digital para habilitar o sensor 4
39 / IO1	ADC_SOL	Pino ADC para leitura de tensão da placa solar
38 / IO2	ADC_BAT	Pino para leitura de tensão da bateria
37 / TXD0	ESP_TXD0	Pino TX para gravação serial do firmware
36 / RXD0	ESP_RXD0	Pino RX para gravação serial do firmware
30 / IO37	SPI_MISO	Pino MISO do barramento SPI
29 / IO36	SPI_SCK	Pino SCK do barramento SPI
28 / IO35	SPI_MOSI	Pino MOSI do barramento SPI
27 / IO0	ESP_BOOT	Pino digital que define o modo de boot do MCU

Fonte: Autor (2023).

Figura 28 – Esquemático de ligação ESP32-S3.

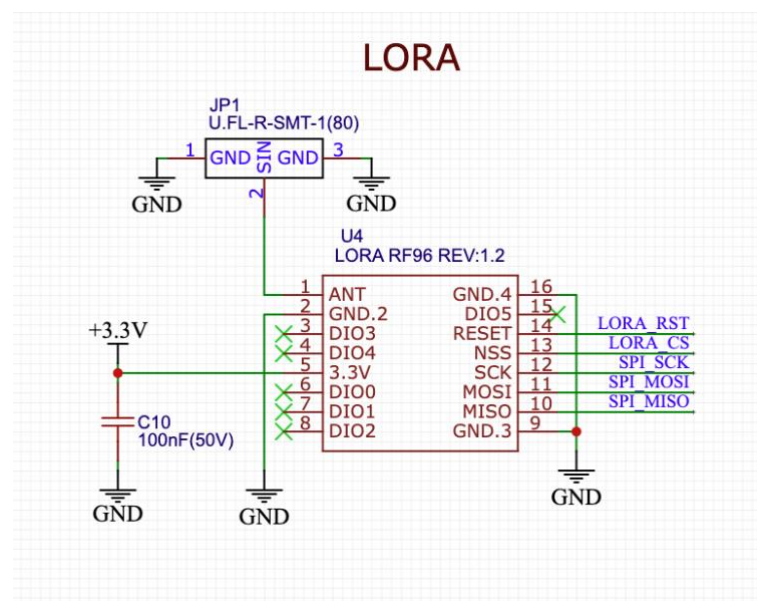


Fonte: Autor (2023).

3.2.2 LORA

Para a comunicação por meio do radio LoRa foi utilizado o módulo SX1276 (“LORA RF96 VER:1.2”) fabricado pela SEMTECH, que opera em 915 MHz e se comunica por meio do protocolo SPI. Sua escolha se justifica devido a experiências anteriores e seu baixo custo de aquisição. Foi utilizada uma antena externa que foi conectada via conector UFL.

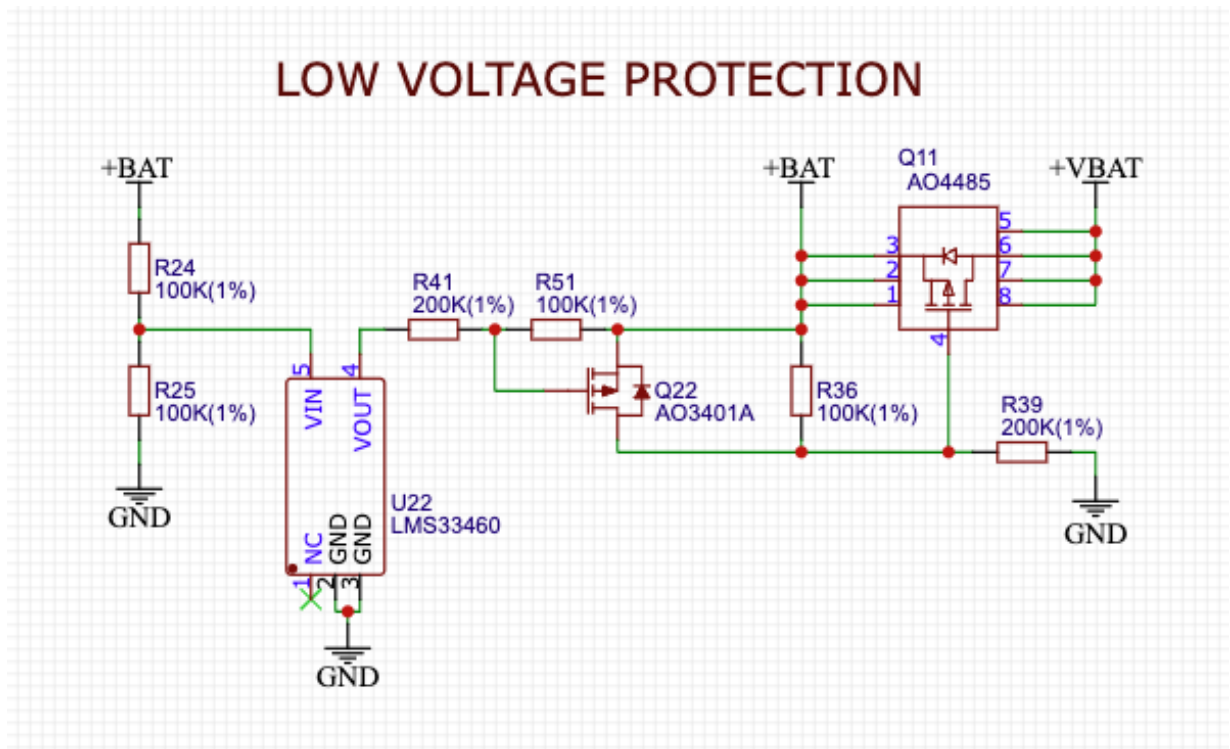
Figura 29 – Esquema de ligação modulo LoRa.



Fonte: Autor (2023).

Para prevenir que a bateria sofra com a “descarga profunda”, foi adicionado uma proteção para baixos níveis de tensão na bateria utilizando um “*Undervoltage Detector*” (“U22”) que manterá um MOSFET (“Q11”) armado enquanto a tensão (+BAT) for maior que o nível crítico de 6V.

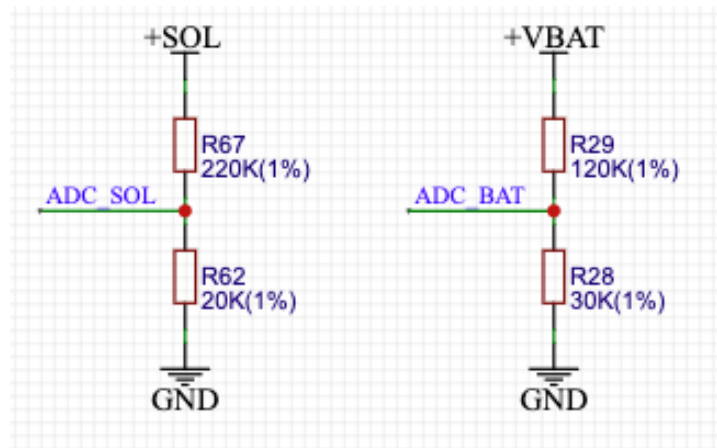
Figura 31 – Esquema de conexão do circuito de proteção contra baixa tensão.



Fonte: Autor (2023).

Para que seja possível monitorar a tensão do painel solar e da bateria, foram adicionados divisores resistivos para que o MCU possa ler a tensão e então informar o usuário sobre uma estimativa de carga da bateria ou detectar longos períodos de dias sem fornecimento de energia solar.

Figura 32 – Esquema de conexão para monitoramento dos níveis de tensão.

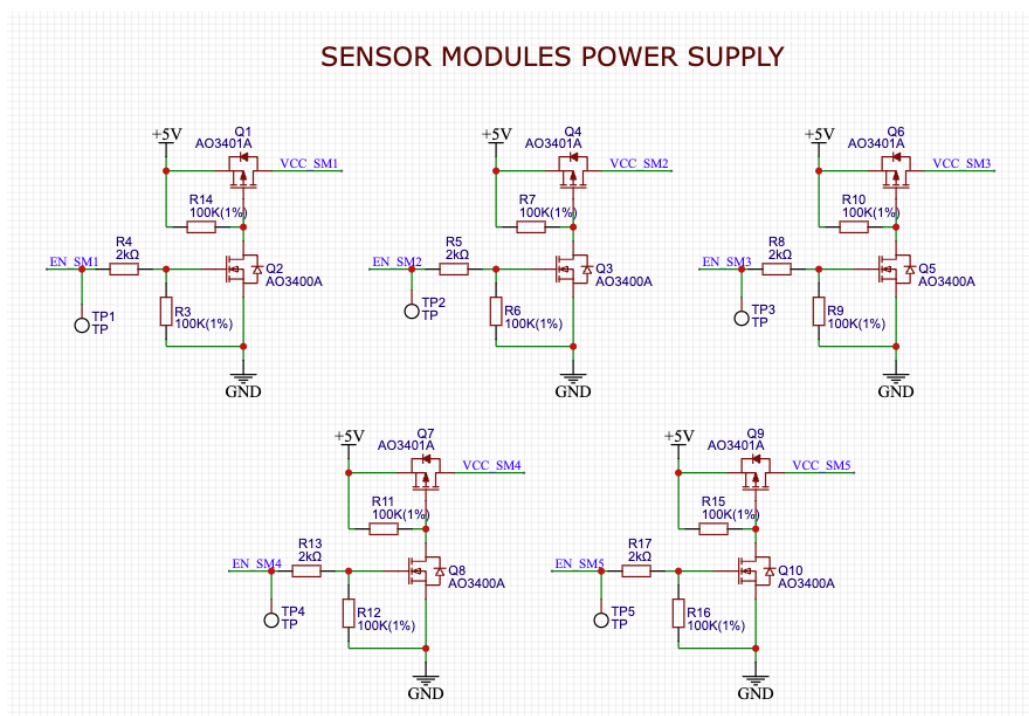


Fonte: Autor (2023).

3.2.4 Circuito de chaveamento dos sensores

Os circuitos dos módulos de medições que são abordados no próximo capítulo, são usualmente utilizados para realizar as medições desejadas em intervalos programados e, portanto, não necessitam continuar consumindo energia após a medição. Por isso, foram adicionados MOSFETS para chavear individualmente a alimentação VCC (+5V) conectores dos módulos de sensores, como demonstrado na Figura 33.

Figura 33 – Esquema de chaveamento dos sensores.



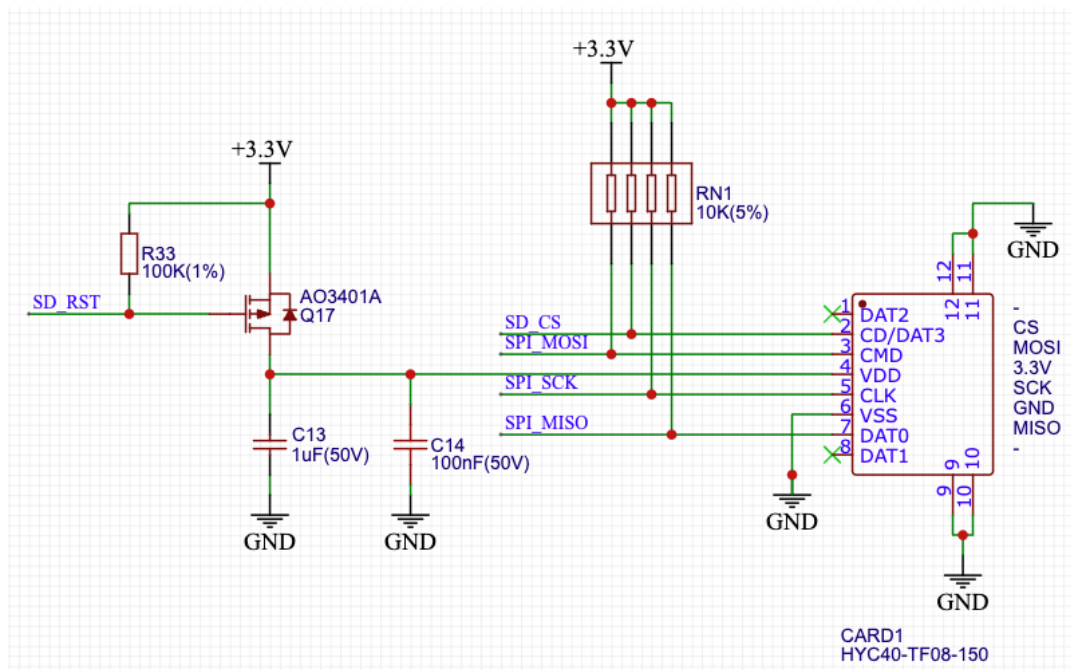
Fonte: Autor (2023).

3.2.5 Circuito de armazenamento de dados

Para armazenar logs de leituras a longo prazo, foi adicionado uma conexão para cartão microSD, que se comunica com o microprocessador por meio do protocolo SPI. Uma vez que os dados forem armazenados, podem ser obtidos tanto por meio da leitura física do cartão em um computador, quanto por meio da interface do sistema da AceLoRa.

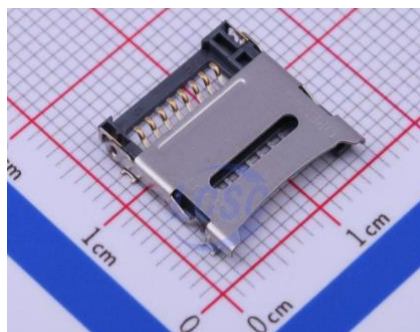
Foi adicionado um MOSFET para que seja possível alimentar esse circuito apenas quando necessário. Como a placa está dentro de uma caixa, foi utilizado o socket da Figura 35 que é do tipo “PEDAL-LIFT” e permite que o cartão possa ser inserido/removido em um ângulo de 90 graus em relação a placa.

Figura 34 – Esquema de ligação cartão microSD.



Fonte: Autor (2023).

Figura 35 – Socket para microSD.



Fonte: LCSC, 2023.

3.2.6 LED para alertas do sistema

A utilização de LEDs para sinalizações e alertas de sistemas eletrônicos são muito úteis e interativos pois permitem que o operador obtenha *feedback* visual sem a necessidade de acessar uma interface visual ou realizar medições. Entretanto devido a preocupação com consumo de energia, o uso de LEDs deve ser ponderado e utilizado somente se estritamente necessário.

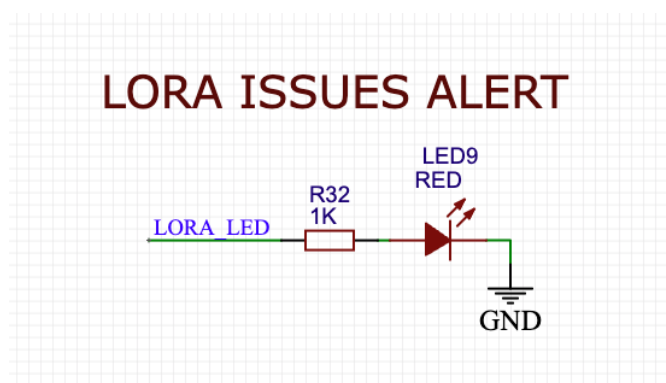
Nesse sentido foi utilizado apenas dois LED para alertas, sendo um para indicar se o painel solar está alimentando a bateria e o outro para indicar o modo de operação da placa, de forma que irá se acender conforme as configurações descritas na Tabela 6. Não são necessários outros alertas pois uma vez que a placa obtenha uma conexão estável ao LoRa, eles poderão ser disparados para uma interface gráfica ou gerar notificações. A ideia aqui é realmente informar problemas que só poderão ser visualizados no local físico da instalação.

Tabela 6 – Exibição de alertas LoRa no LED.

Status	Descrição
LED aceso	Placa ativa.
LED piscando rapidamente	Modo de configuração ativo.
LED piscando rapidamente duas vezes	Tentando detectar a rede LoRa.
LED piscando – um flash longo e dois curtos	Erro ao inicializar o modulo LoRa.

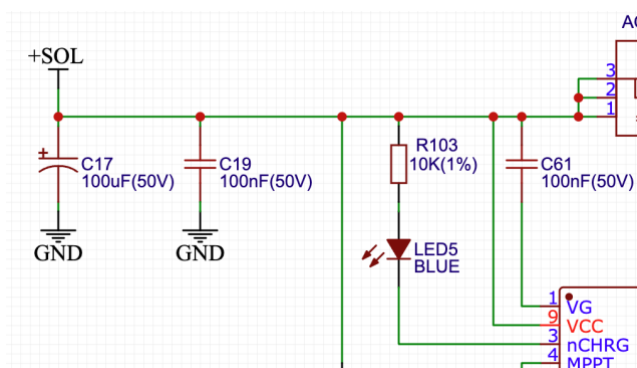
Fonte: Autor (2023).

Figura 36 – Esquema de ligação do LED de alerta do LoRa.



Fonte: Autor (2023).

Figura 37 – Esquema de ligação do LED de estado do painel solar.



Fonte: Autor (2023).

3.2.7 Conectores

A placa central possui ao todo 7 conectores internos que estão listados na Tabela 7, tendo seus esquemas de conexão ilustrados na Figura 39, Figura 39 e Figura 40. Nas conexões do painel solar e da bateria, por fazerem parte da etapa de potência da placa, foi adicionado fusíveis de proteção juntamente a entrada do pino de GND. Os conectores utilizados para conectar os módulos de sensores utilizam uma barra de pinos dupla para melhorar o suporte mecânico entre as placas.

O ESP32-S3 tem suporte nativo ao protocolo USB e pode ser utilizado tanto para uso geral (transferência de dados e conexão de acessórios como mouse e teclado), quanto para o update de firmware e inclusive possui um JTAG ¹ embutida que permite o debug do código. Para esse projeto foram utilizadas apenas a função de update do firmware e debug, não sendo necessário a conexão dos pinos de alimentação VCC ao conectar da placa.

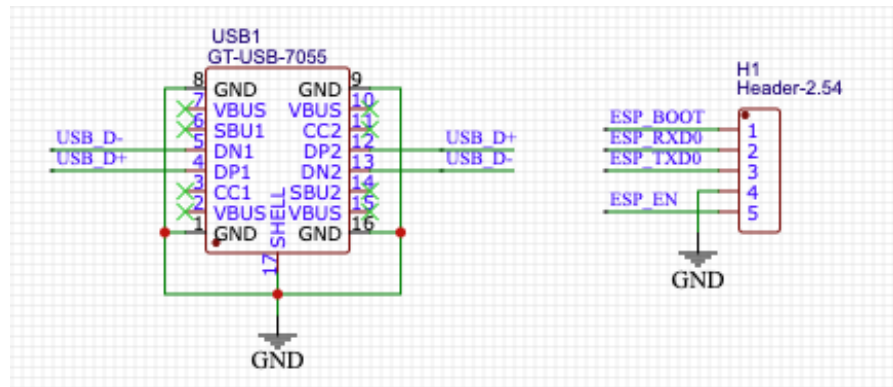
Tabela 7 - Conectores da placa central AceLoRa.

Quantidade	Descrição	Tipo
5	Conector para modulo de sensor	Header-Female-2.54_2X3
1	Conector do painel solar	KF2EDGV-3.81-2P
1	Conector da bateria	KF2EDGV-3.81-2P
1	Conector para update de firmware	USB-C
1	Conector para update de firmware	Header-2-54

Fonte: Autor (2023).

¹ JTAG - *Joint Test Action Group* (em tradução livre: Grupo Conjunto de Ação de Teste). É um conjunto de ferramentas que em conjunto permite pausar o firmware de um MCU e inspecionar a memória e o fluxo do código.

Figura 38 – Conectores para update de firmware da AceLoRa.



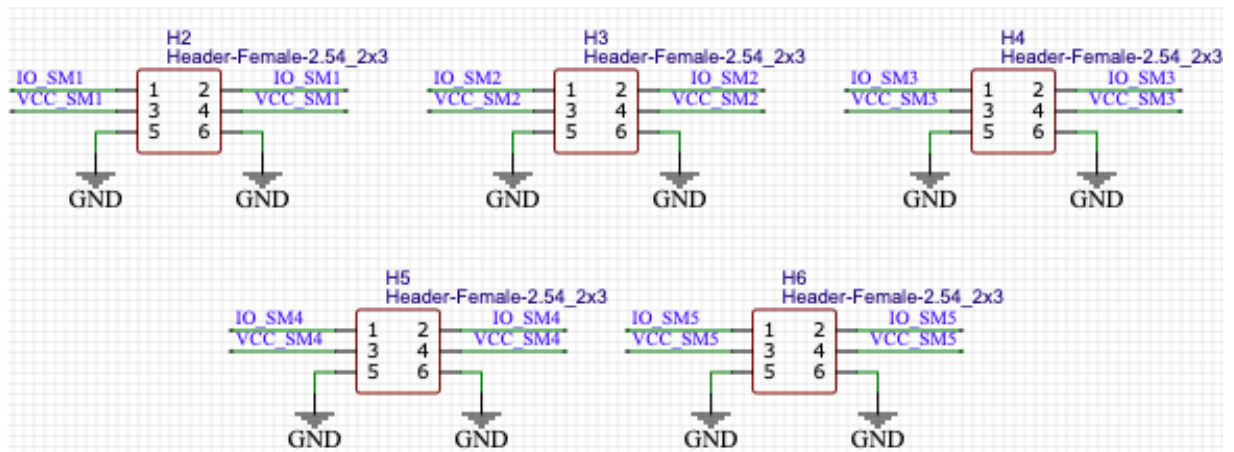
Fonte: Autor (2023).

Figura 39 – Conectores de potência da AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

Figura 40 – Conectores para os módulos de sensores da AceLoRa.

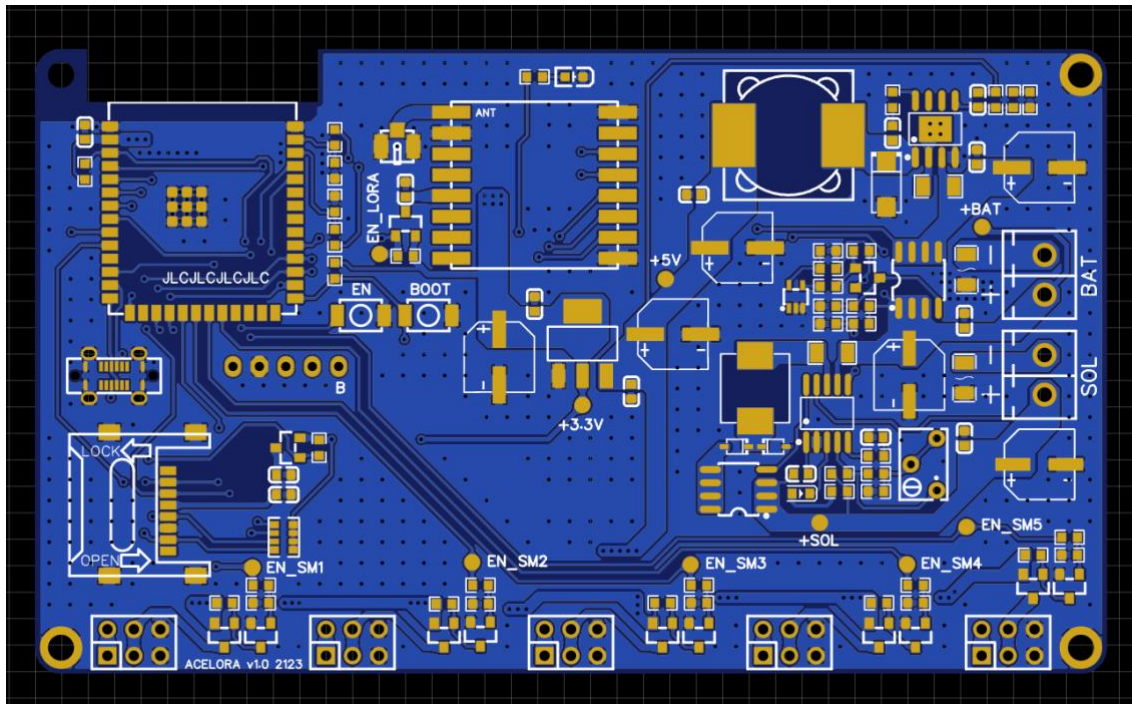


Fonte: Autor (2023).

3.2.8 Modelo da placa final

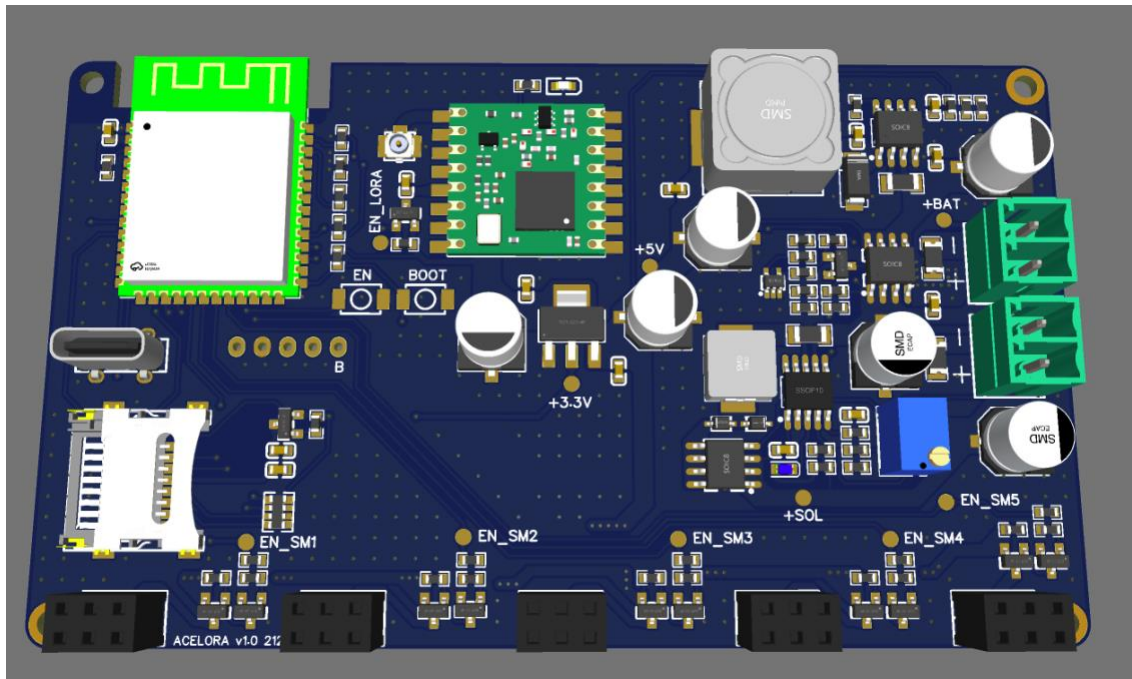
O modelo físico da placa foi projetado levando em conta o tamanho padrão adotado para os módulos de sensores que estarão anexados na parte inferior da placa. Possuirá 4 furos para fixação por parafusos. As conexões USB, update de firmware e cartão de memória estão ortogonais a placa para permitir que a operação enquanto a placa estiver parafusada a caixa. A seguir estão ilustrados os modelos 2D (Figura 41) e 3D (Figura 42) da placa.

Figura 41 – Modelo 2D da placa AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

Figura 42 – Modelo 3D da placa AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

3.3 MÓDULOS DE SENSORES

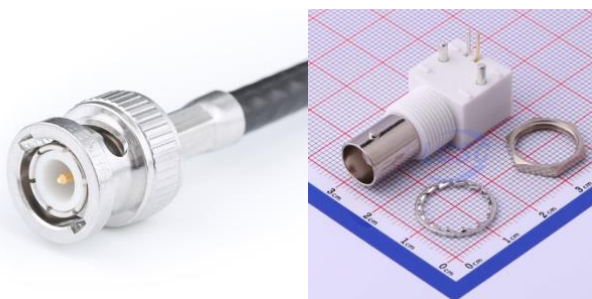
Os módulos de sensores realizam a função de acoplar o circuito necessário para converter as grandezas físicas em valores digitais ou analógicos que podem ser coletados por um MCU sem a adição de filtros ou ampliações a nível de hardware permitindo assim que novos módulos sejam desenvolvidos e adicionados ao “catálogo”. Inicialmente serão utilizados apenas 4 módulos que estarão descritos nos próximos tópicos.

Para fins de padronização, todos os módulos são alimentados com $+5\text{ V}$ em corrente contínua e possuirão apenas uma trilha para comunicação analógica ou digital. Caso sejam necessários outros níveis de tensão, o modulo deverá realizar o ajuste necessário em seu circuito.

Todos os módulos terão que expor uma conexão elétrica para a conexão com a sonda de medições. Para isso adotou-se 2 tipos de conectores que podem ser utilizados conforme a demanda de fios:

- 2 fios: Conector BNC soldado na PCB e exposto para fora da caixa (Figura 43).
- 3+ fios: Conectores GX16 presos a caixa e ligado por fios ao modulo (Figura 44).

Figura 43 – Conectores BNC macho e fêmea.



Fonte: LCSC (2023).

Figura 44 – Conectores família GX16 macho e fêmea.



Fonte: Aliexpress (2023).

Ambos os conectores foram escolhidos devido a proteção contra água por meio de borrachas de vedação adicionadas às roscas de fixação do conector e a capacidade de uma boa fixação mecânica dos cabos, que evita desprendimentos acidentais e o surgimento de curtos-circuitos e mau contatos nas conexões. Para isso os conectores BNC utilizam um sistema de molas e os conectores da família GX utilizam o rosqueamento entre os conectores macho e fêmea.

3.3.1 PHM – pH Meter

O modulo para medição do pH de soluções aquosas está referenciado pela sigla PHM (*pH Meter*), e utiliza para realizar as medições, a sonda **SEN0161** (ilustrado na Figura 45) que é capaz de operar em temperaturas entre 0 e 80 °C e medir valores de pH entre 0 e 14. O fabricante fornece a Tabela 8 com a relação de tensão e pH a temperatura de referência 25 °C.

Figura 45 – Sonda pH.



Fonte: Botland.

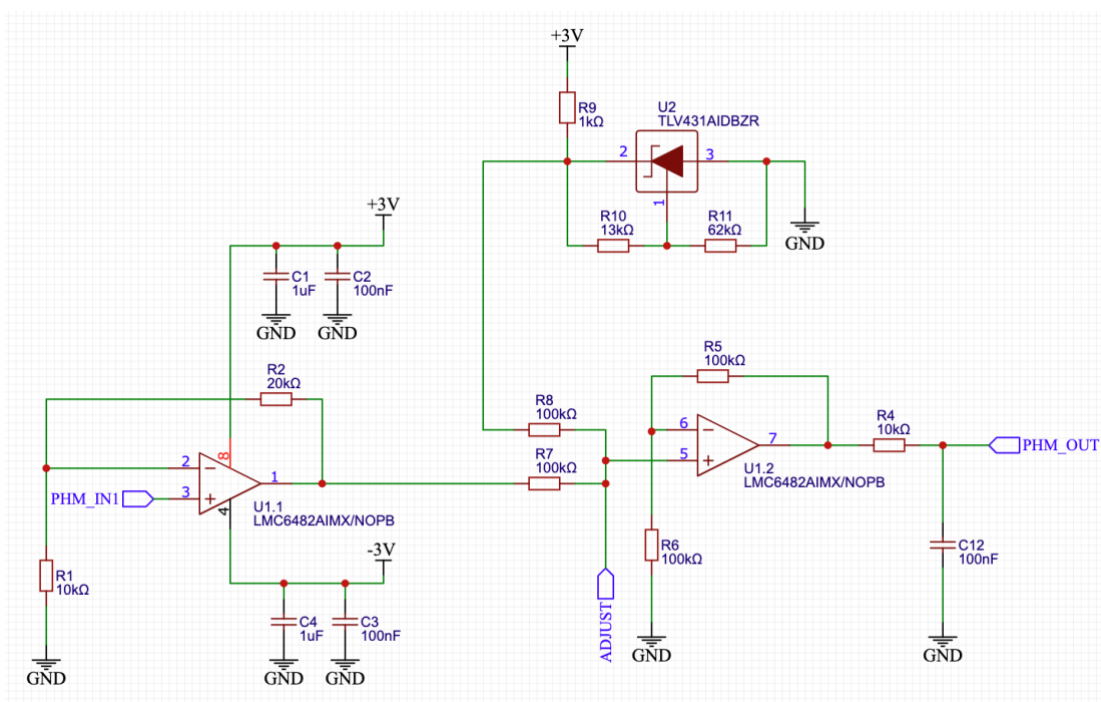
Tabela 8 - Relação tensão X pH a 25°C

Tensão (mV)	Valor de pH	Tensão (mV)	Valor de pH
414.12	0.00	-414.12	14.00
354.96	1.00	-354.96	13.00
295.80	2.00	-295.80	12.00
236.64	3.00	-236.64	11.00
177.48	4.00	-177.48	10.00
118.32	5.00	-118.32	9.00
59.16	6.00	-59.16	8.00
0.00	7.00	0.00	7.00

Fonte: DFROBOT.

Devido aos baixos níveis de tensão é necessário utilizar um circuito amplificador de alta impedância para que seja possível realizar as medições utilizando um MCU (no caso o ESP32-S3 acoplado na AceLoRa), e como o nível de tensão varia entre $+414,12\text{ mV}$ e $-414,12\text{ mV}$ foi necessário utilizar o amplificador com alimentação simétrica. Na Figura 46 é possível verificar o circuito necessário para realizar essa medição.

Figura 46 – Esquema para condicionamento de sinal de pH.



Fonte: Autor (2023).

A sonda possui dois terminais, sendo um deles o referencial – GND (“PHM_IN2”) e o outro o sinal de tensão medido (“PHM_IN1”) que esta diretamente ligado a entrada não inversora do primeiro AMP-OP (“U1.1”) configurado para operar como não inversor simétrico com ganho 3. O segundo AMP-OP (“U1.2”) está na configuração somador não inversor com ganho unitário e soma o sinal recebido pelo primeiro AMP-OP com um sinal de $1,5\text{ V}$ fornecido pelo Zener variável “U2”. A operação de soma servirá para manter o sinal de saída sempre positivo, uma vez que a menor tensão fornecida pelo primeiro AMP-OP é $-414,12\text{ mV} * 3 = -1,2\text{ V}$ que após a soma resultará em $-1,2 + 1,5 = 0,3\text{ V}$, dessa forma é possível reajustar a tabela 7:

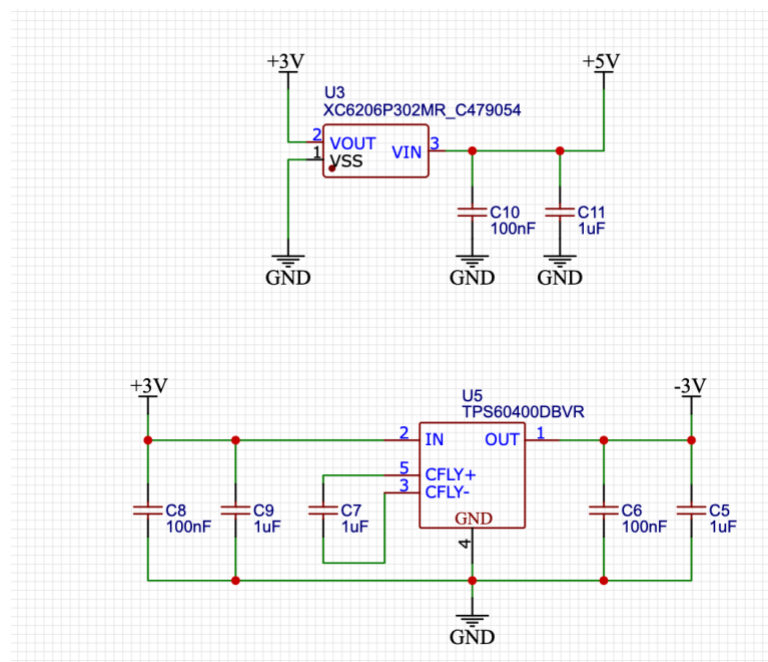
Tabela 9 – Relação ajustada de tensão X pH a 25°C

Tensão (V)	Valor de pH	Tensão (V)	Valor de pH
$0,41412 \cdot 3 + 1,5 = 2,74$	0,00	$-0,41412 \cdot 3 + 1,5 = 0,25$	14,00
$0,35496 \cdot 3 + 1,5 = 2,56$	1,00	$-0,35496 \cdot 3 + 1,5 = 0,43$	13,00
$0,29580 \cdot 3 + 1,5 = 2,38$	2,00	$-0,29580 \cdot 3 + 1,5 = 0,61$	12,00
$0,23664 \cdot 3 + 1,5 = 2,20$	3,00	$-0,23664 \cdot 3 + 1,5 = 0,79$	11,00
$0,17748 \cdot 3 + 1,5 = 2,03$	4,00	$-0,17748 \cdot 3 + 1,5 = 0,96$	10,00
$0,11832 \cdot 3 + 1,5 = 1,85$	5,00	$-0,11832 \cdot 3 + 1,5 = 1,14$	9,00
$0,59160 \cdot 3 + 1,5 = 1,67$	6,00	$-0,59160 \cdot 3 + 1,5 = 1,32$	8,00
$0,00000 \cdot 3 + 1,5 = 1,50$	7,00	$0,00000 \cdot 3 + 1,5 = 1,50$	7,00

Fonte: Autor (2023).

Para que seja possível utilizar os AMPO-OPs com alimentação simétrica, é necessário o uso de uma fonte simétrica. Como o módulo é alimentado apenas com um sinal positivo de tensão (+5 V), foi necessário o uso de um “*Charge Pump Voltage Inverter*” para criar um sinal de tensão de mesmo módulo, porém, sentido inverso, utilizando para isso o CI “TPS60400DBVR”. Foi utilizado 3 V para alimentar os AMP-OPs e para isso foi utilizado um regulador de tensão linear. O circuito descrito está ilustrado na Figura 47.

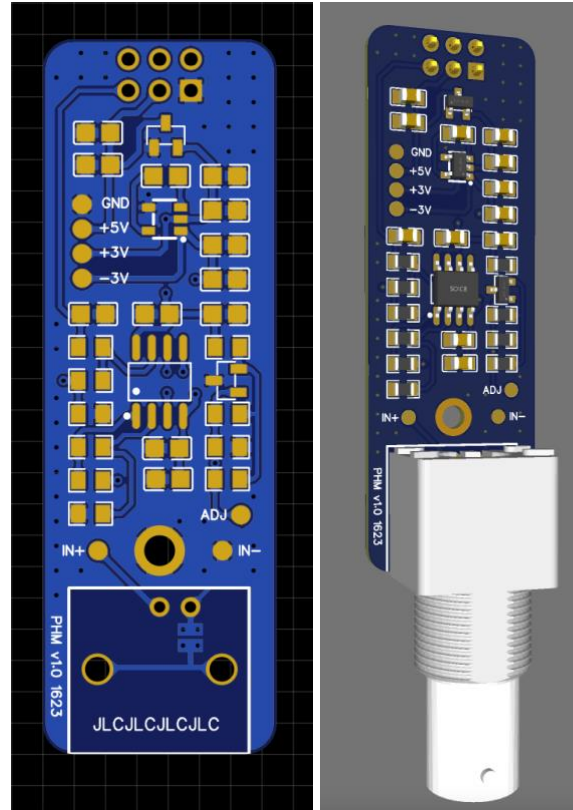
Figura 47 – Esquema de ligação dos moduladores de tensão.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 48 está ilustrado os modelos 2D e 3D da placa PHM:

Figura 48 – Modelos 2D e 3D da placa PHM.



Fonte: Autor (2023).

Para realizar a conversão da tensão lida para o valor de pH equivalente, foi utilizado como base a equação de conversão disponível no código fonte de uma biblioteca para leitura de pH fornecido pela empresa DFRobot.

$$Slope = \frac{7,0 - 4,0}{\frac{neutralVoltage - 1500}{3} - \frac{acidVoltage - 1500}{3}} \quad (16.1)$$

$$Intercept = 7 - Slope \frac{neutralVoltage - 1500}{3} \quad ((16.1).2)$$

$$pH = Slope \frac{(voltage * 1000) - 1500}{3} + Intercept \quad ((16.1).3)$$

Nessa equação foi calculado o coeficiente *Slope* por meio de uma relação linear entre o ponto de pH neutro (7,0) e um ponto de pH ácido (4,0). Em seguida foi calculado o deslocamento do ponto de intercepção (“*Intercept*”) da curva no eixo y de modo a deixar a

curva centralizada no valor de pH neutro (7,0). Por fim foi montada a equação linear (17) com os termos de *Slope* e *Intercept*, para descrever a relação descrita na Tabela 9.

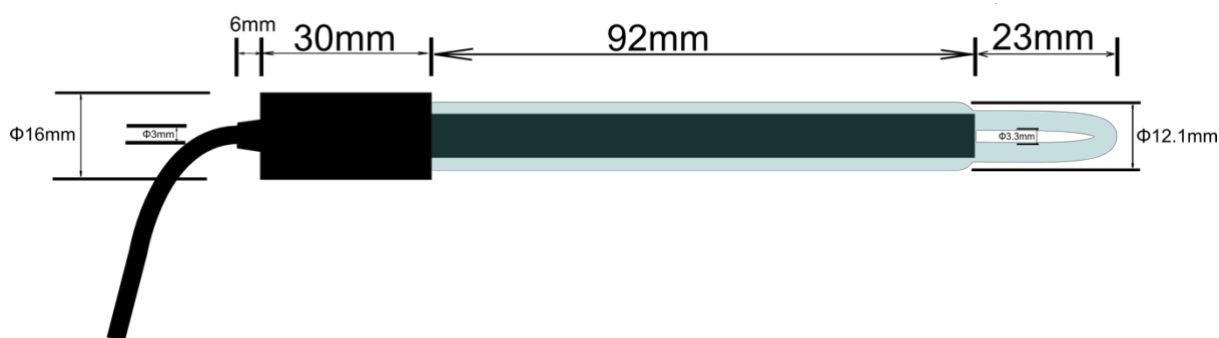
A equação (16.3) é válida apenas para a temperatura utilizada no processo de calibração. Para realizar a compensação dinamicamente, foi utilizada a equação (17), que foi descrita no referencial teórico (Capítulo 2.4.4):

$$Slope' = Slope * \frac{T + 273,15}{25 + 273,15} \quad (17)$$

3.3.2 ECM – Medidor de Condutividade Elétrica (*Electrical Conductivity Meter*)

O modulo para medição de condutividade elétrica em soluções aquosas é referenciado pela sigla ECM (*Electrical Conductivity Meter* – Medidor de condutividade elétrica) e para realizar as aferições é utilizada a sonda **DJS-1E**, que é capaz de operar em temperaturas entre 5 °C e 40 °C e medir valores de entre 1 mS/cm e 20 mS/cm com uma acurácia de aproximadamente 10%.

Figura 49 – Probe DJS-1E.



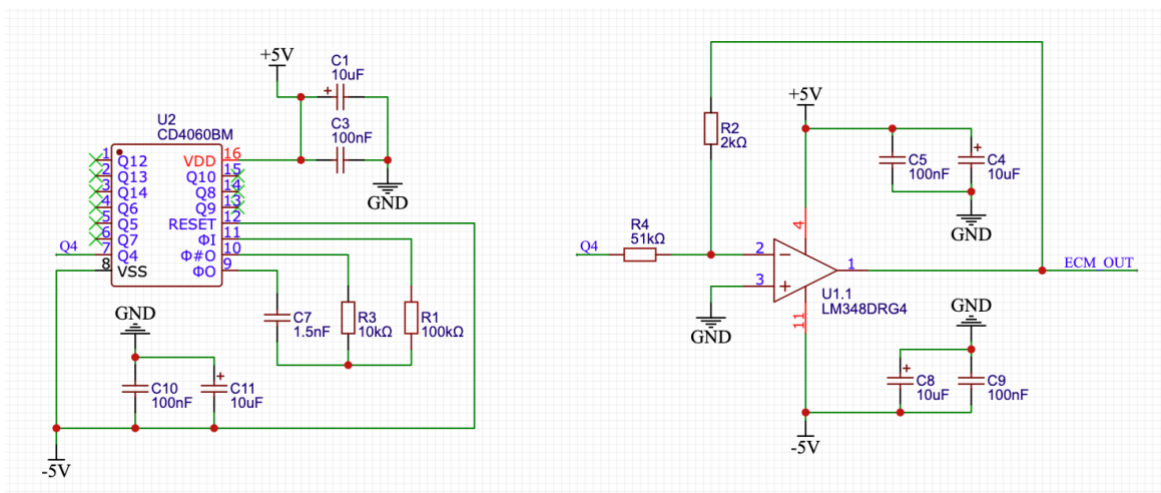
Fonte: DFRobot.

Como dito no referencial teórico (Capítulo 2.4.2), foi necessário um circuito responsável por disparar um sinal alternado, que neste caso, utilizará a frequência 26,6 Hz e amplitude próxima a 0,2 V, por um dos terminais para que então, outro circuito, responsável pela medição de tensão seja capaz de realizar as leituras no outro terminal. Esses valores se baseiam no modulo comercial desenvolvido pela DFRobot.

Na Figura 50 é possível verificar o circuito para geração do sinal, que utiliza o CI “CD4060BM”, um “*Binary Counter/Divider and Oscillator*” (em tradução livre: “Contador/Divisor Binário e Oscilador”) que permite a geração de pulsos com frequência

configurável, por meio de resistores e capacitores, que são enviados para a ponta de prova através de um amplificador (“U1.1”) configurado como inversor de ganho de 1/25.

Figura 50 – Esquema de ligação do circuito gerador de frequência.

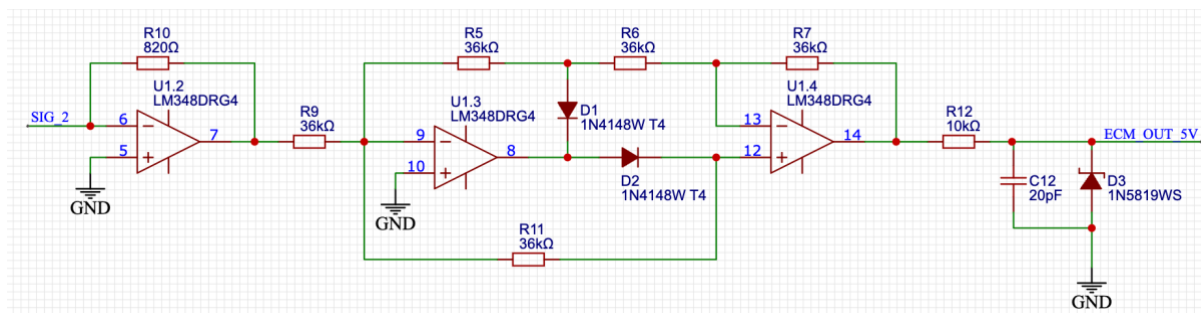


Fonte: Autor (2023).

Visando diminuir os efeitos da polarização gerados pela passagem de corrente elétrica pela água, é utilizado um pulso de baixa tensão. Desta maneira a corrente consumida na etapa de medição é muito próximo a 0, sendo utilizado para isso uma impedância muito alta logo na entrada do circuito de medição da tensão.

O primeiro AMP-OP (“U1.2” ilustrado na Figura 51) realiza a função de impedância de entrada e esta configurado como inversor simétrico com um ganho variável conforme a resistência do meio medido, de modo a se tornar inverso à resistência da água. Em sequência existe um retificador de onda completa de precisão que utiliza 2 AMP-OPS para isso (“U1.3” e “U1.4” também ilustrado na Figura 51).

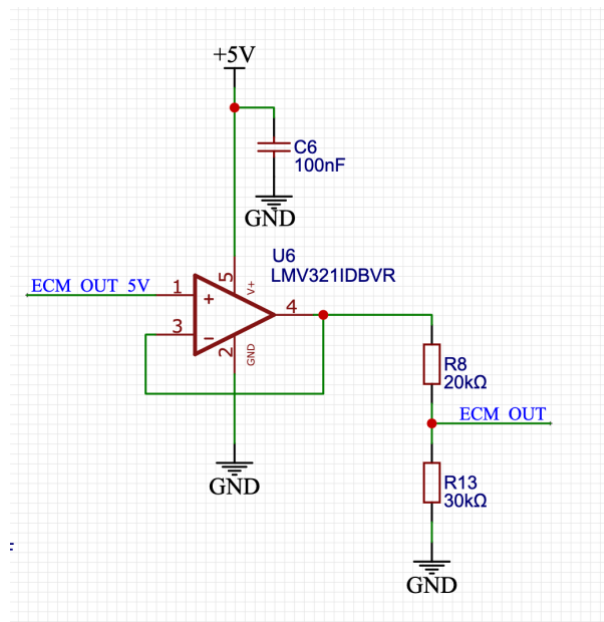
Figura 51 – Esquema para condicionamento de sinal de condutividade.



Fonte: Autor (2023).

Como é possível verificar no diagrama da Figura 50, o amplificador operacional está sendo alimentado com -5 V e $+5\text{ V}$, portanto é possível que a sua saída tenha um valor máximo de mesma amplitude. No entanto, o ESP32-S3 não é capaz de suportar esse nível de tensão. Para realizar a adequação desse sinal de saída do retificador, foi adicionado um AMP-OP em configuração buffer com um divisor resistivo na saída, conforme ilustrado na Figura 52

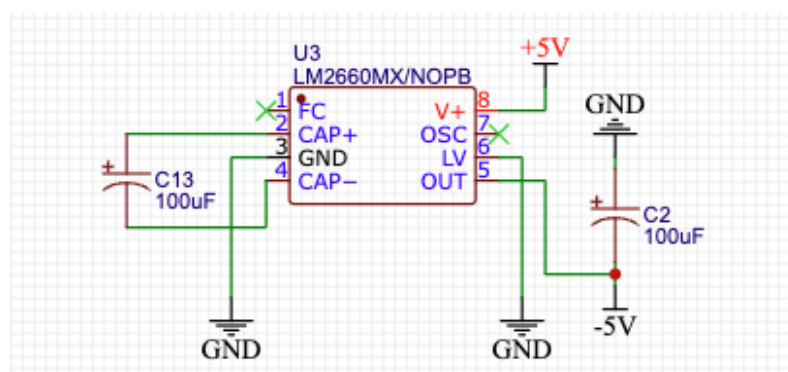
Figura 52 – Circuito para adequação de tensão da ECM.



Fonte: Autor (2023).

Como é transmitido um sinal alternado, os AMP-OP são alimentados por uma fonte simétrica. Para isso foi utilizado o CI “LM2660MX”, um “*Charge Pump Voltage Inverter*” (em tradução livre: “Inversor de Tensão da Bomba de Carga”) que irá criar um sinal de tensão inverso e mesmo módulo.

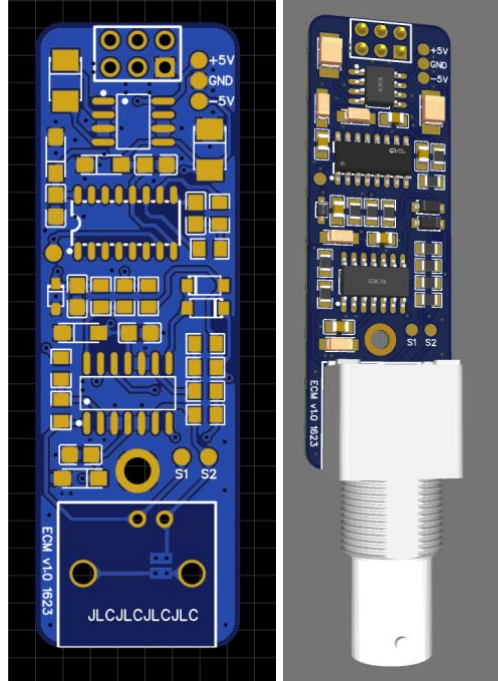
Figura 53 – Esquema de ligação do Charge Pump Voltage.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 54 está ilustrado os modelos 2D e 3D da placa ECM:

Figura 54 – Modelos 2D e 3D da placa ECM.



Fonte: Autor (2023).

Para realizar a conversão do valor de tensão lido para mili Siemens por centímetro (mS/cm) foi utilizada como base a fórmula disponibilizada pela DFRobot em seu repositório de códigos de exemplo.

$$rawEC = 1000 * 1000 * voltage / RES2 / ECREF \quad (18)$$

$$compEC_{low} = EC_{low} * (1 + 0,0185 * (temperature_{low} - 25)) \quad (19)$$

$$K_{low} = RES2 * ECREF * compEC_{low} / 1000 / voltage_{low} \quad (20)$$

$$compEC_{high} = EC_{high} * (1 + 0,0185 * (temperature_{high} - 25)) \quad (21)$$

$$K_{high} = RES2 * ECREF * compEC_{high} / 1000 / voltage_{high} \quad (22)$$

$$P / rawEC * K_{low} \leq 2,5 \rightarrow K = K_{low} \quad (23)$$

$$P/rawEC * K_{low} > 2,5 \rightarrow K = K_{high} \quad (24)$$

$$EC = \frac{rawEC * K}{1 + 0,0185 * (temperatura - 25)} \quad (25)$$

Onde as equações (18), (19), (20), (21) e (22) se referem ao processo de calibragem da sonda de medição. Mais detalhes sobre esse processo serão abordados no capítulo 3.4.2. As constantes *RES2* e *ECREF* são características construtivas da sonda e devem ser informadas pelo fabricante. O coeficiente *K* é determinado conforme a condutividade obtida pela leitura da condutividade “bruta” (*rawEC*), caso ela seja superior a 2,5 então é utilizado uma constante própria para alta condutividade (*K_{high}*), caso contrário é utilizado o coeficiente de baixa condutividade (*K_{low}*).

Esse código foi construído se baseando em um processo de calibração da sonda de medição. Dessa forma, algumas constantes surgiram conforme o nível de condutibilidade da solução medida se alterava, sendo definidos alguns intervalos para melhores resultados por faixas de condutibilidade. A compensação de temperatura para esse caso foi feita logo ao início da fórmula e utiliza a equação descrita na fundamentação teórica (Capítulo 2.4.2.1).

Devido a correção de tensão feita na saída do retificador, o sinal de saída teve seu modulo alterado e deve ser feita uma compensação no cálculo para que a tensão utilizada nos cálculos seja a tensão posterior ao divisor resistivo. Para isso basta realizar a compensação por meio da própria fórmula do divisor resistivo, conforme descrito na equação (26).

$$V_{5V} = V_{3V} * \frac{2000 + 3000}{3000} \quad (26)$$

Uma vez que o valor de condutividade foi corretamente determinado, é possível utilizarmos esse valor para determinar a concentração de sólidos totais dissolvidos (TDS) na solução aquosa. Para isso foi utilizada a equações (27) disponibilizadas pela DFRobot em seu repositório de exemplos. Nela leia-se “*CoefVolt*” como “*CoefficientVoltage*”.

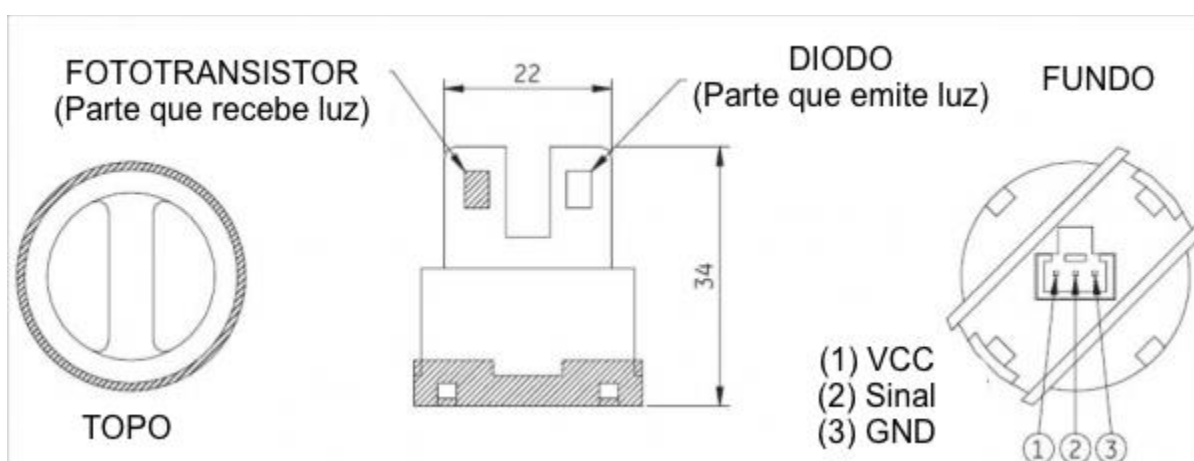
$$tds = \frac{133,42CoefVolt^3 - 255,86CoefVolt^2 + 857,39CoefVolt}{2} \quad (27)$$

3.3.3 TSS – Sólidos Suspensos Totais (*Total Suspended Solids*)

O módulo para medição da concentração de sólidos suspensos em soluções aquosas é referenciado pela sigla TSS (*Total Suspended Solids*). Para realizar as aferições é utilizada a sonda **SEN0189** que é capaz de operar em temperaturas entre 5 °C e 90 °C e medir valores de com uma acurácia de aproximadamente 5%.

Esse sensor opera baseado no método de medição indireta e para isso utiliza um LED infravermelho em conjunto com um fototransistor que irá alterar a tensão de saída conforme a TSS da solução. Eles estarão espaçados por uma distância constante definida pelo encapsulamento do sensor (Figura 55), possuindo 3 terminais, sendo dois deles para alimentação (VCC e GND) e um para medir a tensão do fototransistor.

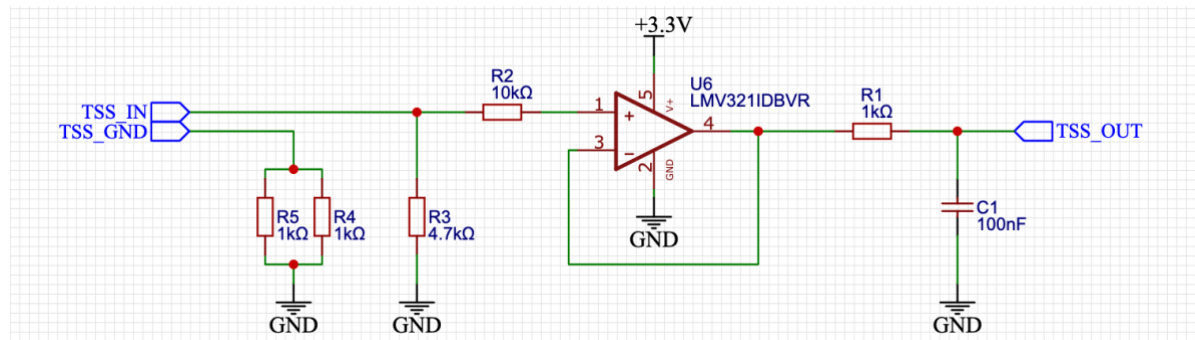
Figura 55 – Encapsulamento SEN0189.



Fonte: KEYESTUDIO (2021).

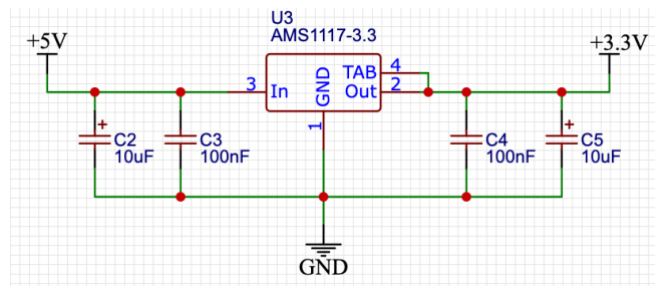
O sinal lido irá variar entre 0 V e +VCC V (tensões de alimentação) e, portanto, não é necessária nenhuma adequação nesse sinal. Para garantir que não haja uma queda de tensão devido ao consumo de corrente no pino de leitura, foi utilizado um AMP-OP na configuração buffer não simétrico, conforme o esquemático da Figura 56. Segundo o fabricante este sensor pode ser alimentado com tensões entre 3 V e 5 V. Como os pinos IO do ESP32-S3 suportam até 3.3 V, foi utilizado um regulador de tensão linear (AMS117) para diminuir a tensão de alimentação do módulo. Esse circuito está ilustrado na Figura 57.

Figura 56 – Esquema de ligação do sensor TSS.



Fonte: Autor (2023).

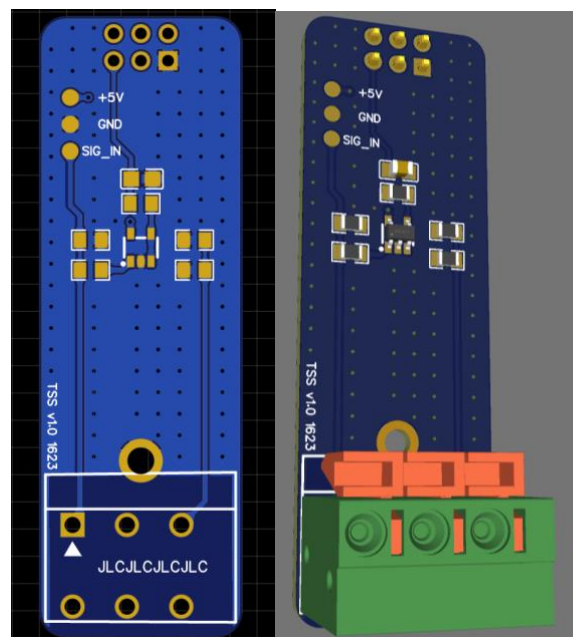
Figura 57 – Circuito de regulação de tensão da TSS.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 58 está ilustrado os modelos 2D e 3D da placa de TSS:

Figura 58 – Modelos 2D e 3D da placa TSS.



Fonte: Autor (2023).

Para converter o valor de tensão para turbidez foi utilizado a fórmula (28) disponível no repositório de exemplos do fabricante DFRobot.

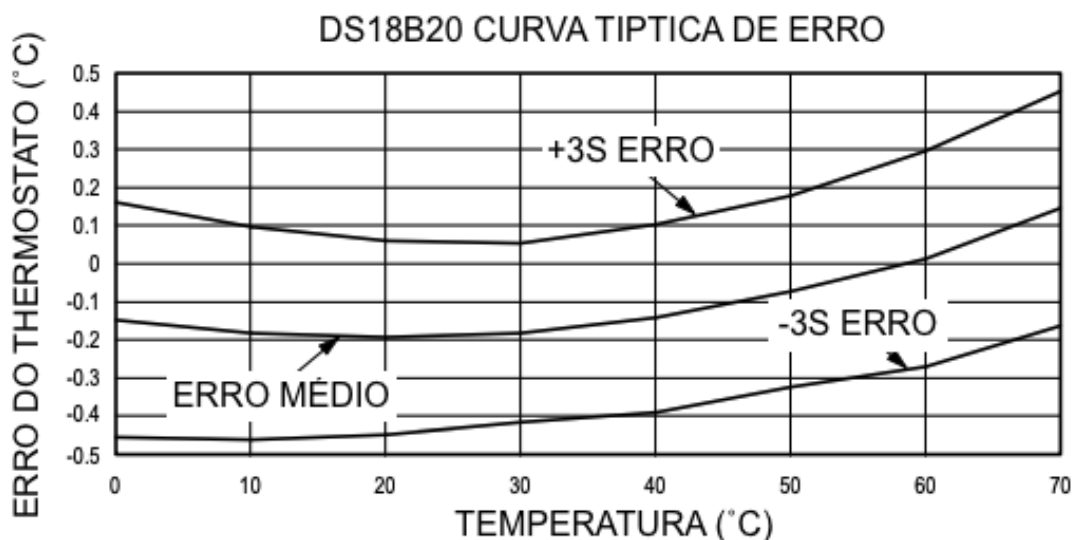
$$TSS = 1120 * 4V^2 + 5742,3 * V - 4352,9 \quad (28)$$

3.3.4 AWT – Temperatura do Ar e Água (*Air and Watter Temperature*)

O modulo para medição de temperatura na solução aquosa e no ar é referenciado pela sigla AWT (*Air and Watter Temperature*). Para isso é utilizado o sensor **DS18B20**, que é capaz de operar em temperaturas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo capaz de medir valores com uma acurácia de aproximadamente 0,5%.

Como pode ser verificado no capítulo 2.4.5, esse sensor obteve uma excelente linearidade nos resultados e uma boa precisão na temperatura média lida. Esse resultado pode ser comprovado ao se analisar o gráfico (Figura 59) de erro (em graus) em função da temperatura lida.

Figura 59 – Curva de performance típica segundo o fabricante.

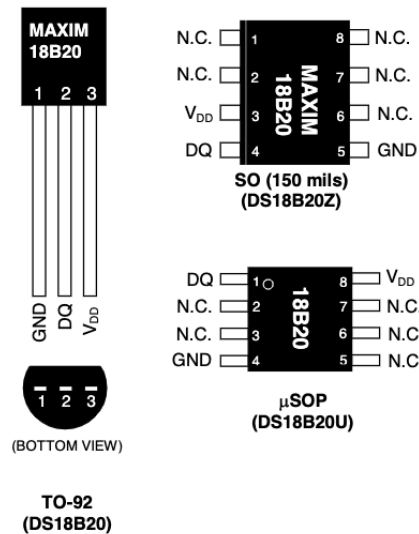


Fonte: MAXIM INTEGRATED (2019, pg. 3).

O DS18B20 é um termômetro digital com capacidade de medir temperaturas na faixa de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ com precisão de $\pm 0,5^{\circ}$ e possui capacidade de banda de 9 a 12 bits por pulso utilizando o protocolo *1-Wire* que permite utilizar um único pino digital para se comunicar com diversos outros sensores DS18B20 (MAXIM INTEGRATED, 2019). Além da capacidade de medir temperatura, este sensor possui também uma memória *EPROM* não volátil

que permite a criação de alarmes programáveis com pontos de disparo de nível superior e inferior, possibilitando a utilização do recurso de interrupções de hardware, quando em conjunto a um microprocessador externo (MAXIM INTEGRATED, 2019). Na Figura 60, está ilustrado o sensor em seus acoplamentos comerciais.

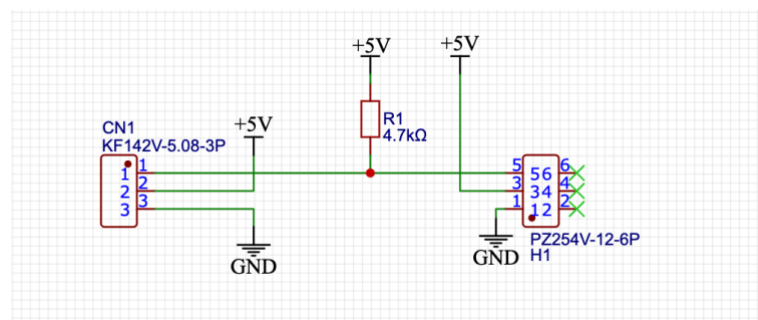
Figura 60 - DS18B20.



Fonte: MAXIM INTEGRATED (2019).

O DS18B20 possui 3 terminais para conexão sendo 2 para alimentação (GND e VCC) e 1 para comunicação. Por ser digital dispensa quaisquer instrumentações eletrônicas sendo recomendado, pelo datasheet, apenas o uso de um resistor *pull-up* no terminal de comunicação. Dessa forma, este módulo é basicamente um “holder” para os conectores do sensor, como pode ser verificado na Figura 61. Não é necessário realizar cálculos ou conversões com os dados obtidos na leitura do sensor.

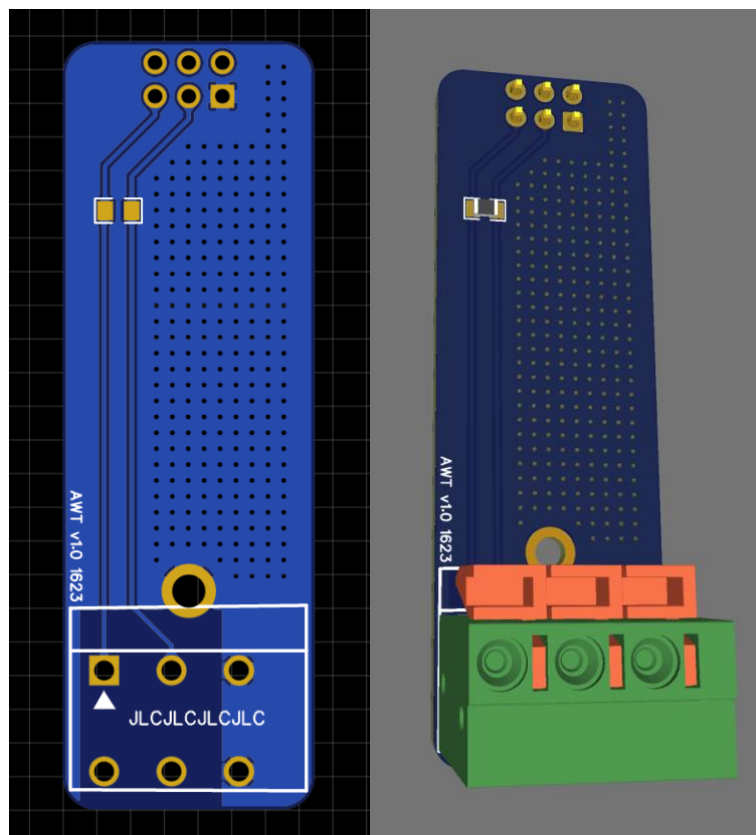
Figura 61 – Esquema de ligação do DS18B20.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 62 estão ilustrados os modelos 2D e 3D do modulo AWT:

Figura 62 – Modelos 2D e 3D da placa AWT.



Fonte: Autor (2023).

3.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

A etapa de calibração dos sensores utilizados neste projeto é sempre necessária, uma vez que os componentes que compõem o circuito de medição não conseguem ser precisamente iguais todas as vezes, e uma vez que, eles estão realizando medidas na casa dos mili-volts, quaisquer alterações já representam um desvio considerável no resultado. Com isso é importante ter em mente que se deve calibrar sempre o conjunto “modulo de leitura” + “sensor” e caso qualquer um deles tenha que ser trocado, a calibração deve ser refeita.

É descrito nos manuais das sondas de condutividade elétrica e pH, que o erro mais comum é o deslocamento do centro de medida. Por exemplo, no caso do PHM, a sonda utilizada pode apontar como pH 8,0 que uma solução totalmente neutra. Isso se deve principalmente ao processo de fabricação da sonda que não consegue alcançar resultados perfeitamente idênticos, no entanto variáveis como tempo e temperatura de armazenamento podem ser considerados.

A solução mais praticada para esses casos é a calibração por meio de 2 pontos referenciais, onde usualmente um está no meio de escala e o outro a 1/4 do início de escala. Para isso são utilizadas solução de valores nominais que normalmente já acompanham a sonda.

Para a execução dessa etapa, foi realizada uma tentativa infrutífera da aquisição, em formato de importação, de kits com soluções previamente preparadas com valores nominais. Como solução alternativa, recorreu-se ao auxílio de professores e colegas do curso de Eng. Agrônômica do campus para auxiliar na fabricação dessas soluções. Foram então fornecidas soluções nutritivas utilizadas na hidroponia para que fosse possível dissolver em água e alcançar os valores desejados. A composição das soluções está descrita na Tabela 10.

Tabela 10 - Composição das soluções nutritivas obtidas.

Solução	Proposito	Potássio (g)	Calcio (g)	Ferro (g)	Água (ml)
01	Alface	66,00	48,00	1,00	1000,00
02	Rúcula	75,00	60,00	1,00	1000,00
02	Tomate cereja	110,00	81,00	1,00	1000,00

Fonte: Autor (2023).

Em posse dessas amostras procedeu-se com a elaboração das soluções que seriam utilizadas nos processos de calibração de cada sensor. Os detalhes desse processo estarão exibidos nos próximos subcapítulos. Somente é necessário calibrar os sensores: PHM, e ECM. O sensor AWT não demandará calibrações devido aos resultados apresentados no capítulo 2.4.5. Já o sensor TSS não dispõe de manuais que indiquem formas de calibração e também não foi possível obter um equipamento comercial para fins de comparação devido a seu alto valor aquisitivo.

3.4.1 Calibração PHM

Foi utilizando como referencial o peagâmetro comercial fabricado pela HM Digital, “PH-80”, que está ilustrado na Figura 63. Ele é composto por um sensor de pH e um sensor de temperatura. O primeiro possui uma escala de 0 – 14 *pH*, com precisão de $\pm 0,2$ *pH* e resolução de 0,1 *pH* e o segundo possui uma escala de 1 – 55 °C com precisão de $\pm 2\%$ e escala de 0,1°C (HM Digital, 2023). Todo esse capítulo tomará como valor correto o valor exibido por esse aparelho.

Figura 63 – Sensor PH-80.



Fonte: HM Digital (2023).

Seguindo os manuais que acompanham a sonda de pH, para realizar a calibração é necessário o uso de duas soluções de valores nominais, sendo, a primeira neutra (*pH* 7,0), e a segunda ácida (*pH* 4,0). Para alcançar esses valores, foi utilizada a solução 01 (para alface) misturada a água de torneira. As proporções estão ilustradas na Tabela 11.

Tabela 11 - Proporções para alcançar as soluções nominais de pH.

Valor nominal (pH)	Solução 01 (ml)	Água (ml)
7,0 (neutro)	1,5	115,0
4,0 (ácido)	65,0	100,0

Fonte: Autor (2023).

Com as soluções devidamente preparadas, iniciou-se o processo de calibração da sonda utilizada neste projeto. Para isso coletou-se os valores de tensão e temperatura lidos pela PHM simultaneamente a medida realizada pelo sensor PH-80. O valor de tensão foi então compensado e utilizado como incógnita da equação (16.1) descrita no subcapítulo 3.3.1.

Após finalizar a calibração, foram refeitas algumas medições, com o propósito de aferir a precisão da PHM comparada ao sensor comercial. Isso resultou na Tabela 12.

Tabela 12 - Quadro comparativo pós calibração PHM.

pH	PH-80		PHM		Delta (ph)
	pH	Temp. (°C)	pH	Temp. (°C)	
7,0 (neutro)	7,0	24,8	6,9	24,81	0,1
4,0 (ácido)	4,0	25,0	4,1	25,19	0,1

Fonte: Autor (2023).

3.4.2 Calibração ECM

Foi utilizando como referencial o condutivímetro comercial fabricado pela HM Digital, “COM-80”, que está ilustrado na Figura 64. Ele é composto por um sensor de pH e um sensor de temperatura, o primeiro possui uma escala de 0 – 9,99 mS/cm , com precisão de $\pm 2\%$ e resolução de 0,1 mS/cm e o segundo possui uma escala de 1 – 80°C com precisão de $\pm 2\%$ e escala de 0,1°C (HM Digital, 2023). Todo esse capítulo tomará como valor correto o exibido por esse aparelho.

Figura 64 – Sensor COM-80.



Fonte: HM Digital (2023).

Seguindo os manuais que acompanham a sonda de condutividade, para realizar a calibração é necessário o uso de duas soluções de valores nominais que determinam qual o coeficiente de compensação. O primeiro é um valor de baixa condutividade (1,41 mS/cm) e o

segundo um valor de alta condutividade ($12,88 \text{ mS/cm}$). No entanto, não é possível alcançar esse valor com o sensor COM-80 já que ele só é capaz de medir até $9,99 \text{ mS/cm}$.

Entretanto, ao verificar o método de calibração do condutivímetro, comercial, verificou-se que o fabricante (HM Digital) recomenda a calibração apenas com a solução de $1,41 \text{ mS/cm}$. Unindo essas duas bibliografias e adaptando um pouco o método de calibração inicial, foram escolhidos os valores de $1,41 \text{ mS/cm}$ e $9,7 \text{ mS/cm}$ para a calibração. Não se escolheu o fundo de escala do outro sensor para evitar perdas de precisão.

Para alcançar esses valores, foi utilizada a solução 01 (para alface) misturada a água de torneira. As proporções estão ilustradas na Tabela 13.

Tabela 13 - Proporções para alcançar as soluções nominais de EC.

Valor nominal (mS/cm)	Solução 01 (ml)	Água (ml)
1,41 (baixa)	1,15	108,0
9,70 (alta)	11,0	86,0

Fonte: Autor (2023).

Com as soluções devidamente preparadas, iniciou-se o processo de calibração da sonda utilizada neste projeto. Para isso coletou-se os valores de tensão e temperatura lidos pelo COM-80 e ligeiramente depois os valores lidos pela ECM. Não se realizou as medições com os dois aparelhos simultaneamente imergidos na solução para evitar que um sensor interfira no outro. O valor de tensão foi então compensado e utilizado como incógnita das equações (19), (20), (21) e (22) descrita no capítulo 3.3.2.

Após finalizar a calibração foram refeitas as medições, com o propósito de aferir a precisão da ECM comparada ao sensor comercial. Foi adicionada uma nova solução de valores arbitrários apenas para fins de complementar o teste. Isso resultou na Tabela 14.

Tabela 14 - Comparativo pós calibração ECM.

Amostra	COM-80		ECM		Delta (EC)
	EC (mS/cm)	Temp. (°C)	EC (mS/cm)	Temp. (°C)	
1	1,424	24,7	1,41	24,75	0,01
2	9,715	24,4	9,66	24,50	0,05
3	8,270	24,8	8,13	25,06	0,14

Fonte: Autor (2023).

Como referenciado no capítulo 2.4.3, a medição de TDS é possível de ser realizada com o ECM aplicando apenas mais uma equação para converter a tensão lida na grandeza desejada. Por tanto foi possível aproveitar-se todos o processo de calibração desse capítulo.

O condutivímetro COM-80 também dispõe dessa funcionalidade e por isso, também, foi utilizado como parâmetro de comparação. Para essa medição, ele possui uma escala de 0 – 5000 ppm (mg/L), com resolução de 0,1 ppm e precisão de $\pm 2\%$.

Após repetir-se os testes com as mesmas 3 amostras utilizadas no teste anterior, obteve-se a Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativo pós calibração TDS.

Amostra	COM-80		ECM		Delta ppm (%)
	TDS (ppm)	Temp. (°C)	TDS (ppm)	Temp. (°C)	
1	718	25,5	717,5	25,50	0,07
2	4821	25,1	4837,69	25,13	0,35
3	4180	24,7	4086,15	24,72	2,25

Fonte: Autor (2023).

3.5 CAIXA DE PROTEÇÃO

Como dito no capítulo 3.1.2, é necessário que exista uma caixa que resista a água para proteger o todo o circuito de medição. Existem 3 possibilidades para que se obtenha uma caixa desse tipo: A primeira opção é mandar fabricar uma de plástico injetado ou semelhante, no entanto essa opção é demasiadamente cara; A segunda é comprar uma caixa pronta feita desse mesmo material, que são usualmente utilizadas por empresas de telecom, e então usina-la para que ela se adapte as placas, o que gera algumas pequenas adaptações técnicas; A terceira opção é realizar a impressão da caixa por meio de uma impressora 3D e realizar um tratamento para impermeabiliza-la.

Neste trabalho, optou-se por seguir o terceiro caminho por apresentar uma caixa esteticamente mais bonita e não custar tanto quanto uma feita de plástico injetado. Para realizar o tratamento impermeabilizante, foi utilizado verniz em spray para recobrir toda a camada externa com um material mais hidrofóbico que o filamento de impressão. Foi utilizado também silicone para vedar as frestas da tampa da caixa.

Na Figura 65 é possível visualizar o modelo 3D desenvolvido. Possui 130x120x65 mm, contando com duas aletas laterais que permite a fixação por meio de parafusos ou lacres de

plástico. A sua montagem foi feita de tal modo que a bateria ficara sob a placa, economizando assim espaço laterais e aproveitando a altura exigida para acomodar os conectores inferiores.

Figura 65 – Modelo 3D da caixa de proteção.



Fonte: Autor (2023).

3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE SOFTWARE

O software que realiza a operação desse sistema, envolve as operações relativas a coleta e disparo de mensagens pela rede de comunicação e é controlado exclusivamente pela MCU. Como não foi utilizado um gateway LoRa comercial, também, será explicada o fluxo de operação do software desenvolvido para esse equipamento.

Para o desenvolvimento de ambos os firmwares, foi utilizado um framework para desenvolvimento de sistemas embarcados de tempo real, o FreeRTOS em conjunto com o Arduino-IDE. O uso dessas tecnologias se deve ao conjunto de ferramentas para criação e gerenciamento de tasks², filas, semáforos, mutexes e demais funções necessárias para a operação de um sistema de tempo real, juntamente a simplicidade proporcionada pelo uso do ambiente do Arduino-IDE que traz funções que simplificam o controle do ESP32-S3, bem como a possibilidade de realizar debugs de forma rápida e prática.

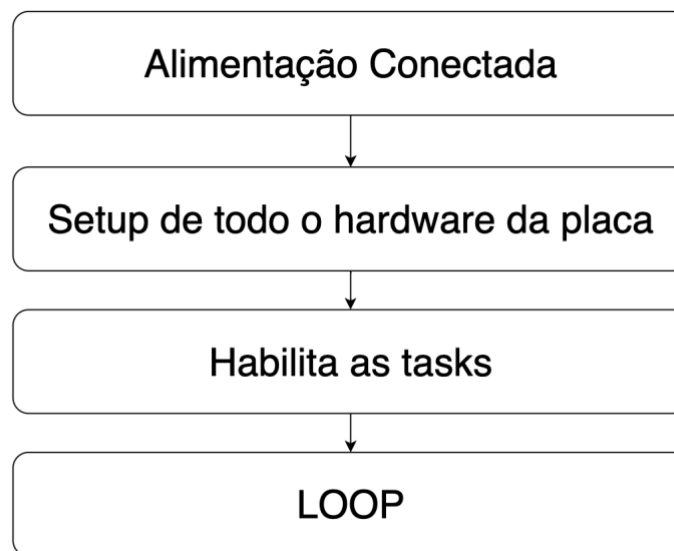
3.6.1 Software da AceLoRa

Na Figura 66 é ilustrado o fluxograma do software que é executado pela AceLora. Ele é iniciado assim que uma fonte de alimentação for conectada, dando sequência imediata ao setup

² Task – Na computação se refere a execução de uma sequência de instruções de propósito específico.

do hardware onde é definido quais IO do ESP32-S3 serão output e input e definirá todos as portas como desligadas, ainda como parte do setup é consultada a NVS do processador para definir qual sensor está em qual porta. Caso não exista nenhuma configuração salva, então a placa entrará no modo de configuração e irá ativar o *access point* com um servidor web integrado para que o operador possa realizar essa configuração. Posteriormente ao setup, são criadas as *tasks* do sistema que terão funções especializadas dentro do contexto de operação da placa, elas estão mais bem explicadas no próximo parágrafo.

Figura 66 – Fluxograma software AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

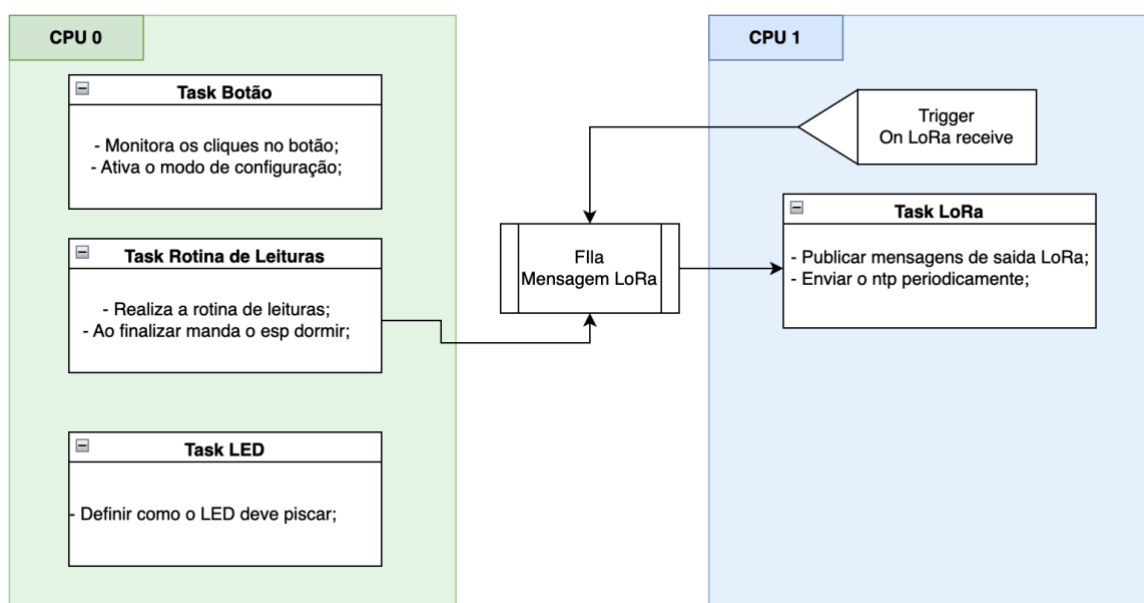
Para o firmware da AceLoRa foram definidas 4 *tasks* que terão responsabilidades específicas dentro do sistema:

- Task “LED”: Responsável por emitir os alertas visuais da placa a partir de uma variável de sistema.
- Task “Botão”: Responsável por monitorar as interações com o botão da placa. A princípio a única atividade disponível por meio do botão é ativar o modo de configuração da placa.
- Task “LoRa”: Responsável por disparar e receber mensagens LoRa.
- Task “Rotina de leituras”: Responsável por realizar a rotina de leitura dos sensores (estará mais bem descrita nos próximos parágrafos).

Como citado anteriormente, o ESP32-S3 conta com duas unidades de processamento central e por tanto podemos realizar atividade efetivamente paralelas. O FreeRTOS permite que sejam criadas *tasks* atribuídas a um determinado processador. Aproveitando-se dessa possibilidade separou-se a *task* responsável pelo LoRa, das demais *tasks*, uma vez que ela deverá estar sempre atenta para processar mensagens recebidas ou que serão disparadas. Na Figura 67 está ilustrado o diagrama de divisão e operação.

Conforme descrito nos manuais do FreeRTOS, as *tasks* devem se comunicar por meio de filas. Neste caso, foi necessária apenas uma fila que irá agrupar as mensagens que devem ser disparadas pelo LoRa. Outro detalhe importante neste diagrama é a presença de um *trigger* (Gatilho em tradução livre) que irá gerar uma interrupção, na CPU1, sempre que uma nova mensagem for recebida no modulo, e assim que lida pelo processador, ela será então adicionada a fila para que a *task* do LoRa possa interpretá-la e então respondê-la conforme necessidade.

Figura 67 – Diagrama de tasks da AceLoRa.

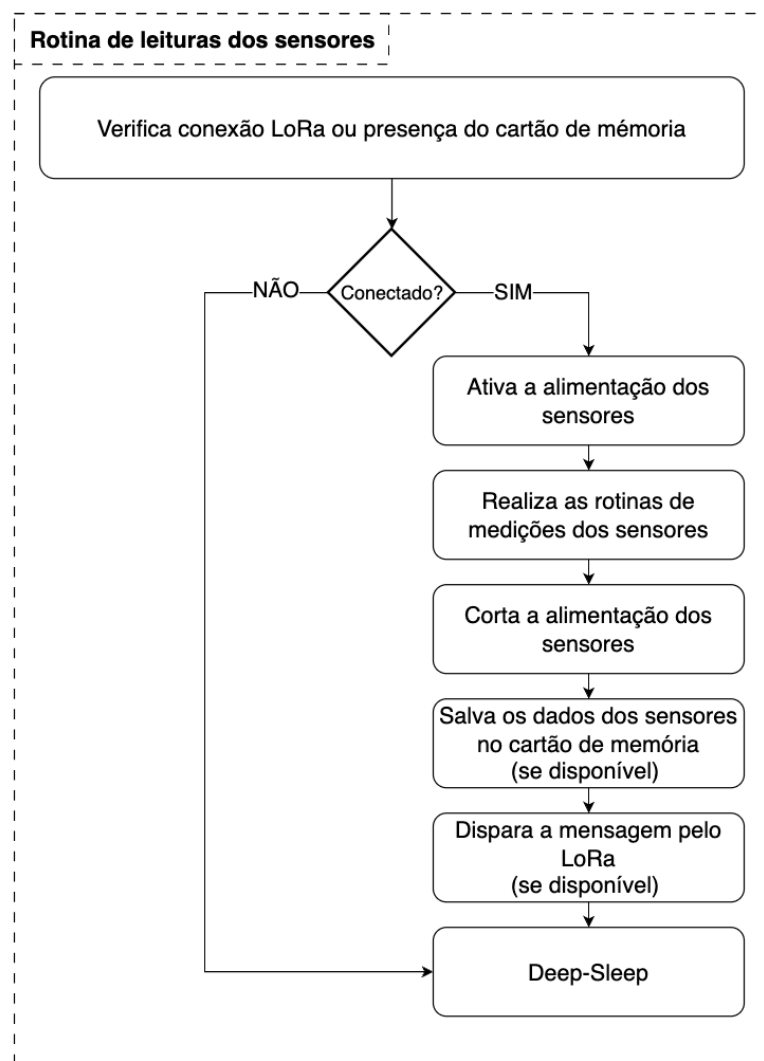


Fonte: Autor (2023).

A rotina de leituras dos sensores está descrita no fluxograma da Figura 68 e consiste em um script que é executado a cada intervalo de tempo pré-configurado. Após iniciado é verificado o estado da conexão ao LoRa ou presença de um cartão de memória. Caso esteja conectado e/ou exista um cartão de memória, irá realizar um loop onde irá ativar a alimentação dos sensores e realizar as devidas rotinas de medições para cada sensores individualmente. Vale

ressaltar que a primeira leitura deverá ser a de temperatura, uma vez que seu valor é usado como parâmetro para os demais valores. Ao finalizar, irá desligá-los para então armazenar e/ou disparar uma mensagem com os dados coletados e, por fim, fará o processador entrar em *deepsleep*. Essa decisão se baseia na filosofia de poupar energia na placa, habilitando os sensores apenas se houver um destino para os dados que serão obtidos e desligando tudo que não será utilizado.

Figura 68 – Fluxograma da rotina de leituras dos sensores.



Fonte: Autor (2023).

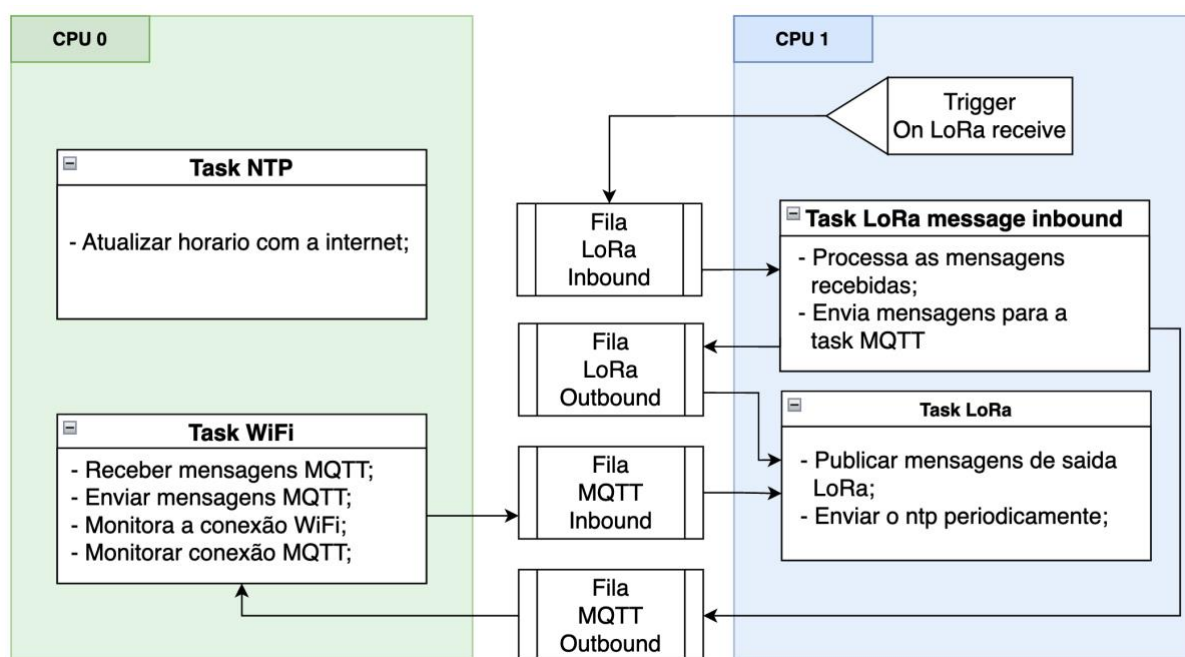
É importante ressaltar que cada sensor possui um script próprio para realizar as medições, podendo alguns conter tempo de estabilização do sinal, medições mais lentas ou necessidade de multi-amostragem. Portanto, cada sensor tem sua própria função de medição e o fluxo somente seguirá para as próximas etapas após coletar os dados de todos os sensores.

3.6.2 Software da Gateway AceLoRa

Muito dos conceitos aplicados ao firmware da AceLoRa foram replicados neste código, no entanto aqui não existirá a questão dos sensores e teremos a adição da comunicação com o servidor MQTT. Na Figura 69 está ilustrado o diagrama de tasks da Gateway, nele podemos verificar que também houve a divisão de task entre os núcleos de processador, neste caso, em um dos núcleos existem apenas tasks que utilizam o WiFi e no outro apenas tasks que utilizam o LoRa.

Para garantir a comunicação efetiva entre as tasks, foram criadas 4 filas, sendo duas delas para LoRa e duas delas para MQTT. Cada par de fila possui uma dedicada a *Inbound* (entrada de mensagem) e *Outbound* (saída de mensagem). Devido a essa estrutura existe uma garantia maior do recebimento e envio de pacotes, uma vez que se torna possível priorizar o recebimento e ir armazenando as saídas até o momento que seja possível enviar.

Figura 69 – Diagrama de tasks Gateway AceLoRa.



Fonte: Autor (2023).

Como é possível observar no diagrama, a *task* “LoRa Inbound” é responsável por decidir se o pacote recebido deve ser enviado via MQTT ou via LoRa. Deve-se isto ao fato de alguns pacotes servirem apenas para comunicação interna da rede LoRa. Por exemplo é possível citar as mensagens para informar o horário correto e o “ping-pong” (termo usado para

referenciar uma mensagem que verifica se o outro lado da comunicação ainda está ativo, no caso disparando um ping e esperando obter uma resposta pong).

3.6.3 Formato das mensagens

As mensagens são armazenadas em formato CSV (*Comma Separated Value*) e disparadas utilizando o formato JSON (*JavaScript Object Notation*). A estrutura em CSV está ilustrada na Figura 70 e a estrutura JSON ilustrada na Figura 71. Para ambos os casos, a descrição está na Tabela 16.

Figura 70 – Estrutura utilizada no CSV.

```
1 timestamp;ecm;tds;tss;awt;rssi;battery;solar\n
2 1701146174;10;10;10;10;-1;7.5;0\n
```

Fonte: Autor (2023).

Figura 71 – Estrutura utilizada no JSON.

```
1 {
2   "PHM" : 7,
3   "ECM": 10,
4   "TDS": 30,
5   "TSS": 15,
6   "AWT": {
7     "air": 25,
8     "water": 23
9   },
10  "timestamp": 1685468251,
11  "rssi": -1,
12  "battery": 7.5,
13  "solar": 0
14 }
```

Fonte: Autor (2023).

Tabela 16 - Descrição dos campos utilizados no JSON.

Campo	Descrição
PHM	Valor lido de pH
ECM	Valor lido de condutividade
TDS	Valor lido dos sólidos totais dissolvidos
TSS	Valor lido dos sólidos totais suspensos
AWT	Temperatura da água e do ar
timestamp	Quando ocorreu a leitura
rsi	Nível de sinal no momento da leitura
battery	Tensão da bateria no momento da leitura
solar	Tensão do painel solar no momento da leitura

Fonte: Autor (2023).

3.6.4 Interface para ajuste de parâmetros

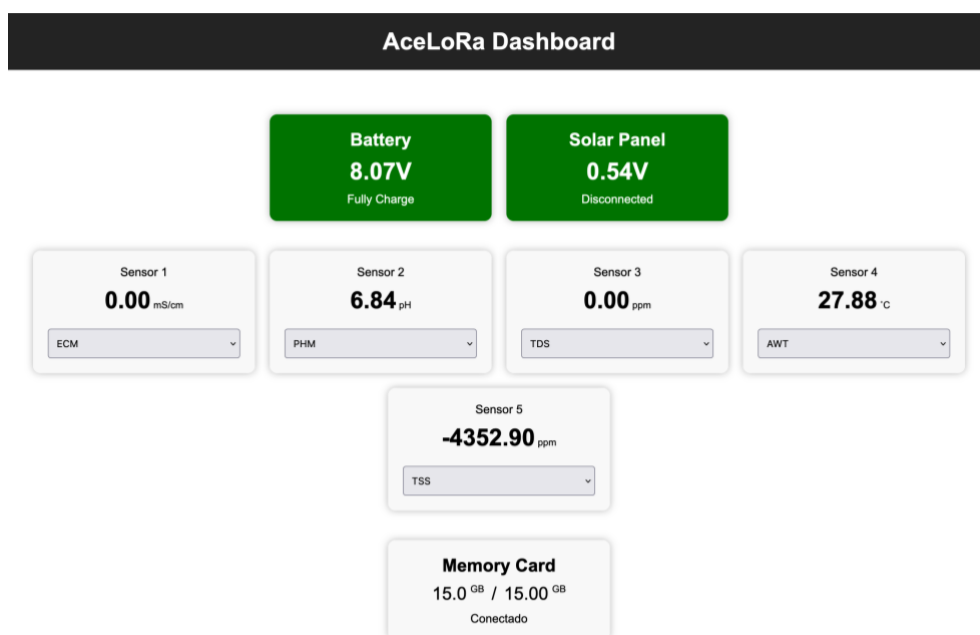
O sistema contará com uma interface WEB para ajustar parâmetros de operação da AceLoRa e pode ser acessado através do *access point* local criado pela placa. Essa interface foi construída utilizando as linguagens de marcação HTML e CSS e a linguagem de programação JavaScript. Pode ser acessada unicamente quando conectada ao *access point* e permitirá ao operador definir quais são os sensores conectados a placa central e em quais portas eles estão. Também é possível visualizar em tempo real os valores lidos pelos sensores, bem como a tensão da bateria/painel solar e a memória livre no cartão micro SD.

Essa interface somente é disponibilizada para a placa em duas situações: Quando a placa nunca houver sido configurada (quando for nova) ou quando o operador, por quaisquer motivos desejar acessá-la, pode fazer isso por meio de um botão físico disponível na placa central.

Ela possui apenas uma página e pode ser acessada por *desktop* ou *smartphones*. Para isso bastará que o usuário se conecte a placa via WiFi e então acesse o endereço “*acelora.local*” em seu navegador de internet.

Na Figura 72 está ilustrada a tela em sua visualização por meio de um *desktop*.

Figura 72 – Interface de configuração da AceLora.



Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado da etapa 2 do trabalho de conclusão de curso foi obtido um protótipo funcional que cumpre os objetivos desejados de prover uma ferramenta que permita superar o desafio do monitoramento constante em hortas hidropônicas, com flexibilidade e dispensando grandes adaptações no ambiente de instalação.

Nessa etapa do trabalho é possível demonstrar o protótipo montado em sua case de proteção com todos os sensores e conectores externos devidamente acomodados, estando ilustrado na Figura 73 e Figura 74.

Figura 73 – AceLoRa montada em sua caixa de proteção.

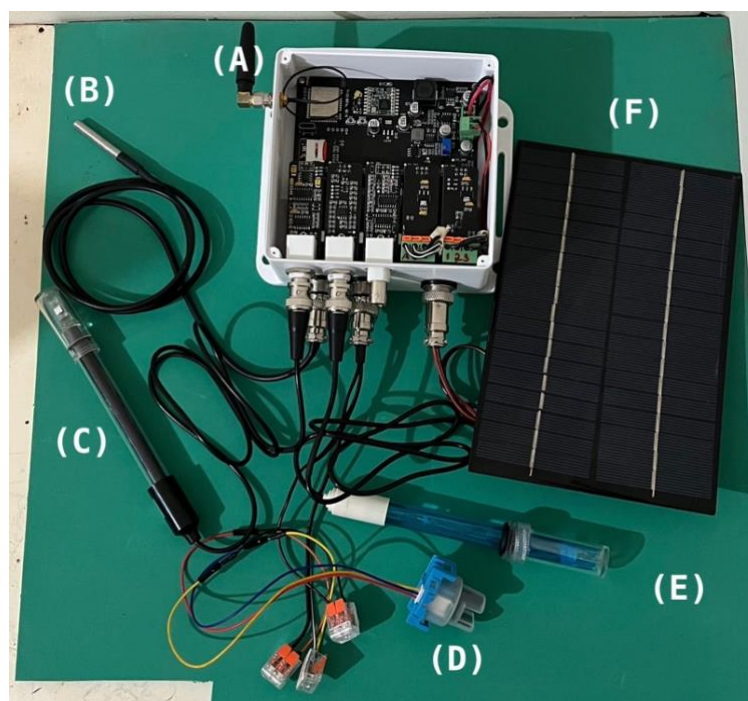


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 74 está ilustrado a AceLora juntamente com todos os acessórios necessários para realizar a instalação. A seguir estão listados todos os elementos presentes na figura:

- A. AceLoRa em sua caixa de proteção;
- B. Sonda do sensor AWT;
- C. Sonda do sensor ECM;
- D. Sonda do sensor TSS;
- E. Sonda do sensor PHM;
- F. Painel fotovoltaico utilizado;

Figura 74 – AceLora montada em sua caixa de proteção e com seus sensores conectados.



Fonte: Autor (2023).

4.1 DESEMPENHO GERAL

Os resultados obtidos por meio dos testes de calibração realizados e descritos no capítulo 3.4, demonstraram uma boa exatidão quando comparados à um equipamento comercial. Com o intuito de avaliar o comportamento do protótipo instalado em um ambiente real, foi realizado um teste na estufa hidropônica do IFTO campus palmas, no período de 5 dias (do dia 20/11/2023 ao dia 24/11/2023). Durante esse período o protótipo foi novamente comparado ao sensor comercial para reafirmar os resultados, que estão expostos no capítulo 4.1.1.

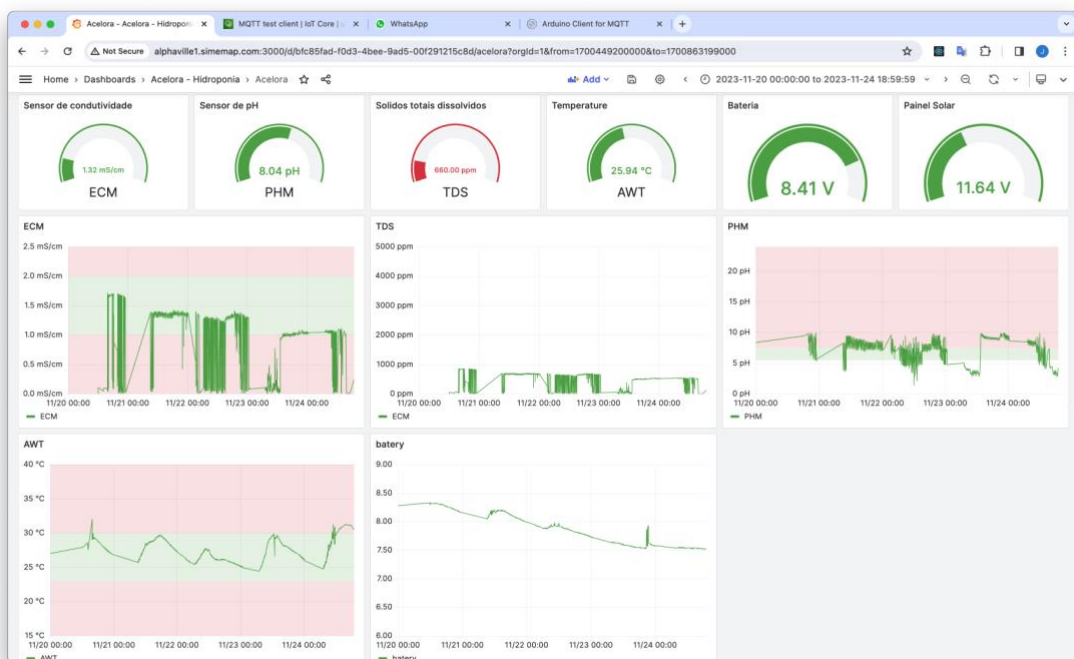
Algumas dificuldades foram encontradas devido ao local de instalação, como dito na introdução deste trabalho, os sinais de comunicação e alimentação são complicados nesses ambientes. Para realizar a comunicação do gateway LoRa foi utilizado um modem 4G. No entanto, o sinal de celular também não estava satisfatório e apresentava oscilações na comunicação. Já no caso da alimentação, apesar de o sistema não demandar energia no local de instalação, era necessário que o painel solar fosse fixado em um local que fosse irradiado pelo sol. Entretanto durante o período de testes o teto da estufa estava em reforma e por tanto não foi possível fixá-lo em um local seguro.

Apesar das complicações apresentadas, os testes puderam ser conduzidos de forma efetiva, apesar de a AceLoRa não estar sendo alimentada pelo painel solar, a bateria foi capaz de suportar todo o período de testes com uma relativa folga para mais dias de teste.

4.1.1 Medições realizadas em campo

Para realizar a comparação dos dados, uma vez por dia, foi realizada uma medição manual da solução monitorada. Esses valores foram então comparados aos valores disponibilizados no dashboard montado com o auxílio da ferramenta Grafana e que está ilustrado na Figura 75. O resultado do comparativo está ilustrado na Tabela 17.

Figura 75 – Dashboard Grafana.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 - Comparativo das medições realizadas em campo.

Data e Horário	Comercial			AceLoRa		
	pH	EC	temp	pH	EC	temp
21/11/2023 15:40	6,4	1,2	28,0	7,0	1,4	29,2
22/11/2023 09:24	4,3	1,7	27,3	4,7	1,3	26,9
23/11/2023 13:20	6,0	1,4	30,2	5,6	1,0	29,4
24/11/2023 14:30	5,2	1,7	30,2	4,2	1,1	29,1

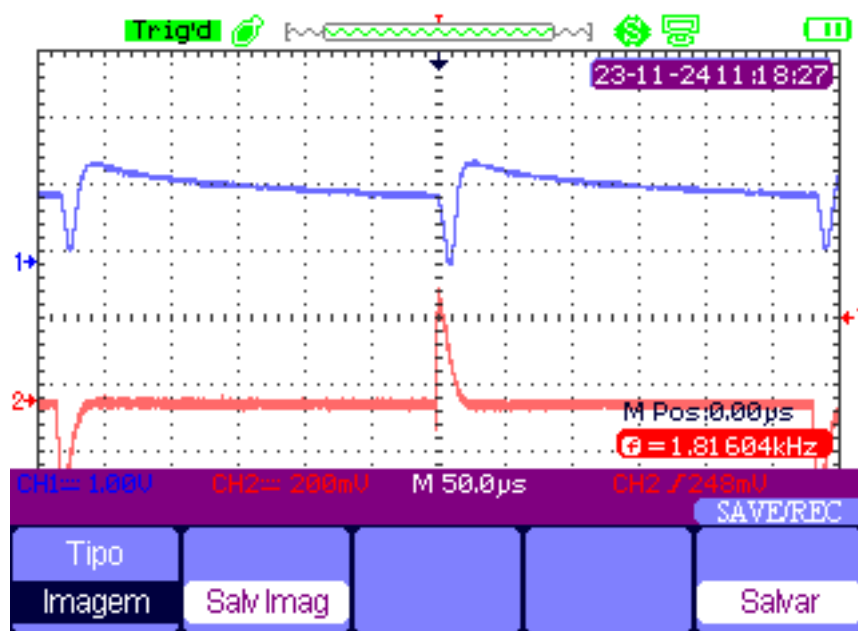
Fonte: Autor (2023).

4.1.2 Características indesejadas na instrumentação dos sensores

Durante o uso dos sensores ECM e PHM foram notas algumas características de sua operação que são indesejáveis e exigem cuidados maiores no processo de realizar uma medição.

No caso do ECM, percebeu-se que o circuito do retificador de precisão apresenta um baixo nível de resposta ao “impulso” e que seu filtro LC de saída não é tão eficiente. O efeito desses problemas na leitura pelo MCU é a presença de dentes e rampas no sinal, como ilustrado na Figura 76, onde a linha azul (canal 1) representa o sinal de saída do módulo, e a linha vermelha (canal 2) representa o sinal de retorno da sonda de medição.

Figura 76 – Captura do sinal da ECM.

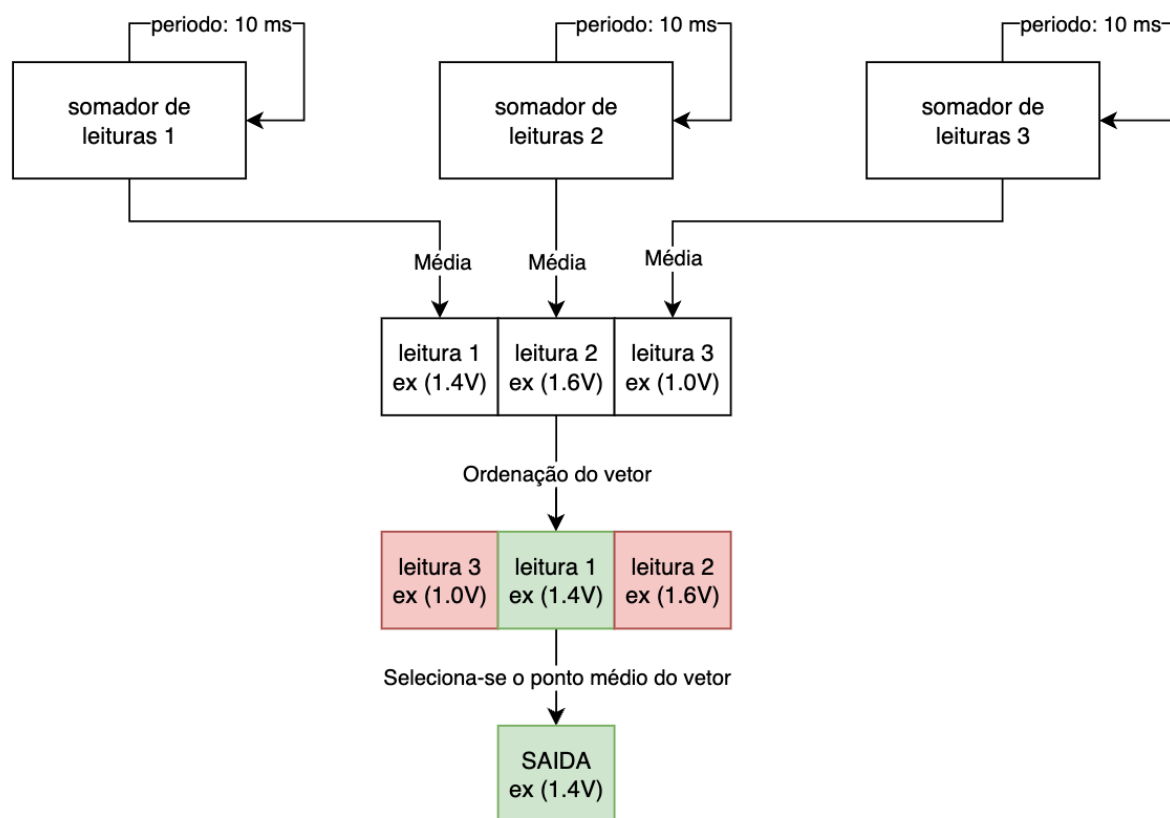


Fonte: Autor (2023).

O comportamento apresentado não é necessariamente uma falha ou erro do sensor. Sendo, apenas, uma característica que apresenta um sinal descontínuo em sua saída. Ele pode ser corrigido a nível de hardware através do uso de um filtro LC ou otimização do retificador presente no módulo.

No entanto a solução utilizada neste trabalho foi um filtro a nível de software que está diagramado na Figura 77. Ele obtém a média da somatória da leitura de 3 intervalos consecutivos, cada um com duração de 10 *ms*, que são então ordenadas de forma crescente para enfim selecionar o ponto central e descartado os demais. A intenção com isso é pegar apenas o meio do sinal que apresente o melhor valor médio.

Figura 77 – Fluxograma do filtro de software da ECM.



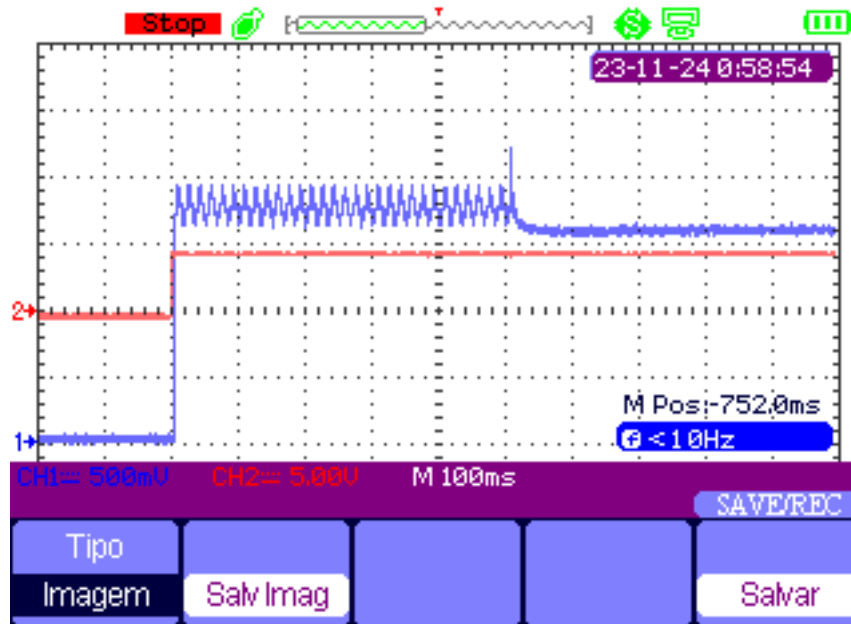
Fonte: Autor (2023).

Não são necessariamente erros ou falhas do dispositivo de medição, mas sim pontos que poderiam ser melhorados por meio do circuito eletrônico.

Já no caso do PHM detectou-se que há um período durante a energização do módulo que apresenta um ruído que compromete as leituras realizadas nesse momento. Na Figura 78 está ilustrado o sinal de saída capturado no módulo, em que, a linha azul (canal 1) representa o sinal

de saída par leituras no MCU, e a linha vermelha (canal 2) representa o sinal de alimentação (VCC) do módulo.

Figura 78 – Captura do sinal da PHM.



Fonte: Autor (2023).

Pode ser verificado que o período de ruído tem duração de cerca de 550 *ms*, e para realizar a correção basta adicionar esse mesmo tempo em um delay antes de realizar a primeira leitura do mesmo.

4.2 CONSUMO DO SISTEMA

Para aferir o consumo do sistema foi utilizado o multímetro UT136B+ fabricado pela UNI-T e que possui precisão de $\pm 1\%$ na faixa de 0A ~ 10A. Foram executados testes usando a alimentação da bateria e de uma fonte externa que substitui o painel solar durante os testes. Foram simulados os principais cenários de consumo que a AceLoRa pode se encontrar. Os resultados estão ilustrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Consumos da AceLoRa.

Modo	Consumo (A)
Ligado: ESP + Sensores + SD + LoRa	0,044
Desligado: WiFi	
Ligado: Sensores	0,043
Desligado: SD + LoRa + WiFi	
Ligado: ESP	0,030
Desligado: Sensores + SD + LoRa + WiFi	
Ligado: NA	0,002
Desligado: ESP + Sensores + SD + LoRa + WiFi	
Ligado: ESP + Sensores + WiFi; (modo de configuração)	0,085
Desligado: LoRa + SD	
Ligado: ESP + LoRa + Sensores + SD; (envio a cada 250ms)	0,108
Desligado: WiFi	

Fonte: Autor (2023).

Foi utilizada uma bateria de 5200 mAh montada na configuração 2S2P, e com base no consumo de 0,108 A, pode-se estimar a duração da bateria em uso contínuo (sem a função sleep) com a equação (29). Caso seja considerado um tempo de sleep em 1 minuto, pode-se considerar a equação (30).

$$\frac{5200 \text{ mAh}}{108 \text{ mA}} = 48,14 \text{ hrs} = 2 \text{ dias} \quad (29)$$

$$\frac{5200 \text{ mAh}}{\frac{108 \text{ mA} * 0,250 \text{ s} + 2 \text{ mA} * 60 \text{ s}}{0,250 \text{ s} + 60 \text{ s}}} = 2131,3 \text{ hrs} = 88 \text{ dias} \quad (30)$$

No ambiente real, muitas variações no consumo e durabilidade podem ocorrer, fatores ambientais como variação térmica e humidade não poderão ser desconsiderados. Nos testes práticos realizados, a bateria foi inicialmente colocada a plena carga, apresentando tensão terminal de 8,3 V e ao final de 5 dias de uso sua tensão caiu para 7,52 V. O limite de tensão para o uso da bateria é em torno de 7,2 V.

4.3 CUSTOS DE HARDWARE

O custo total para montar uma unidade da AceLoRa com os 4 sensores abordados nesse trabalho totaliza U\$92,05 (valores consultados em 27 de maio de 2023) (cerca de R\$459,00 na cotação do dia 27 de maio de 2023). Os custos detalhados que estão descritos nas tabelas a seguir, demonstram o grande peso que as sondas de medição possuem sobre o valor do modulo e representam uma média de 60% do custo total do dispositivo. No caso da AceLoRa, podemos ver o mesmo cenário para as baterias que custam mais que 50% do valor total do dispositivo.

Para realizar a aquisição dos componentes é necessário adquirir quantidades mínimas de alguns componentes, por muitas vezes beirando a centenas de unidades (mesmo que seja usado apenas um na placa). Dito isso, o custo global do projeto totaliza U\$228,47 (valor consultado em 28 de novembro de 2023) (cerca de R\$1.118,82 na cotação do dia 28 de novembro de 2023). Sendo U\$76,16 referentes a PCBs e Stencils; U\$92,31 de componentes (resistores, capacitores etc.); E U\$50,00 para sondas de medição. Os valores citados incluem fretes e taxas alfandegarias.

Tabela 19 – Custos de uma unidade da ECM.

Fornecedor	Item	Qnt.	Custo	Peso
LCSC	resistores	11	\$ 0,25	1%
LCSC	capacitores	12	\$ 0,95	3%
LCSC	diodos	3	\$ 0,04	0%
LCSC	conectores	2	\$ 1,45	5%
LCSC	CD4060BM	1	\$ 0,37	1%
LCSC	LM2660MX/NOPB	1	\$ 1,23	4%
LCSC	LM348DRG4	1	\$ 0,30	1%
ALIEXPRESS	Sonda EC	1	\$ 22,00	79%
JLCPCB	PCB	1	\$ 1,30	5%
TOTAL		33	\$ 27,87	100%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 20 – Custos de uma unidade da AceLoRa.

Fornecedor	Item	Qnt.	Custo	Peso
LCSC	resistores	44	\$ 0,31	1%
LCSC	capacitores	20	\$ 0,56	1%
LCSC	indutores	2	\$ 0,34	1%
LCSC	LEDs	2	\$ 0,04	0%
LCSC	transistores	15	\$ 1,21	3%
LCSC	diodos	3	\$ 0,19	1%
LCSC	fusíveis	2	\$ 0,20	1%
LCSC	botões	2	\$ 0,07	0%
LCSC	conectores	10	\$ 1,12	3%
LCSC	ESP32-S3-WROOM-1-N8	1	\$ 3,89	10%
ALIEXPRESS	LORA RF96 REV:1.2	1	\$ 4,06	11%
LCSC	AMS1117-3.3	1	\$ 0,14	0%
LCSC	CN3795	1	\$ 0,81	2%
LCSC	LMS33460	1	\$ 0,44	1%
LCSC	TX4138	1	\$ 0,65	2%
ML	Bateria	1	\$ 20,00	53%
ML	Painel Solar	1	\$ 2,20	6%
JLCPCB	PCB	1	\$ 1,30	3%
TOTAL		109	\$ 37,53	100%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 21 – Custos de uma unidade da PHM.

Fornecedor	Item	Qnt.	Custo	Peso
LCSC	resistores	10	\$ 0,99	6%
LCSC	capacitores	12	\$ 0,08	1%
LCSC	conectores	2	\$ 1,45	9%
LCSC	regulador de tensão	1	\$ 0,03	0%
LCSC	TLV431AIDBZR	1	\$ 0,27	2%
LCSC	XC6206P302MR_C479054	1	\$ 0,03	0%
LCSC	LMC6482AIMX/NOPB	1	\$ 1,50	10%
ALIEXPRESS	Sonda pH	1	\$ 10,00	64%
JLCPCB	PCB	1	\$ 1,30	8%
TOTAL		30	\$ 15,65	100%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 22 – Custos de uma unidade da TSS.

Fornecedor	Item	Qnt.	Custo	Peso
LCSC	resistores	5	\$ 0,53	6%
LCSC	capacitores	1	\$ 0,00	0%
LCSC	conectores	2	\$ 0,29	4%
LCSC	LMV321IDBVR	1	\$ 0,14	2%
ALIEXPRESS	Sonda TSS	1	\$ 6,00	73%
JLCPCB	PCB	1	\$ 1,30	16%
TOTAL		11	\$ 8,27	100%

Fonte: Autor (2023).

Tabela 23 – Custos de uma unidade da AWT.

Fornecedor	Item	Qnt.	Custo	Peso
LCSC	resistores	1	\$ 0,14	5%
LCSC	Conectores	2	\$ 0,29	11%
ALIEXPRESS	DS18B20	2	\$ 1,00	37%
JLCPCB	PCB	1	\$ 1,30	48%
TOTAL		6	\$ 2,73	100%

Fonte: Autor (2023).

5 CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido funcionou conforme esperado e apresentou uma precisão satisfatória quando comparado a sensores comerciais. O conjunto de softwares que compõem a solução apresentaram um desempenho igualmente satisfatório e devido a sua estruturação baseada em sistemas de tempo real, apresenta uma maior robustez e garantia de comunicação.

É válido um destaque especial para a adoção de sensores modulares e intercambiáveis, essa decisão de projeto trouxe boas vantagens para o desenvolvimento do protótipo, devido a mitigação de erros durante o design dos sensores. Uma vez que são independentes, caso apenas um esteja errado, apenas esse será eliminado e corrigido em uma nova versão. Já em um olhar como produto acabado, essa escolha também amplia muito o horizonte de possibilidade de expansão, permitindo que novos sensores sejam utilizados e livremente operados já que não existem portas específicas para cada sensor e que basta informar ao sistema qual sensor está em qual porta física, por meio de uma interface simples de configuração do próprio dispositivo.

O produto deste trabalho tem potencial e pode se transformar em um produto comercial com algumas adaptações. Este projeto poderá, também, servir de base para aprendizado, inspiração e ponto de partida para o desenvolvimento de outros trabalhos acadêmicos ou comerciais, que poderão tanto utilizá-lo como ferramenta de coleta de dados como também permitirá o desenvolvimento de novos módulos e melhorias no hardware e software do dispositivo.

6 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Assim como todo projeto, este também possui margem para aprimorar e melhorar o seu desempenho. Por tanto, segue uma lista com os principais pontos para trabalhos futuros:

- Utilizar um gateway LoRa-WAN;
- Aplicar filtros que estabilizem ainda mais os sensores analógicos;
- Desenvolver suportes flutuantes para os sensores que ficarão em contato com a água.
- Desenvolver uma nova caixa que proteja também os conectores da humidade do ambiente, deixando para fora apenas o fio do sensor.
- Incluir um RTC na placa central AceLoRA.
- Adicionar modos de calibragem ao firmware da AceLoRa.

REFERÊNCIAS

AGROWTEK. **Hydroponics Water Sensors: SXH Hydroponics Nutrient / pH Monitor & Controller with Probes.** Agrowtek. Disponível em: <<https://www.agrowtek.com/index.php/products/sensors/hydro-sensors/sxh-ph-ec-temp-hydroponics-sensor-14-detail>>. Acesso em: 16 maio 2023.

ALIEXPRESS. **AliExpress.** AliExpress. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/>>. Acesso em: 31 maio 2023.

AMICUS. **Amicus Engineering Pte Ltd.** Amicus. Disponível em: <<http://amicus.com.sg>>. Acesso em: 15 maio 2023.

ANDRIOLO, J. L. Fisiologia da produção de hortaliças em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 18, n. 1, p. 26–33, 2000.

ANDRIOLO, Jerônimo L.; LUZ, Gean L. da; GIRALDI, Caroline; *et al.* Cultivo hidropônico da alface empregando substratos: uma alternativa a NFT? **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 4, p. 794–798, 2004.

ARAÚJO, Gabriel Bento. **Automatização do sistema de cultivo de alface hidropônica em NFT com o uso do Arduino.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021. Disponível em: <<https://bdm.ufpa.br:8443/jspui/handle/prefix/3932>>. Acesso em: 1 maio 2023.

BOTLAND. Gravity - pH analog sensor/meter V2 - DFRobot Botland - Robotic Shop. Disponível em: <<https://botland.store/gravity-temperature-sensors/15094-gravity-ph-analog-sensormeter-v2-dfrobot-sen0161-v2-5904422342920.html>>. Acesso em: 31 maio 2023.

CANAL DO HORTICULTOR. Conheça 5 sistemas dinâmicos para o cultivo hidropônico. Disponível em: <<https://canaldohorticultor.com.br/conheca-5-sistemas-dinamicos-para-o-cultivo-hidroponico>>. Acesso em: 18 maio 2023.

CHAUDHARI, Bharat S.; ZENNARO, Marco ; BORKAR, Suresh. LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. **Future Internet**, v. 12, n. 3, p. 46, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1999-5903/12/3/46>>. Acesso em: 23 maio 2023.

DELGADO, Diego. Equipos para monitoreo y control en cultivos hidropónicos. *In*: **Hanna Instruments.** Colombia: Hanna Instruments, 2016. Disponível em: <https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2021/04/Equipos_para_monitoreo_y_control_en_cultivos_hidroponicos.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

DFROBOT. **Analog_EC_Meter_SKU_DFR0300-DFRobot.** wiki.dfrobot.com. Disponível em: <https://wiki.dfrobot.com/Analog_EC_Meter_SKU_DFR0300>. Acesso em: 1 jan. 2023.

DFROBOT. **Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2-DFRobot.** wiki.dfrobot.com. Disponível em: <https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2>. Acesso em: 1 jan. 2023.

DFROBOT. **Gravity__Analog_TDS_Sensor__Meter_For_Arduino_SKU__SEN0244-DFRobot.** wiki.dfrobot.com. Disponível em: <https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_TDS_Sensor__Meter_For_Arduino_SKU_SEN0244>. Acesso em: 1 jan. 2023.

DFROBOT. **Turbidity_sensor_SKU__SEN0189-DFRobot.** wiki.dfrobot.com. Disponível em: <https://wiki.dfrobot.com/Turbidity_sensor_SKU__SEN0189>. Acesso em: jan. 1DC.

DO VAL, Amélia M. G.; DOMINGUES, Rosana Z. ; MATENCIO, Tulio. **Unidade V Condutividade elétrica em soluções iônicas.** Minas Gerais: Curso de Química, Modalidade Ensino a Distância, UFMG, 2013. Disponível em: <https://www.ufjf.br/quimicaead/files/2013/09/FQ_II_Condutividade.pdf>. Acesso em: 1 maio 2023.

EGROWR. **Egrowr - Connected hydroponic measuring device.** EGrowr. Disponível em: <<https://egrowr.com/>>. Acesso em: 31 maio 2023.

EL HOLANDÉS PICANTE. **Guía de aeroponía para principiantes.** Disponível em: <<https://elholandespicante.com/guia-de-aeroponia-para-principiantes/>>. Acesso em: 16 maio 2023.

ESPRESSIF. **Announcing ESP32-S3 for AIoT Applications .** Espressif Systems. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/news/ESP32_S3>. Acesso em: 27 maio 2023.

ESPRESSIF. **Esp32_S3.** Espressif Systems. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 30 maio 2023.

FUJIWARA, Caio Hiroshi. **Desenvolvimento de um sensor de condutividade para a determinação do tempo de resposta de um sistema de pulverização agrícola com injeção direta.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-14032016-154553/?&lang=br>>. Acesso em: 1 maio 2023.

HACH COMPANY. **TEMPERATURE COMPENSATION WITH pH MEASUREMENT.** Hach Company. Disponível em: <<https://www.hach.com/asset-get.download.jsa?id=17525673904>>. Acesso em: 10 maio 2023.

HIDROPONIK-STORE. **Nutrient Film Technique NFT.** Disponível em: <<https://hidroponikstore.com/nutrient-film-technique-nft>>. Acesso em: 16 maio 2023.

IC CONTROLS. **PH THEORY & MEASUREMENT**. Ontario, Canada: IC Controls, 2017. Disponível em: <https://iccontrols.com/wp-content/uploads/art-6-1_ph_theory_and_measurement.pdf>. Acesso em: 4 maio 2023.

KEYESTUDIO. **KS0414 Keyestudio Turbidity Sensor V1.0 - Keyestudio Wiki**. wiki.keyestudio.com. Disponível em: <https://wiki.keyestudio.com/KS0414_Keyestudio_Turbidity_Sensor_V1.0>. Acesso em: 1 maio 2023.

KUPHALDT, Tony R. **Lessons In Industrial Instrumentation**. 3.01. ed. São Francisco, California: Control Automation, 2022. Disponível em: <<https://control.com/uploads/Control-Automation-Textbook.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2023.

LCSC. **Electronic Components Distributor - LCSC Electronics**. www.lcsc.com. Disponível em: <<https://www.lcsc.com/>>. Acesso em: 31 maio 2023.

LIBELIUM. **Models - Plug & Sense! Technical Guide**. Libelium. Disponível em: <<https://development.libelium.com/plug-and-sense-technical-guide/models>>. Acesso em: 31 maio 2023.

LORA-ALLIANCE. **Home page | LoRa Alliance™**. lora-alliance.org. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/>>. Acesso em: 14 maio 2023.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio ; ORLANDO, Tailan. **COMPARAÇÃO ENTRE TRÊS TIPOS DE SENSORES DE TEMPERATURA EM ASSOCIAÇÃO COM ARDUÍNO**. Erechim, Rio Grande do Sul: PERSPECTIVA, 2016. Disponível em: <https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/151_587.pdf>. Acesso em: 22 maio 2023.

MAXIM INTEGRATED. **DS18B20**. [s.l.]: Maxim Integrated, 2019. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2023.

MOUSAVI, Kamal-e-ddin; HABIBOLLAH YADOLLAHI ; ABBAS MARVIAN MASHHAD. Design and manufacture of TDS measurement and control system for water purification in reverse osmosis by PID fuzzy logic controller with the ability to compensate effects of temperature on measurement. **Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences**, v. 24, n. <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol24/iss4/41>, p. 2589–2608, 2016. Disponível em: <<https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol24/iss4/41>>. Acesso em: 20 abr. 2023.

OELEN, Allard. **Measuring surface water quality using a low-cost sensor kit within the context of rural Africa**. Netherlands: Vrije Universiteit Amsterdam, 2018. Disponível em: <<https://w4ra.org/wp-content/uploads/2018/09/Measuring-water-quality-Allard-Oelen-Final.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2023.

PATEL, Keyur; PATEL, Sunil ; SCHOLAR, P. **Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges**. [s.l.]: International Journal of Engineering Science and Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.opjstamnar.com/download/Worksheet/Day-110/IP-XI.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2023.

PATEL, Keyur; PATEL, Sunil; SCHOLAR, P.; *et al.* Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges Internet of Things-IOT: Definition, Characteristics, Architecture, Enabling Technologies, Application & Future Challenges. **International Journal of Engineering Science and Computing**, v. 6, n. 5, p. 6122–6131, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330425585_Internet_of_Things-IOT_Definition_Characteristics_Architecture_Enabling_Technologies_Application_Future_Challenges>. Acesso em: 30 maio 2023.

RUSYDI, Anna F. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 118, n. 1, p. 012019, 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/118/1/012019>>. Acesso em: 20 mar. 2023.

SAS, Radiometer Analytical. **Conductivity Theory and Practice**. França: Radiometer Analytical SAS, 2004. Disponível em: <<https://www.tau.ac.il/~chemlaba/Files/Theoryconductivity.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79**. Mouser. Disponível em: <<https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2023.

SIOSEMARDE, M.; KAVE, F.; PAZIRA, E.; *et al.* Determine of Constant Coefficients to Relate Total Dissolved Solids to Electrical Conductivity. **International Journal of Geological and Environmental Engineering**, v. 4, n. 10, p. 457–459, 2010. Disponível em: <<https://publications.waset.org/4280/determine-of-constant-coefficients-to-relatetotal-dissolved-solids-to-electrical-conductivity>>. Acesso em: 3 maio 2023.

SLONGO, Leonardo Kessler. **Circuitos coletores de energia solar para sistemas embarcados de baixo consumo**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/122917>>. Acesso em: 10 maio 2023.

SOUZA, Jéssica de. Os benefícios que a Hidroponia pode trazer ao meio ambiente e ao bolso do produtor. **Revista AuE Irrigação Digital**, 2021. Disponível em: <<https://aueirrigacao.com/?id=os-beneficios-que-a-hidroponia-pode-trazer-ao-meio-ambiente-e-ao-bolso-do-produtor&in=183>>. Acesso em: 16 maio 2023.

WERNER, Lucas Araujo ; ESTEVES, Matheus Marques. **Implementação de sistema de automação para hidroponia e envio de dados para a nuvem**. Trabalho de conclusão de curso

(Graduando em Engenharia de telecomunicações), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/16356>>. Acesso em: 10 abr. 2023.