



DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS OCEANOGRÁFICOS

Felipe Rodrigues de Siqueira Souza

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: José Otavio Goulart Pecly

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA
DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS OCEANOGRÁFICOS

Felipe Rodrigues de Siqueira Souza

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: José Otavio Goulart Pecly

Aprovada por: Prof. José Otavio Goulart Pecly
Prof. Leonardo Contreira Pereira
CC (RM3-T) Marcos Tonelli

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
DEZEMBRO DE 2024

Rodrigues de Siqueira Souza, Felipe

Desenvolvimento e avaliação da maturidade tecnológica de um Sistema de Aquisição de Dados Oceanográficos/Felipe Rodrigues de Siqueira Souza. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XIV, 144 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: José Otavio Goulart Pecly

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 127 – 142.

1. ODAS. 2. Sistema de aquisição. 3. Medição de variáveis oceânicas. 4. TRL. 5. Avaliação de maturidade. I. Goulart Pecly, José Otavio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Agradecimentos

A Jesus Cristo, meu Senhor e Salvador, por Sua graça e por me proporcionar um pouco mais de conhecimento sobre a criação.

À minha família, em especial à minha esposa e à minha filha, por todo o amor, paciência e inspiração ao longo dessa jornada. Pelo apoio incondicional, pelas palavras de encorajamento nos momentos difíceis e por compreenderem minhas ausências, sou imensamente grato.

Aos meus orientadores, que me guiaram com dedicação e conhecimento, e aos colegas de pesquisa, pelo companheirismo e troca de aprendizados.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DA MATURIDADE TECNOLÓGICA DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS OCEANOGRÁFICOS

Felipe Rodrigues de Siqueira Souza

Dezembro/2024

Orientador: José Otavio Goulart Pecly

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação tecnológica de um Sistema de Aquisição de Dados Oceanográficos (ODAS), para registro, processamento e monitoramento de diferentes variáveis do ambiente marinho. Os principais objetivos deste trabalho foram desenvolver um sistema de custo reduzido, que seja capaz de coletar dados de sensores ambientais, e adaptar a escala TRL (*Technology Readiness Level*) para um método de classificação TRL, para o *hardware*, e STRL (*Software Technology Readiness Level*), para o *firmware* do ODAS. O estudo incluiu a adaptação de critérios para avaliação da maturidade tecnológica específicos para cada um desses componentes, resultando em um processo de desenvolvimento e classificação mais estruturado e objetivo. O ODAS foi testado em ambiente de laboratório e os resultados obtidos demonstraram que o método proposto contribuiu significativamente para o planejamento e para a avaliação da maturidade tecnológica do sistema proposto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THESIS TITLE

Felipe Rodrigues de Siqueira Souza

December/2024

Advisor: José Otavio Goulart Pecly

Department: Ocean Engineering

This work presents the development and technological evaluation of an Ocean Data Acquisition System (ODAS) designed for recording, processing, and monitoring various marine environment variables. The primary objectives of this study were to develop an affordable system capable of collecting data from environmental sensors, and to adapt the TRL (Technology Readiness Level) scale into a classification method specific to the ODAS hardware (TRL) and firmware (STRL - Software Technology Readiness Level). The study included the adaptation of criteria for assessing technological maturity, specific to each of these components, resulting in a more structured and objective development and classification process. The ODAS was tested in a laboratory environment, and the results demonstrated that the proposed method significantly contributed to the planning and evaluation of the system's technological maturity.

Sumário

| | |
|---|-------------|
| Lista de Figuras | x |
| Lista de Tabelas | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 4 |
| 1.1.1 Objetivos Específicos | 4 |
| 1.2 Organização da dissertação | 5 |
| 2 Estudos sobre ODAS e a avaliação de maturidade tecnológica | 7 |
| 2.1 Sistemas de Aquisição de Dados Oceanográficos (ODAS) | 7 |
| 2.1.1 Variáveis e técnicas de medição | 8 |
| 2.1.2 Principais componentes e funcionamento básico | 17 |
| 2.1.3 Tipos de Aplicação | 28 |
| 2.2 Avaliação da maturidade tecnológica | 30 |
| 2.2.1 Escalas TRL | 30 |
| 2.2.2 Adaptações para Avaliação TRL no contexto de tecnologias do ambiente marinho | 38 |
| 2.2.3 Desafios e limitações | 43 |
| 3 Adaptação das escalas TRL e STRL para a avaliação tecnológica de um ODAS | 44 |
| 3.1 TRL / STRL 1 | 48 |
| 3.2 TRL / STRL 2 | 49 |
| 3.3 TRL / STRL 3 | 51 |
| 3.4 TRL / STRL 4 | 52 |
| 3.5 TRL / STRL 5 | 53 |
| 3.6 TRL / STRL 6 | 54 |
| 3.7 TRL / STRL 7 | 54 |
| 3.8 TRL / STRL 8 | 55 |
| 3.9 TRL / STRL 9 | 56 |
| 3.10 “TRLômetro” | 57 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Desenvolvimento e classificação TRL e STRL de um ODAS multi-propósito | 59 |
| 4.1 | TRL / STRL 1 - Princípios básicos | 59 |
| 4.1.1 | Pesquisa de Mercado | 59 |
| 4.1.2 | Compreender os princípios de funcionamento (Revisão Teórica Básica) | 62 |
| 4.1.3 | Realizar reuniões iniciais do projeto (esboçar as primeiras ideias) | 62 |
| 4.1.4 | Definições de equipes e locais de desenvolvimento | 64 |
| 4.1.5 | Avaliação em TRL / STRL 1 | 64 |
| 4.2 | TRL / STRL 2 - Conceito | 65 |
| 4.2.1 | Conceito e desempenhos esperados | 65 |
| 4.2.2 | Funcionamento esperado e seleção de componentes | 67 |
| 4.2.3 | Conceitos críticos para o funcionamento do ODAS | 74 |
| 4.2.4 | Publicar observações em revistas científicas ou afins | 82 |
| 4.2.5 | Avaliação em TRL / STRL 2 | 82 |
| 4.3 | TRL / STRL 3 - Prova do conceito | 83 |
| 4.3.1 | Preparação para os experimentos | 83 |
| 4.3.2 | Implementação e testes de funções básicas | 84 |
| 4.3.3 | Implementação do SPAE e do sistema de comunicação | 92 |
| 4.3.4 | Implementação para uso do CTD e do GPS | 94 |
| 4.3.5 | Testes e preparação de componentes para leitura do hidrofone | 94 |
| 4.3.6 | Armazenamento em nuvem | 95 |
| 4.3.7 | Implementação do SCM | 95 |
| 4.3.8 | Avaliação em TRL / STRL 3 | 97 |
| 4.4 | TRL / STRL 4 - Validação em ambiente de laboratório | 97 |
| 4.4.1 | Integração inicial do <i>hardware</i> do ODAS | 97 |
| 4.4.2 | Implementação da função de interpretação de comandos | 99 |
| 4.4.3 | Atualização do Módulo de Interação | 99 |
| 4.4.4 | Melhoria estrutural do <i>firmware</i> | 100 |
| 4.4.5 | Implementação para uso do hidrofone | 101 |
| 4.4.6 | Teste da amplificação automatizada | 102 |
| 4.4.7 | Processamento de Detecção de <i>Chirps</i> lineares | 109 |
| 4.4.8 | Validação do ODAS em ambiente de laboratório | 113 |
| 4.4.9 | Avaliação em TRL / STRL 4 | 116 |
| 4.5 | Resumo das atividades realizadas | 117 |
| 5 | Discussão | 119 |
| 5.1 | O método de classificação | 119 |
| 5.1.1 | Expansão da classificação STRL | 120 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2 | O desenvolvimento e a avaliação TRL / STRL do ODAS | 120 |
| 5.2.1 | Avanços para os próximos níveis de maturidade | 121 |
| 5.2.2 | Aplicabilidade do método de classificação em diferentes meto- dologias de projeto | 122 |
| 6 | Conclusões e recomendações | 123 |
| 6.1 | Recomendações | 125 |
| | Referências Bibliográficas | 127 |
| A | Modelo do amplificador do ODAS desenvolvido | 143 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Benefícios da integração de avanços tecnológicos contínuos, IoT e nacionalização de tecnologia. Fonte: adaptado de RAJ <i>et al.</i> (2024) . . . | 2 |
| 2.1 | Diagrama de sequência de operações para coleta de dado oceanográfico. Fonte: adaptado de BAKSHI e BAKSHI (2020). | 7 |
| 2.2 | Espectros de sinais acústicos no ambiente marinho. Fonte: adaptado de WENZ (1962) | 11 |
| 2.3 | Sensibilidade de Hidrofonos. Fonte: adaptado de AU e HASTINGS (2008) | 15 |
| 2.4 | Componentes típicos para medição acústica submarina. Fonte: baseado em AU e HASTINGS (2008) | 16 |
| 2.5 | Diagrama de Blocos Funcionais para um ODAS típico | 17 |
| 2.6 | Níveis TRL em diferentes estágios de desenvolvimento. Fonte: adaptado de HENSEN <i>et al.</i> (2015); NASA (2016) | 33 |
| 2.7 | Vantagens do uso e adaptações da escala TRL. Fonte: adaptado de COSTA (2024); HÉDER (2017); MANKINS (2009); SALAZAR e RUSSI-VIGOYA (2021); WHITE <i>et al.</i> (2022) | 37 |
| 2.8 | Comparativo do dispêndio dos projetos e “Vale da Morte”. Fonte: adaptado de COSTA (2024); HENSEN <i>et al.</i> (2015) | 38 |
| 2.9 | Diagrama “V” do processo de desenvolvimento do NeXOS. Fonte: adaptado de ROLIN (2014) | 40 |
| 2.10 | Níveis RL. Fonte: adaptado de HOLLINGSHEAD (2022) | 42 |
| 3.1 | Diagrama de progressão tecnológica para o <i>hardware</i> | 45 |
| 3.2 | Diagrama de progressão tecnológica para o <i>firmware</i> | 46 |
| 3.3 | Interface do “TRLômetro” | 57 |
| 3.4 | Resultado de classificação | 58 |
| 4.1 | Diagrama simplificado de Blocos Funcionais | 63 |
| 4.2 | Conceito do novo ODAS | 65 |
| 4.3 | Diagrama de blocos funcionais para o Módulo Científico e para o Sistema de Energia | 67 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.4 | Placa de desenvolvimento selecionada. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a). | 68 |
| 4.5 | Circuito para o microfone de eletreto | 70 |
| 4.6 | Módulo de Interação | 73 |
| 4.7 | Diagrama simplificado do Módulo Científico | 75 |
| 4.8 | Curva de amplificação obtida pela sobreposição das curvas características das duas abordagens | 76 |
| 4.9 | Curva de amplificação obtida pela sobreposição das curvas características das duas abordagens (<i>zoom</i>) | 77 |
| 4.10 | Algoritmo de Amplificação Automática | 79 |
| 4.11 | Descrição geral de funcionalidade do <i>firmware</i> | 81 |
| 4.12 | Digitalização para testes do ADC de sinal de 500 Hz | 87 |
| 4.13 | Digitalização para testes do ADC de sinal de 1 kHz | 88 |
| 4.14 | Digitalização para testes do ADC de sinal de 2 kHz | 89 |
| 4.15 | Espectro de frequência para o sinal de 2 kHz | 90 |
| 4.16 | Digitalização de sinal com o PC como fonte de alimentação | 91 |
| 4.17 | <i>Dashboard</i> simplificado para o SCM | 96 |
| 4.18 | Tela para envio de comandos ao ODAS | 96 |
| 4.19 | Abordagem do arranjo da primeira integração de componentes físicos | 98 |
| 4.20 | Primeira integração de componentes físicos | 98 |
| 4.21 | Modularização dos arquivos do <i>firmware</i> | 101 |
| 4.22 | Sinal de 500 Hz com variação de amplitude até 2400 mV com taxa de variação de 64 mV/ciclo | 103 |
| 4.23 | Notificação recebida por <i>e-mail</i> após termino de tarefa de leitura de sinal | 105 |
| 4.24 | Percentual de amostras saturadas na amplificação de sinal com amplitude variada até 800 mV para diferentes taxas de variação e diferentes valores de n | 106 |
| 4.25 | Percentual de amostras saturadas na amplificação de sinal com amplitude variada até 2400 mV para diferentes taxas de variação e diferentes valores de n | 107 |
| 4.26 | Sinal com amplitude variante até 800 mV, $n = 256$ (16 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 64 mV/ciclo | 107 |
| 4.27 | Sinal com amplitude variante até 2400 mV, $n = 32$ (2 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 128 mV/ciclo | 108 |
| 4.28 | Sinal com amplitude variante até 800 mV, $n = 1024$ (64 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 32 mV/ciclo | 108 |
| 4.29 | Algoritmo de detecção de <i>chirp</i> linear | 110 |
| 4.30 | Tempos de processamento do algoritmo | 111 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.31 | Resultados dos espectrogramas | 113 |
| 4.32 | Estação submarina do IEAPM, instalada a uma profundidade de 10 m, próximo à Praia dos Anjos em Arraial do Cabo/RJ | 114 |
| 4.33 | Sinal da paisagem acústica digitalizada com o método de ganho automático | 115 |
| 4.34 | Notificação de detecção de <i>chirp</i> linear em <i>smartphone</i> | 116 |
| A.1 | Placa com o AD620. Fonte: USINAINFO (2024) | 143 |
| A.2 | Pinagem do AD620. Fonte: ANALOG DEVICES (2009) | 143 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Componentes típicos de ODAS (parte 1) | 26 |
| 2.2 | Componentes típicos de ODAS (parte 2) | 27 |
| 2.3 | Escala TRL original. Fonte: adaptado de SADIN <i>et al.</i> (1989) | 30 |
| 2.4 | Reformulação da escala TRL com 9 níveis (década de 90) - parte 1. Fonte: adaptado de MANKINS (1995, 2009) | 31 |
| 2.5 | Reformulação da escala TRL com 9 níveis (década de 90) - parte 2. Fonte: adaptado de MANKINS (1995, 2009) | 32 |
| 2.6 | Definições dos níveis da escala STRL. Fonte: EMBRAPPII (2020) | 36 |
| 2.7 | Validação e demonstração associados ao ambiente de desenvolvimento para cada nível RL. Fonte: adaptado de (HOLLINGSHEAD, 2022). | 42 |
| 3.1 | TRL / STRL 1 | 49 |
| 3.2 | TRL / STRL 2 | 50 |
| 3.3 | TRL / STRL 3 | 51 |
| 3.4 | TRL / STRL 4 | 52 |
| 3.5 | TRL / STRL 5 | 53 |
| 3.6 | TRL / STRL 6 | 54 |
| 3.7 | TRL / STRL 7 | 55 |
| 3.8 | TRL / STRL 8 | 56 |
| 3.9 | TRL / STRL 9 | 57 |
| 4.1 | Parâmetros Gerais do MCU ATSAM21G18. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a) | 68 |
| 4.2 | Parâmetros Gerais da Feather M0 Adalogger. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a) | 69 |
| 4.3 | Parâmetros da bateria selecionada. Fonte: ADAFRUIT INDUS- TRIES (2024a) | 71 |
| 4.4 | Matriz de limiares de alteração do passo para o Método I (em mV) | 78 |
| 4.5 | Matriz de limiares de alteração do passo para o Método II (em mV) | 78 |
| 4.6 | Síntese do conceito do ODAS proposto | 83 |
| 4.7 | Resultados do teste de taxa de amostragem | 85 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.8 | Comparativos de SNR para a aquisição do sinal de 1 kHz com diferentes sistemas de energia | 91 |
| 4.9 | Estrutura para transmissão de dados em 2 <i>bytes</i> (16 <i>bits</i>) | 93 |
| 4.10 | Atividades realizadas para o <i>hardware</i> | 117 |
| 4.11 | Atividades realizadas para o <i>firmware</i> | 118 |

Capítulo 1

Introdução

O monitoramento dos oceanos é essencial para entender os fenômenos climáticos e preservar a biodiversidade marinha. No Brasil, sistemas de observação e modelagem, integrados a iniciativas globais, melhoram a qualidade das previsões necessárias para a gestão sustentável das atividades marítimas (FRANZ *et al.*, 2021). Métodos eficientes, como o uso otimizado de sensores e a disseminação de dados, são fundamentais para fornecer previsões confiáveis em diversas escalas de tempo e espaço (PEARLMAN *et al.*, 2019).

Pesquisas no ambiente marinho, nessas diferentes escalas, demandam avanços tecnológicos contínuos. O desenvolvimento de plataformas oceanográficas autônomas é essencial, especialmente em sistemas que utilizam o conceito de "Internet das Coisas" (IoT), que conecta sensores inteligentes, servidores e dispositivos automatizados, melhorando a aquisição e disponibilização de dados (RAJ *et al.*, 2024). Buscar soluções tecnológicas nacionais aumenta o controle sobre a tecnologia e fortalece o PD&I. Como mostrado na **Figura 1.1**, esses conceitos interligados beneficiam a pesquisa no ambiente marinho.

O dispositivo comumente chamado ODAS (*Ocean Data Acquisition Systems*) combina sensores, circuitos eletrônicos, protocolos de comunicação e *softwares* embarcados para coletar, processar e transmitir informações sobre o ambiente marinho. Inicialmente definido na década de 1970 como: "*estrutura, plataforma, instalação, boia ou outro dispositivo, não sendo um navio, juntamente com seu equipamento anexo, implantado no mar essencialmente para fins de coleta, armazenamento ou transmissão de amostras ou dados relacionados ao meio marinho ou à atmosfera ou seus usos*", o ODAS evoluiu com o avanço da microeletrônica, permitindo a utilização de dispositivos cada vez mais compactos, energeticamente eficientes e com maior capacidade de armazenamento e processamento de dados (MEINDL, 1996; UNESCO, 1972).

Diferentes tipos de boias, incluindo as fundeadas e as de deriva, são desenvolvidas e/ou empregadas para monitorar as condições oceânicas, como temperatura, salini-

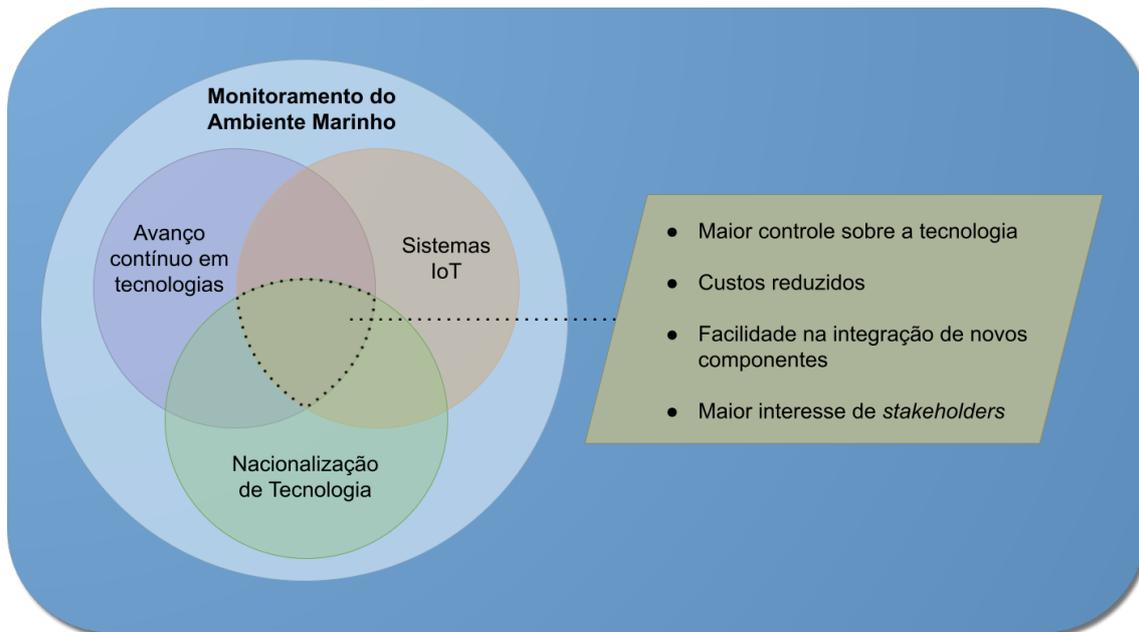


Figura 1.1: Benefícios da integração de avanços tecnológicos contínuos, IoT e nacionalização de tecnologia. Fonte: adaptado de RAJ *et al.* (2024)

dade e correntes, em locais fixos ou ao longo de trajetos específicos (CHEN *et al.*, 2023a; SOREIDE *et al.*, 2001; WANG *et al.*, 2024). Veículos não tripulados, como os AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) e os UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) têm sido utilizados para o monitoramento ambiental marinho (NOH *et al.*, 2024; VERFUSS *et al.*, 2019). Outras tecnologias estão sendo exploradas recentemente para coletar dados que caracterizam os oceanos ou suas interfaces, como a coluna d'água, o leito marinho e a superfície do mar (FENG LYU e WU, 2024; SHEN e WU, 2024; ZHONG *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o desenvolvimento de eletrônica embarcada para sistemas de monitoramento oceânico impõe desafios significativos. A otimização do consumo energético é essencial para garantir a autonomia operacional de dispositivos frequentemente implantados em locais remotos e de difícil acesso. Devido às restrições de espaço, os componentes eletrônicos precisam ser compactos, robustos e altamente eficientes, maximizando o desempenho sem comprometer a confiabilidade. Além disso, a agressividade do ambiente marinho representa uma ameaça constante aos dispositivos, exigindo materiais resistentes à corrosão, encapsulamento adequado e estratégias de proteção contra variações extremas de temperatura, pressão e umidade. A logística de manutenção e substituição de componentes também é um fator crítico, pois o acesso ao ponto de coleta de dados pode ser inviável por longos períodos, tornando fundamental a implementação de sistemas de monitoramento remoto, diagnósticos automatizados e protocolos de recuperação em caso de falhas. Esses desafios ressaltam a necessidade de soluções inovadoras e integradas que garantam a

confiabilidade e longevidade dos sistemas de aquisição de dados oceanográficos, promovendo avanços significativos na capacidade de observação do ambiente marinho.

A IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission) da UNESCO é uma das pioneiras em promover a colaboração internacional em pesquisa e monitoramento oceânico. Desde sua criação em 1960, a IOC-UNESCO destaca a importância da união de esforços entre a academia, indústria e governos de diversos países para enfrentar desafios oceânicos e avançar no desenvolvimento tecnológico (KULLENBERG *et al.*, 2021). Iniciativas, como o Ocean Data Challenge, incentivam a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para monitoramento oceânico, estimulando inovações tecnológicas e a integração de soluções sustentáveis e de alto impacto para a conservação dos oceanos, incluindo novos meios de coleta de dados (TARDIFF, 2023).

Especialmente no Brasil, diversas instituições de pesquisa na área têm contribuído para o segmento de P&D&I (COSTA, 2019). A RInstrO, sub-rede de P&D&I em Instrumentação para a Observação e Monitoramento Oceânico, parte da RENOMO (Rede Nacional de Observação e Monitoramento), apoia projetos do GOOS (*Global Ocean Observing System*) Brasil, visando melhorar a qualidade dos dados e a infraestrutura para monitoramento oceânico, promovendo a inovação industrial e articulando a comunidade científica e o setor privado para alcançar autossuficiência tecnológica em equipamentos oceanográficos. A RInstrO também fomenta a formação de recursos humanos e o fortalecimento da cadeia produtiva em tecnologia oceânica nacional (FURG, 2023). Em Arraial do Cabo/RJ, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) da Marinha do Brasil tem colaborado com a missão de "*Realizar atividades de PD&I, no ambiente marinho, a fim de contribuir para o melhor conhecimento e eficiente utilização do mar, em atendimento aos interesses da Marinha*" (IEAPM, 2024b; MARINHA DO BRASIL, 2022).

A evolução das tecnologias de monitoramento oceânico exige não apenas inovação, mas também uma avaliação cuidadosa para garantir sua prontidão para uso. Nesse contexto, é fundamental utilizar métricas que ajudem a medir e gerenciar o progresso tecnológico, além de criar uma linguagem comum no setor. A escala TRL (*Technology Readiness Levels*), desenvolvida pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) nos anos 1970 para avaliar a maturidade das tecnologias espaciais, é amplamente usada em diversas áreas, incluindo o monitoramento oceânico. Ela possui nove níveis, indo da observação de princípios básicos (TRL 1) até a demonstração em ambiente operacional (TRL 9), onde cada nível é composto por um conjunto de atividades de desenvolvimento (ou objetivos de avaliação) que, implicitamente, define marcos e metas no projeto. O seu uso contribui para diversos aspectos, como planejamento, tomada de decisões, gestão de riscos, antecipação de desafios e estratégias de mitigação. (MANKINS, 1995, 2009).

Ao longo dos anos, diversas adaptações dessa escala surgiram, como o MRL (*Manufacturing Readiness Levels*) para medição da maturidade sob o ponto de vista da produção (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005), o OS-TRL (*Ocean Sciences Technology Readiness Levels*) para classificar o status de desenvolvimento de sensores e tecnologias relacionadas ao monitoramento oceânico (WALDMANN *et al.*, 2010) e o STRL (*Software Technology Readiness Levels*), voltado para avaliação da maturidade de *softwares* (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005; NASA, 2008; SMITH, 2005). Essas escalas estão implantadas em diferentes ferramentas que oferecem interatividade com o usuário (ALTUNOK e ÇAKMAK, 2010; EMBRAPPII, 2020).

1.1 Objetivos

O objetivo desta dissertação é apresentar as etapas de desenvolvimento de um ODAS para monitoramento marinho e apresentar um método para avaliar a sua maturidade tecnológica através de uma adaptação da escala TRL.

Deverão ser exploradas ao longo do projeto algumas aplicações de monitoramento, mesmo que de forma simulada, de variáveis físicas do oceano e de monitoramento acústico passivo submarino de fontes de baixa frequência, até uma ordem de 1 kHz, que compõem uma parcela da rica biodiversidade costeira da região (BATISTA *et al.*, 2020; BRAGA *et al.*, 2020; MELLO-FONSECA *et al.*, 2021) e o elevado tráfego de embarcações, em razão de atividades pesqueiras e de passeios turísticos, realizados com embarque no Porto do Forno, em Arraial do Cabo/RJ.

Além do projeto do ODAS proposto, será adotada uma metodologia que adapta os objetivos de cada nível TRL ao contexto, segmentando-os para o *hardware* e para o *firmware* (*software* embarcado que fornece instruções para o *hardware*).

Será verificado se essa adaptação funcionará como uma ferramenta estratégica para orientar as equipes quanto à classificação do nível de prontidão tecnológica do ODAS, a partir de critérios específicos para cada estágio de maturidade que contribuem para a identificação dos avanços necessários e promovem um desenvolvimento mais eficiente e estruturado. Além disso, será discutido como essa metodologia contribui com melhorias nas relações entre academia, indústria e agências/instituições de fomento durante o desenvolvimento.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Discutir o conceito, definições e aplicações para ODAS típicos;
- Discutir o conceito, definições e os critérios comumente utilizados na avaliação de maturidade tecnológica através de escalas TRL/STRL;
- Adaptar escalas TRL/STRL para o contexto de produtos ODAS, o que inclui:

1. Compreensão básica de tecnologias utilizadas em ODAS e seus componentes principais;
 2. Estabelecimento de quais são os resultados ou atividades concluídas em cada nível TRL/STRL, separados para o *hardware* e para o *firmware* do ODAS; e
 3. Apresentação de uma ferramenta interativa ("TRLômetro") para classificação TRL/STRL, baseada em critérios relacionados a esses resultados ou atividades.
- Desenvolver um ODAS de custo reduzido até um nível de maturidade de validação em ambiente laboratorial, aplicando o método proposto adaptado para a avaliação de maturidade do produto. Especificamente, deverá ser implementada e validada a aquisição de dados de um CTD e de sinais acústicos, de até 1 kHz, obtidos de um hidrofone.
 - Discutir questões relativas ao projeto e à avaliação da maturidade tecnológica do produto;
 - Identificar os marcos que delimitam a atuação das entidades principais (academia, indústria e governo) no desenvolvimento de produtos.

1.2 Organização da dissertação

O capítulo 1 introduz o tema desta dissertação, apresenta os objetivos a serem alcançados e descreve a organização da dissertação. É exposto o contexto recente das atividades de monitoramento marinho e como pode se relacionar com os conceitos de avaliação tecnológica e com a participação da academia, indústria e governo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre trabalhos desenvolvidos na área. São discutidos os conceitos de tecnologias ODAS, incluindo *hardwares* e *softwares*, e suas principais aplicações recentes. Neste capítulo, também é apresentada a definição da escala TRL e de outras escalas derivadas. São apresentadas diferentes instituições que as utilizam e as suas aplicações em tecnologias de distintas áreas, incluindo aquelas relacionadas ao monitoramento oceanográfico.

O capítulo 3 apresenta um método de avaliação de maturidade tecnológica, onde são adaptados e descritos diversos critérios de avanço tecnológico para o projeto do ODAS. A escala TRL é abordada para o *Hardware* bem como para uma escala STRL para o *Firmware* do ODAS. Neste capítulo também é apresentada a ferramenta "TRLômetro".

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do ODAS, bem como a avaliação da maturidade tecnológica.

No capítulo 5, são discutidos aspectos relativos ao projeto, a adaptação das escalas TRL e STRL e sua aplicação no desenvolvimento do ODAS.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências e os apêndices.

Capítulo 2

Estudos sobre ODAS e a avaliação de maturidade tecnológica

2.1 Sistemas de Aquisição de Dados Oceanográficos (ODAS)

A **Figura 2.1** apresenta o diagrama da sequência de operações realizadas para coletar um dado, desde a sua forma natural no meio até a sua disponibilização.

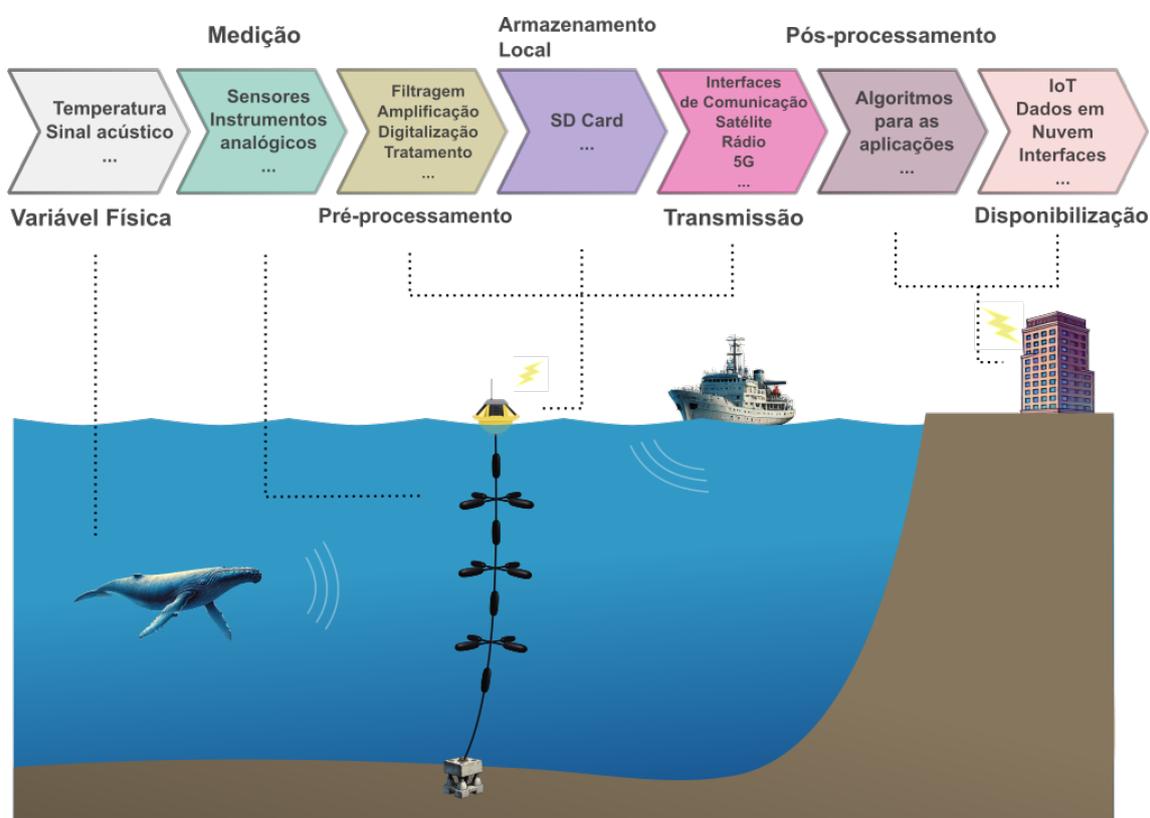


Figura 2.1: Diagrama de sequência de operações para coleta de dado oceanográfico. Fonte: adaptado de BAKSHI e BAKSHI (2020).

São discutidos cada bloco do diagrama ao longo desta seção, que está dividida nos seguintes tópicos:

- Variáveis e técnicas de medição;
- Principais componentes e funcionamento básico; e
- Tipos de aplicação

2.1.1 Variáveis e técnicas de medição

O Sistema de Aquisição de Dados Oceanográficos (ou ODAS - *Ocean Data Acquisition System*) é um sistema projetado para a coleta, armazenamento e transmissão de dados relacionados ao oceano. Ele é essencial para o monitoramento e obtenção de dados, de forma direta ou indireta, sobre várias condições e parâmetros, fundamentais para diversas aplicações, tais como: temperatura da superfície e da coluna d'água, salinidade, nível do mar e paisagem acústica submarina (MEINDL, 1996; UNESCO, 1972).

Variáveis oceanográficas

As variáveis monitoradas por um ODAS fornecem informações importantes para entender os processos físicos, químicos e biológicos nas regiões marinhas. Nesta seção, são apresentadas aquelas de interesse para esta dissertação.

- Temperatura

Entre as variáveis mais comuns está a temperatura da água. Por exemplo, a sua medição possibilita determinar o comportamento das ondas sonoras no ambiente subaquático, já que afeta diretamente a velocidade de propagação do som. Em águas mais quentes, o som se propaga mais rapidamente, enquanto em águas mais frias sua velocidade é reduzida. A variação na velocidade, associada à estratificação térmica do oceano, pode influenciar a trajetória das ondas sonoras, causando refração ou reflexão. Assim, conhecer a distribuição da temperatura ao longo da coluna d'água é necessário para ajustar sistemas de detecção subaquática (URICK, 1983).

- Salinidade

A salinidade, a qual mede a concentração de sais dissolvidos na água, é geralmente calculada com base na condutividade elétrica, temperatura e pressão. Ela é fundamental para determinar a densidade da água, o que afeta a circulação oceânica e o clima (THOMSON e EMERY, 2014).

- Nível do mar

O nível do mar é outra variável cujo monitoramento pode ser útil, por exemplo, para prevenir desastres naturais, como tsunamis e marés de tempestade.

Monitorando o nível do mar em tempo real, o sistema pode detectar mudanças rápidas, como elevações repentinas que indicam a chegada de um tsunami. Esses dados permitem emitir alertas antecipados, dando tempo para evacuações e outras ações de segurança. Dessa forma, a medição do nível do mar ajuda a reduzir riscos e proteger vidas em áreas costeiras (BAHARI *et al.*, 2023; RABBANI *et al.*, 2023).

- Paisagem acústica submarina

Outra variável de interesse crescente, especialmente em regiões de alta atividade humana ou biológica, é a paisagem acústica submarina, definida como um conjunto de sinais acústicos (ou ondas mecânicas) que se propagam através do oceano, pela vibração das partículas que compõem esse meio. Elas são geradas quando uma fonte de energia provoca uma perturbação, criando regiões de compressão e rarefação no meio, onde as partículas se aproximam e se afastam, respectivamente. Essas vibrações transferem energia de partícula para partícula, formando uma onda longitudinal, em que o movimento das partículas ocorre na mesma direção da propagação da onda (KINSLER *et al.*, 2000).

No ambiente submarino, o som se move a uma velocidade muito maior do que no ar – aproximadamente 1.500 metros por segundo, em comparação com cerca de 340 metros por segundo no ar. A velocidade do som no ambiente submarino depende de fatores como temperatura, salinidade e pressão (MEDWIN e CLAY, 1997), podendo ser calculada pela fórmula empírica:

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (2.1)$$

onde:

T é a temperatura em graus Celsius

S é a salinidade em partes por mil (ppt)

z é a profundidade em metros

Na natureza, os sinais acústicos são classificados em três categorias principais:

- Biofonia, que se refere aos sons produzidos por organismos vivos, como animais e plantas (KRAUSE, 1987);
- Geofonia, que engloba os sons naturais não biológicos, como o vento, a chuva e o movimento das ondas (KRAUSE, 1987); e

- Antrofonía, que descreve os sons originados de atividades humanas, incluindo ruídos de veículos, construções e embarcações (PIJANOWSKI *et al.*, 2011).

As aplicações acústicas submarinas são bem variadas. Podem ser aplicadas na navegação, comunicação, localização de alvos, detecção de intrusos e monitoramento da vida marinha (AU e HASTINGS, 2008). O tráfego marítimo, por exemplo, influencia diretamente a acústica submarina, interferindo no comportamento de espécies marinhas sensíveis a sons, como mamíferos e peixes (HILDEBRAND, 2009).

As fontes sonoras podem se diferenciar umas das outras pela frequência da onda acústica que está emitindo. Por exemplo, WILCOCK *et al.* (2014) discutem uma série de fontes acústicas dos oceanos que incluem mamíferos marinhos, terremotos, condições climáticas e atividades humanas, como hélices de navios, extração de energia e canhões pneumáticos.

A **Figura 2.2** apresenta uma composição de diferentes fontes de sinais acústicos relacionados ao oceano e seus níveis de pressão sonora. É possível notar uma vasta quantidade de tipos de emissão de sinais acústicos de baixa frequência, especificamente até 1000 Hz, os quais são de interesse para a operação do ODAS em desenvolvimento.

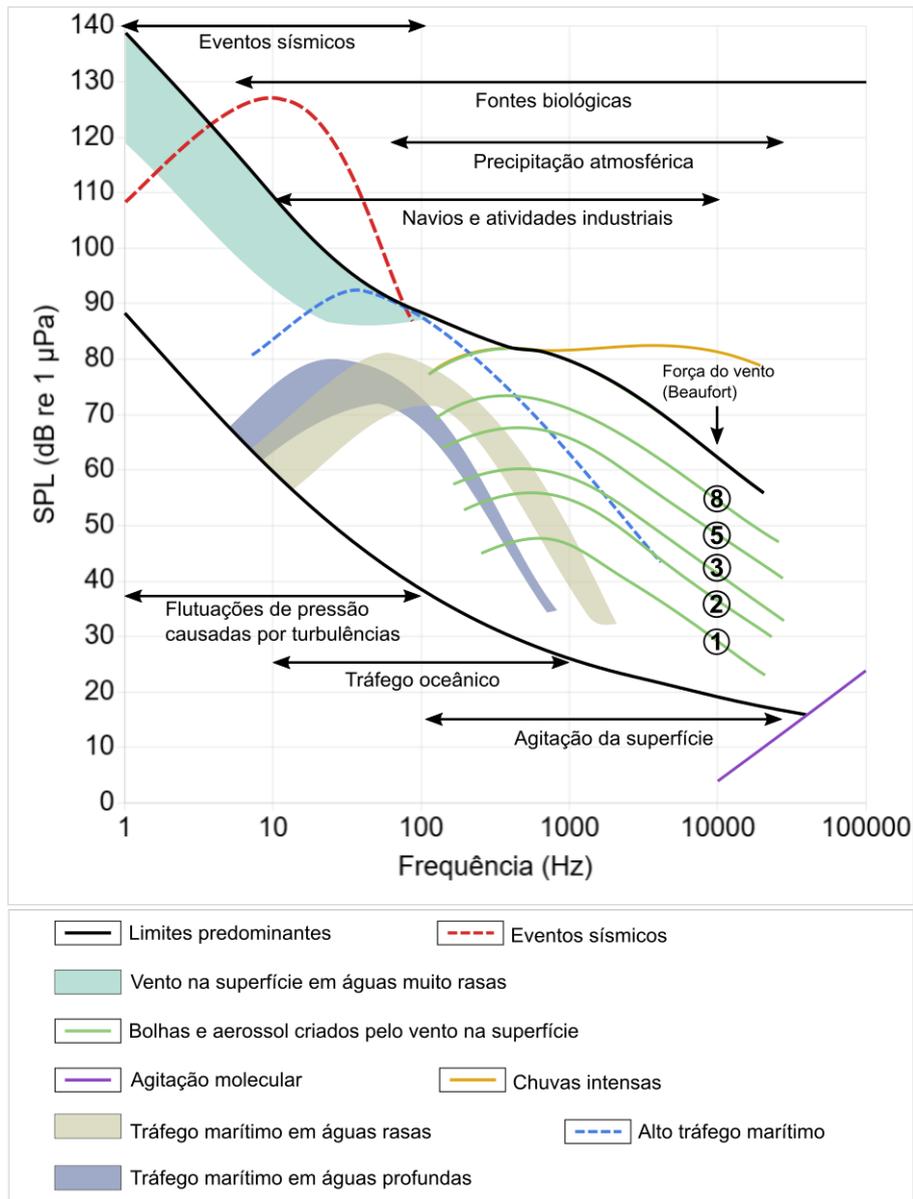


Figura 2.2: Espectros de sinais acústicos no ambiente marinho. Fonte: adaptado de WENZ (1962)

Além da característica de frequência do sinal, diversos outros fatores são considerados para identificar essas fontes. BITTLE e DUNCAN (2013) revisaram diferentes técnicas usadas para detecção e classificação de mamíferos marinhos, incluindo aquelas que consideram o domínio do tempo do sinal.

Diversas outras variáveis oceanográficas podem ser medidas direta ou indiretamente, tais como velocidade do som, velocidade de corrente, parâmetros de ondas, turbidez da água e concentração de oxigênio (THOMSON e EMERY, 2014).

Sensores e instrumentos de medição

A medição de variáveis oceanográficas depende do uso de sensores e instrumentos especializados, os quais abrangem métodos diretos e indiretos. São discutidos alguns para medição de:

- Temperatura

Para medir a temperatura da água do mar, existem diversos sensores e instrumentos disponíveis. Alguns dos principais instrumentos são:

- CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*) – Um dos instrumentos mais utilizados na oceanografia, o CTD mede simultaneamente a temperatura, condutividade elétrica e a pressão. Ele é amplamente empregado em perfis verticais em várias profundidades (XIAO *et al.*, 2023).
- XBT (*Expendable Bathythermograph*) – Um sensor descartável que, ao ser lançado no mar, registra a temperatura da água em diferentes profundidades enquanto desce. Muito utilizado em pesquisas oceanográficas para medir rapidamente perfis de temperatura (PITA *et al.*, 2024).

Os diferentes modelos de instrumentos podem ser associados a distintas técnicas de medição (XIAO *et al.*, 2023), tais como:

- Termistores (*Thermistors*) – Sensores sensíveis à temperatura com coeficiente de temperatura negativo, com alta precisão, mas faixa de operação limitada em comparação com os sensores de resistência de platina.
- Sensores resistivos de platina - Amplamente utilizados em sensores CTD devido à sua estabilidade, resistência à oxidação, resposta linear à temperatura. Eles oferecem alta precisão de medição.

- Nível do mar

Para o nível do mar, uma das técnicas para sua medição (BAHARI *et al.*, 2023) inclui o marégrafo, que é um equipamento utilizado para medir a elevação do nível do mar em locais de referência estáveis, fornecendo dados detalhados em escalas temporais finas.

- Parâmetros de ondas

A medição de parâmetros de ondas de superfície no oceano pode ser realizada de diferentes formas (LANCASTER *et al.*, 2021), tais como:

- GPS - através do registro do movimento de uma boia, por exemplo, pode-se medir diversos parâmetros de ondas
- Rastreamento por Eco (*Echo Ranging* ou *Surface Tracking*) - uma técnica de medição direta da elevação da superfície da água utilizando o ADCP

(*Acoustic Doppler Current Profiler*), que também pode medir correntes ao longo da coluna d'água

- Registradores de Pressão (*Pressure Loggers*) - Sensores que medem a pressão perto do fundo do mar para calcular a elevação da superfície do mar.

- Paisagem Acústica Submarina

Para a medição de ondas acústicas submarinas há diferentes formas, como o uso dos hidrofones ou sistemas sonares, que são aqueles que envolvem um ou mais projetores e/ou hidrofones e componentes eletrônicos relacionados (BJØRNØ, 2017).

Nesta seção, foram discutidos apenas os conceitos do hidrofone, que são sensores projetados para captar sons subaquáticos e são considerados o meio mais básico e amplamente utilizado para a detecção de ondas sonoras no ambiente submarino. Similar a um microfone, o hidrofone é sensível às ondas mecânicas geradas pelo som, mas ele é especialmente adaptado para funcionar em ambientes aquáticos, onde a densidade e a pressão são significativamente diferentes das do ar. Historicamente, hidrofones instalados nos cascos de navios já eram utilizados para detectar sinos submarinos que soavam perto de faróis de navegação (RODRÍGUEZ, 2021).

As ondas sonoras subaquáticas são convertidas em sinais elétricos. Quando uma onda sonora passa pela água e atinge o hidrofone, ela causa pequenas variações de pressão sobre o dispositivo. O hidrofone contém um transdutor, geralmente feito de material piezoelétrico, que é capaz de responder a essas variações de pressão. Esse material piezoelétrico gera uma voltagem elétrica proporcional à intensidade da pressão sonora. Dessa forma, o hidrofone transforma a energia mecânica das ondas sonoras em energia elétrica, que pode então ser registrada, amplificada e analisada (AU e HASTINGS, 2008).

Os hidrofones se diferenciam principalmente, para distintas aplicações, pela sua sensibilidade e resposta em frequência (AU e HASTINGS, 2008). Devido à ampla gama de valores para as pressões e intensidades sonoras, é comum utilizar o conceito da escala de decibéis (dB) para definir o nível de intensidade sonora (IL), expresso em dB *re* I_{ref} (KINSLER *et al.*, 2000):

$$IL = 10 \log \left(\frac{I}{I_{ref}} \right) \quad (2.2)$$

onde I é a intensidade do som e I_{ref} é uma intensidade de referência.

Uma vez que a intensidade do som pode ser expressa em função da pressão sonora, pode-se definir o nível de pressão sonora (SPL), em dB *re* P_{ref} :

$$I = \frac{P^2}{2\rho_0 c} \quad (2.3)$$

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (2.4)$$

A sensibilidade do hidrofone é outro conceito fundamental, pois define a capacidade do transdutor de converter uma pressão sonora em um sinal elétrico. A pressão gera uma força sobre o material piezoelétrico do hidrofone, causando uma deformação que, por sua vez, induz uma tensão (V_{out}) proporcional a essa pressão. Devido à natureza dos sinais acústicos submarinos, a sensibilidade (S) de um hidrofone geralmente é dada em dB *re* 1 V/ μPa :

$$S = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{P_{in}} \right) \quad (2.5)$$

onde P_{in} é a pressão sonora de entrada e V_{out} é a tensão elétrica de saída, que pode ser escrita como:

$$V_{out} = P_{in} \cdot 10^{S/20} \quad (2.6)$$

Por exemplo, para uma sensibilidade de -170 dB *re* 1 V/ μPa , ele é capaz de fornecer aproximadamente apenas 3,16 nV, já para uma sensibilidade de -100 dB *re* 1 V/ μPa , ele fornece 10 μV .

Além disso, a sensibilidade do hidrofone é diferente para diferentes valores de frequência do sinal. Isso ocorre porque, após o processo de polarização, as cerâmicas piezoelétricas se tornam anisotrópicas, exibindo propriedades eletromecânicas que variam com a direção e frequência da excitação. Esse comportamento resulta em uma resposta sensível a diferentes frequências, devido ao acoplamento entre as propriedades ao longo dos eixos do material, o que afeta a conversão da pressão sonora em sinal elétrico em cada faixa de frequência (AU e HASTINGS, 2008). A **Figura 2.3** apresenta curvas de sensibilidade na recepção de sinais para uma determinada família de hidrofones.

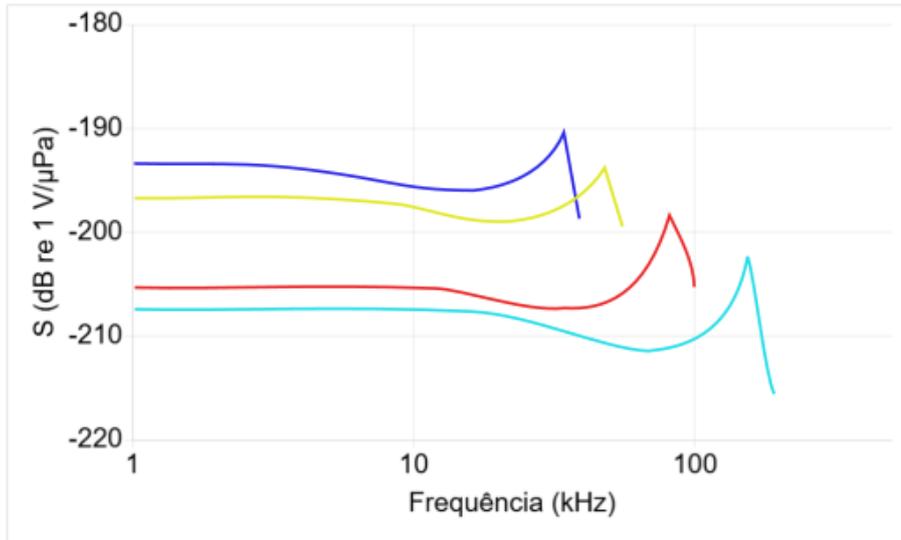


Figura 2.3: Sensibilidade de Hidrofones. Fonte: adaptado de AU e HASTINGS (2008)

É possível observar na **Figura 2.3** uma maior sensibilidade em determinadas faixas de frequência, seguida por quedas ou picos em regiões específicas, que são consequência do acoplamento entre as propriedades eletromecânicas nos eixos do material. O hidrofone relacionado à curva azul escuro representa o mais sensível, ou seja, aquele com maior capacidade de caracterizar sinais mais fracos.

Em termos de funcionamento, geralmente os hidrofones são instalados em conjunto com outros componentes importantes do ODAS que funcionam especialmente para condicionar os sinais acústicos captados pelos hidrofones. A **Figura 2.4** apresenta um esquema típico. Esses componentes são discutidos na próxima seção.

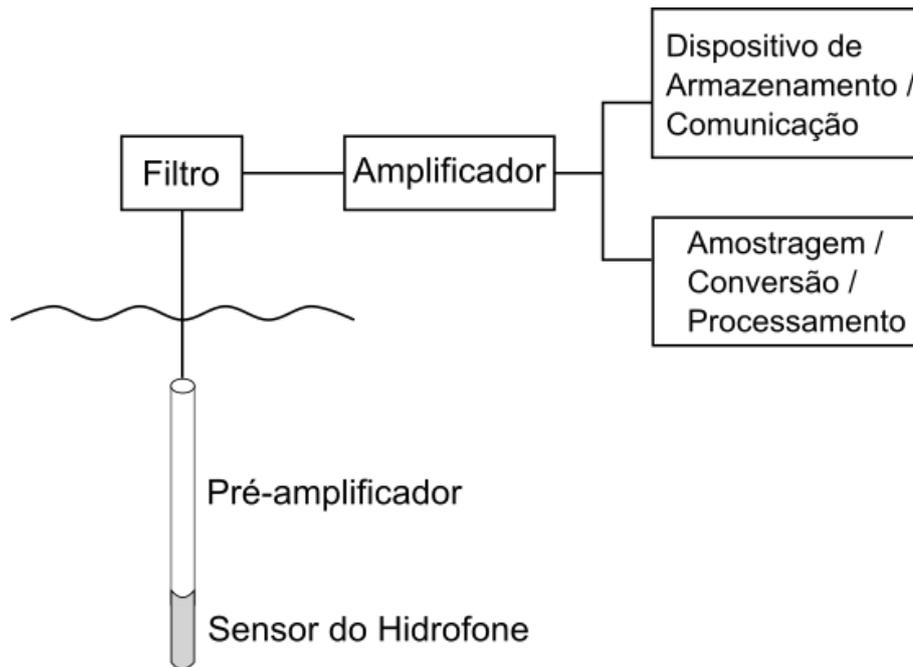


Figura 2.4: Componentes típicos para medição acústica submarina.
 Fonte: baseado em AU e HASTINGS (2008)

Uma vez apresentados diferentes tipos de sensores e instrumentos de medição, é salutar discutir alguns fatores relacionados à metrologia que devem ser considerados, tais como:

- **Calibração** - para garantir que os instrumentos estejam devidamente calibrados para fornecer medições precisas e consistentes. A calibração envolve comparar as medições dos sensores com padrões conhecidos e ajustar os instrumentos, se necessário (PECHEUX *et al.*, 2023).
- **Incerteza de Medição** - a incerteza associada às medições realizadas pelos sensores deve ser avaliada. Isso inclui entender os possíveis erros ou variações que podem ocorrer nas medições e documentar essas incertezas para garantir a qualidade dos dados. SKÅLVIK *et al.* (2023) abordam os desafios e limitações na garantia da qualidade dos dados de sensores submarinos, enfatizando a importância de estratégias de autovalidação para reduzir a incerteza de medição em ambientes marinhos extremos.
- **Normas e Padrões** - a metrologia também envolve a adesão a normas e padrões internacionais (como os do ISO, por exemplo) que estabelecem requisitos para a precisão e a confiabilidade dos instrumentos de medição (JIANG *et al.*, 2024).
- **Manutenção** - Manter os sensores em bom estado de funcionamento e verificar regularmente se eles continuam a operar dentro das especificações (SKÅLVIK *et al.*, 2023).

A aplicação de práticas metroológicas é essencial para melhorar a qualidade dos dados, permitindo medições consistentes e comparáveis ao longo do tempo e entre diferentes regiões. Conforme discutido no artigo de ROLLE *et al.* (2023), a metrologia desempenha um papel fundamental nesse contexto, assegurando que as medições de variáveis essenciais, como temperatura, salinidade e pressão, sejam precisas e rastreáveis a padrões internacionais.

2.1.2 Principais componentes e funcionamento básico

Além dos sensores e instrumentos de medição, outros diferentes tipos de componentes compõem um ODAS. A **Figura 2.5** apresenta um diagrama típico com elementos funcionais, os quais estão discutidos nesta seção.

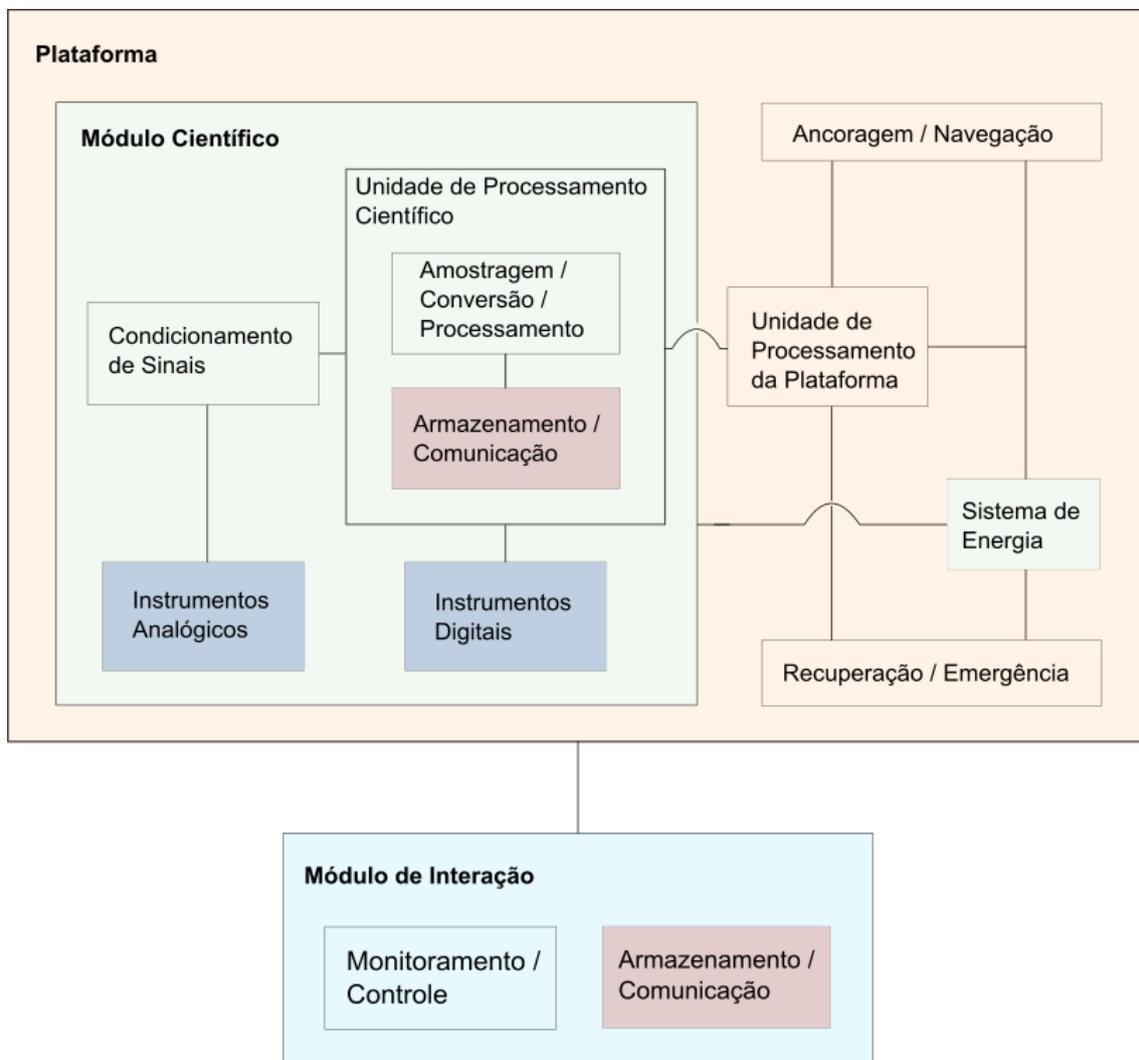


Figura 2.5: Diagrama de Blocos Funcionais para um ODAS típico

São descritos a seguir os principais elementos funcionais (**Figura 2.5**) de forma alinhada com as diferentes etapas da sequência de operações realizadas para coleta

dos dados (**Figura 2.1**), quando aplicável. Por exemplo, no tópico do Sistema de Condicionamento de Sinais, essa sequência de operações começa a ser discutida.

Vale destacar que será considerada nessa descrição a sequência de operações para sinais em forma analógica. Para instrumentos digitais, os dados já são recebidos na unidade de processamento do módulo científico de forma digitalizada, i.e., todo o processo inicial de condicionamento do sinal e digitalização já ocorre no próprio instrumento.

Plataformas

Os ODAS são projetados para diferentes tipos de plataformas, desde aquelas com menor complexidade, como estruturas localizadas em terra (píer, cais, entre outros), até aquelas mais complexas, como veículos autônomos, que estão sujeitos à dinâmica do oceano e precisam de componentes para navegação e auto localização. CHAI *et al.* (2020) apresenta uma linha do tempo de plataformas de observação oceanográfica e projetos internacionais para medição da biogeoquímica marinha. A plataforma funciona como suporte estrutural, fixo ou móvel, para todos os outros componentes, além de oferecer proteção contra o ambiente marinho, que é agressivo.

A seguir são discutidas algumas das plataformas mais comuns:

- **Veículos Autônomos**

Atualmente, diferentes tipos de veículos autônomos são amplamente utilizados como plataformas de ODAS. Entre eles, destacam-se os AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*), que podem operar para coleta de dados em áreas profundas e de difícil acesso (LIU *et al.*, 2024); os USV (*Unmanned Surface Vehicles*) ou ASV (*Autonomous Surface Vehicles*), que navegam na superfície do mar, realizando monitoramento ambiental e suporte a outras plataformas (TIAN *et al.*, 2024); e os UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), que realizam monitoramento aéreo, auxiliando na coleta de dados atmosféricos e na observação de vastas áreas oceânicas (MATSUDA e YOKOTA, 2023).

A empresa TerraDepth oferece um serviço inovador chamado "Dados do Oceano como Serviço" (ODaaS - *Ocean Data as a Service*), que fornece dados detalhados dos oceanos em escala global por meio de AUV. Para a TerraDepth, o uso desses veículos reduz a necessidade de mobilização de equipes ao mar, diminuindo significativamente o impacto ambiental em comparação com métodos tradicionais de pesquisa e aumentando a eficiência operacional com opções rápidas de implantação em qualquer lugar do mundo (WORLD ECONOMIC FORUM, 2023).

YAN e LI (2023) propuseram uma otimização inovadora para redes de observação oceânica, integrando planejamento de rotas e comunicação para AUV.

Eles desenvolveram algoritmos que otimizam a colocação de caixas de junção, minimizam a perda de energia em cabos submarinos e melhoram a eficiência da coleta de dados através de um algoritmo aprimorado de Grey Wolf Optimization (GWO), especialmente eficaz em áreas com topografia submarina sem variações abruptas.

Dentre os AUV, destacam-se os UG (*Underwater Gliders*), que basicamente se diferenciam do AUV convencional pela sua forma de propulsão. Nos UG, a propulsão não é realizada com uso de hélices, mas o movimento é controlado pela variação da flutuabilidade e do centro de massa do veículo. Com vantagens como baixo consumo de energia, longa autonomia e baixo ruído, os UG são essenciais para observações oceânicas. No entanto, sua baixa velocidade em relação às correntes pode causar desvios na trajetória, prejudicando a qualidade dos dados ou até mesmo levando ao afastamento das áreas de interesse. ZHANG *et al.* (2024) abordam a importância em utilizar métodos eficientes de planejamento de trajetórias para melhorar a eficácia dos UG e revisam diferentes soluções.

- **Boias**

LIN e YANG (2020) analisam alguns tipos de plataformas, chamadas por eles de tecnologias de observação oceânica, as quais incluem diferentes tipos de boias. Boias Ancoradas (*Moored Buoys*) são projetadas para medir variáveis meteorológicas e oceânicas na superfície do mar. Elas foram essenciais no desenvolvimento de modelos de previsão climática, como no estudo do fenômeno *El Niño*. Por outro lado, Boias Derivantes (*Drifting Buoys*) são utilizadas para monitoramento de correntes oceânicas e características da superfície do mar ao longo de trajetos determinados pelas correntes;

Outras definições podem incluir as Boias Meteoceanográficas (*Metocean Buoys*), que são plataformas flutuantes equipadas com uma variedade de sensores projetados para medir tanto parâmetros oceanográficos quanto meteorológicos (D'AGOSTINI *et al.*, 2024), e Boias de Perfilamento (*Profiling Buoys*), como os *Argo Floats*, que realizam perfilamento vertical da coluna d'água para medir parâmetros como temperatura e salinidade em diferentes profundidades (LIN e YANG, 2020).

As boias também são classificadas em Boias de Sistemas de Alerta (*Warning Systems*), que servem para monitorar eventos críticos, como tsunamis, e acesso em área restrita (HAQ *et al.*, 2019).

- **Estações Terrestres**

Também conhecidas como Estações Costeiras, são utilizadas para monitorar

o ambiente marinho (SILVA, 2019). Em algumas situações, onde a área de interesse é fixa e próxima à costa, especialmente em locais com estruturas como cais e píeres, é mais vantajoso instalar o ODAS em terra. Em comparação com uma boia, isso oferece vantagens como maior segurança do sistema e dos dados, maiores possibilidades de fonte de energia e de conectividade de rede.

Os desempenhos hidrodinâmico e estrutural, entre outros aspectos, devem ser estudados para a devida caracterização da plataforma do ODAS (CHEN *et al.*, 2023b; HONG *et al.*, 2024). O uso de superfícies super-hidrofóbicas em plataformas marinhas, veículos submarinos e sensores está sendo explorado e desenvolvido, com grande potencial para aplicações futuras. Segundo TANG *et al.* (2024), esses materiais oferecem vantagens significativas, como a redução de corrosão e *biofouling*, que é o processo de acúmulo de organismos biológicos, como algas, bactérias, cracas e outros micro e macro-organismos, na superfície de objetos submersos em ambientes aquáticos. A sua adoção comercial em larga escala ainda enfrenta desafios, especialmente em relação à durabilidade dos revestimentos em condições extremas.

Sistema de Ancoragem ou Navegação

Em plataformas fixas, como estações costeiras e boias ancoradas, o sistema de ancoragem garante a estabilidade e posicionamento dos equipamentos de coleta de dados. MAXWELL *et al.* (2010) mencionam que a confiabilidade do sistema de ancoragem é fundamental, pois a falha no ancoramento resulta na falha total do sistema de boias. Eles descrevem diferentes configurações de ancoragem, como o sistema de catenária inversa e o semi-esticado. Durante um *workshop* realizado pelo National Data Buoy Center (NDBC), foram discutidos métodos para aumentar a vida útil das ancoragens, enfatizando a necessidade de melhorar a especificação dos componentes e de adaptar as configurações de ancoragem às condições ambientais locais.

O estudo de ZHANG *et al.* (2023) detalha o uso de sistemas de ancoragem de boias para observatórios oceânicos, como o sistema MBOSBC (Cabo Eletro-óptico-mecânico Bentônico), que utiliza cabos eletro-óptico-mecânicos (EOM) para transmissão de energia e dados entre a superfície e o fundo do mar. Os cabos combinam o uso de componentes como o amortecedor de borracha (*snubber*), o que ajuda a mitigar as tensões dinâmicas causadas por ventos, ondas e correntes.

O sistema de navegação de um veículo submarino autônomo inclui diferentes componentes, tais como Propulsores Principais (*Main Thrusters*), Propulsores Horizontais e Verticais, que são os principais responsáveis pela movimentação, altímetro, para medir a altura do AUV em relação ao fundo e *Doppler Velocity Log* (DVL), localizado na parte inferior do casco para medir a velocidade também em relação ao fundo (SAWA *et al.*, 2005).

PAULL *et al.* (2013) discutem categorias de técnicas de navegação e localização de AUV, incluindo:

- **Inercial / Estimativa** Através de acelerômetros e giroscópios, forças de aceleração e as rotações do veículo podem ser medidos. Através dessas medições, o AUV calcula sua posição e orientação durante a operação. Essa técnica apresenta uma limitação de propagação de erro de posição ao longo do tempo.
- **Transponders e modems acústicos** O modem acústico no AUV emite um sinal em direção a *transponders*, que por sua vez respondem automaticamente com um sinal de retorno. O tempo de voo (TOF - *Time Of Flight*) pode ser calculado para cada *transponder* e através do valor da velocidade do som e de um processo geométrico (por exemplo, triangulação) pode ser determinada a posição do AUV.
- **Geofísica** As técnicas geofísicas aproveitam informações do ambiente ao redor do AUV para auxiliar na navegação. Elas podem incluir dados de características do fundo do mar, estruturas submarinas e propriedades da água. O AUV, equipado com sensores e algoritmos de processamento avançados, consegue detectar, identificar e classificar esses aspectos ambientais como "marcos" de navegação. Assim, ele compara o ambiente detectado com um mapa de referência, ajustando sua posição com base nas características observadas.

Sistema de Recuperação ou Emergência

Esse sistema é projetado para garantir a integridade e segurança do sistema e dos dados coletados em situações críticas ou de término de operação. Os casos de falhas ou condições que comprometam as operações incluem: perda de comunicação, avaria em componentes essenciais, mau funcionamento do sistema de energia, ou até condições ambientais adversas, como tempestades intensas. Ele pode incluir mecanismos automáticos para interromper a coleta de dados e salvar informações críticas em memória segura, além de ativar sistemas de localização e sinalização para facilitar a recuperação do equipamento (VON OPPELN-BRONIKOWSKI *et al.*, 2023).

Sistema de Energia

O sistema de energia de um ODAS deve ser projetado de modo a garantir a sua operação, que muitas das vezes pode durar meses. Essa energia deve ser suficiente para alimentar os componentes de coleta, processamento, armazenamento e transmissão de dados. Para os veículos submarinos não tripulados (UUV - *Unmanned Underwater Vehicle*), a forma de energia mais utilizada são baterias secundárias baseadas em íons de lítio (KWON *et al.*, 2024).

Existem diferentes fontes de energia que podem ser aplicadas, tais como:

- **Baterias de íon-lítio combinada com Energia solar**

Essas baterias são um tipo de bateria recarregável amplamente utilizada em ODAS. Elas armazenam energia através do movimento de íons de lítio entre o ânodo e o cátodo durante os ciclos de carga e descarga.

Para o ODAS ser autossuficiente, podem ser utilizados Painéis Solares Fotovoltaicos. É uma solução ideal para operações de longo prazo. Podem ser combinados com baterias para fornecer energia durante períodos sem sol (WANG *et al.*, 2023a).

- **Energia das ondas**

Sistemas que convertem o movimento das ondas em energia elétrica. Como consequência, um ODAS pode ser autossustentável, já que ele pode operar justamente na superfície dos oceanos (ALSHMEEL *et al.*, 2024).

- **Célula de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC)**

Gera eletricidade a partir de uma reação química entre hidrogênio e oxigênio, utilizando uma membrana de troca de prótons. Essa tecnologia tem alta densidade de energia, capacidade de propulsão independente de ar e operação silenciosa, o que a torna ideal para veículos submarinos de grande porte em missões de longa duração (KWON *et al.*, 2024).

Instrumentos

Na seção anterior foram apresentados diferentes instrumentos para medição das variáveis de interesse. Esse processo de medição de uma grandeza física presente no meio envolve o uso de sensores ou transdutores. O transdutor é responsável por converter a grandeza física em uma quantidade utilizável, como uma tensão ou corrente, enquanto o sensor detecta essa grandeza física. Além disso, a medição pode ser realizada por instrumentos, que são compostos por componentes adicionais, como sistemas de processamento de sinais. Por exemplo, um cristal piezoelétrico, atuando como transdutor, converte uma força ou pressão aplicada em uma tensão elétrica, permitindo a medição. Da mesma forma, um sensor de temperatura pode usar um transdutor para converter calor em uma variação de resistência elétrica, que é interpretada como temperatura (NORTHROP, 2014).

Para padronizar o texto deste trabalho, a partir deste ponto, será usado o termo "instrumento" para aqueles que são digitais e "sensor" para os analógicos.

Sistema de Condicionamento de Sinais

Para discutir o funcionamento básico desse sistema, são definidos alguns conceitos importantes:

- **SNR (*Signal-to-Noise Ratio*)**

Em campos da ciência que envolvem medidas de um sinal em meio ruidoso, é comum utilizar o conceito de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), que é um termo para a razão entre as potências de um sinal contendo algum tipo de informação e o ruído ambiente. Um SNR alto indica que o sinal útil está significativamente mais forte do que o ruído, resultando em uma melhor qualidade de dados. O sistema de condicionamento de sinal tem como objetivo maximizar o SNR, amplificando o sinal e filtrando o ruído.

- **Faixa Dinâmica**

Representa a diferença entre o nível mais baixo e o mais alto de sinal que um sistema consegue captar e processar sem distorção ou perda de qualidade. Se a faixa dinâmica de instrumento for limitada, ele poderá captar bem apenas sons em uma faixa intermediária.

- **Impedância**

Impedância é a oposição ao fluxo de corrente alternada e influencia diretamente a transferência de sinal entre estágios de um circuito. No condicionamento de sinais, o casamento de impedância é fundamental para manter a integridade do sinal. Em uma cadeia de medição acústica, por exemplo, uma alta impedância na entrada no amplificador preserva a tensão na entrada, sem queda. Com uma baixa impedância de saída no amplificador combinada com uma alta impedância na entrada do conversor ADC proporciona que o sinal de tensão transmitido seja preservado.

O sinal elétrico pode passar por um condicionamento do sinal. Isso inclui a filtragem e amplificação. Uma amplificação eficiente vai exigir que a impedância de saída do sistema de condicionamento seja fraca ou combinada, permitindo que o sinal flua de forma ideal entre diferentes partes do sistema. O uso de filtros busca melhorar a relação sinal-ruído (SNR), especialmente os filtros passa-baixa (*low-pass filters*), para evitar *aliasing*, que é um fenômeno que ocorre quando um sinal é amostrado em uma frequência menor do que o dobro da sua maior frequência (conhecida como frequência de Nyquist). Quando isso acontece, as componentes de alta frequência do sinal original "se sobrepõem" às de baixa frequência, criando distorções no sinal recuperado, o que impossibilita a reconstrução correta do sinal original a partir das amostras. O efeito de *aliasing* pode causar erros graves em processamento de sinais digitais (NORTHROP, 2014).

Unidade de Processamento

A unidade de processamento, muitas vezes chamada de *data logger* (LYMAN *et al.*, 2020), é o dispositivo eletrônico integrado e projetado para executar instruções e

operações de processamento de dados, permitindo a aquisição, o processamento, o armazenamento, e o gerenciamento de informações. Esses dispositivos são dotados de:

- Processador (CPU - *Central Processing Unit*), responsável por realizar cálculos, executar programas e tomar decisões com base nos dados recebidos;
- Memória Volátil (RAM - *Random Access Memory*), usada para armazenar dados temporários que podem ser acessados rapidamente pelo processador;
- Memória Não Volátil (*Flash*), usadas para armazenar o código do programa, comumente chamado de *Firmware*, e outros dados que precisam ser preservados mesmo quando o sistema está desligado;
- Periféricos de Entrada/Saída (I/O), permitem que a unidade de processamento interaja com instrumentos e outros dispositivos externos. Eles podem incluir portas digitais e analógicas, interfaces de comunicação (como I2C, SPI, UART), *timers*, ADC (Conversor Analógico-Digital), DAC (Conversor Digital-Analógico), entre outros.

Existem diferentes tipos dessas unidades de processamento, tais como:

- Microcontroladores (MCU), compactos e de baixo consumo de energia, frequentemente utilizados em *dataloggers* para aplicações de coleta de dados em campo. Eles são adequados para tarefas de processamento simples. Em grande parte de publicações recentes pesquisadas sobre desenvolvimento de ODAS, os microcontroladores são empregados;
- Microprocessadores, para sistemas que requerem maior capacidade de processamento. Eles são mais potentes que os microcontroladores e podem executar sistemas operacionais completos, como Linux. Um exemplo típico é o uso de Raspberry Pi (BABIĆ *et al.*, 2021); e
- Processadores de Sinal Digital (DSP - *Digital Signal Processor*), especializado em processamento de sinais digitais com foco em operações matemáticas rápidas e eficientes, ideal para aplicações de tempo real que exigem processamento intensivo de sinais. Também são aplicados a ODAS (WANG *et al.*, 2023b).

O *firmware* é o *software* responsável por controlar as funções básicas da unidade de processamento e a comunicação com outros componentes do sistema. Por exemplo, para fornecer instruções de amostragem, conversão e processamento dos dados coletados pelos instrumentos e condicionados pelos filtros e amplificadores. Através dele, também é possível controlar o próprio sistema de condicionamento do sinal (DE DEUS *et al.*, 2022).

Amostragem, Conversão e Processamento

O processo de digitalização do sinal condicionado envolve o uso de um Conversor Analógico-Digital (ADC - *Analog-to-Digital Converter*), que converte sinais analógicos contínuos em dados digitais discretos. Durante esse processo, um sinal analógico é amostrado periodicamente, e cada amostra é convertida em uma representação digital, geralmente binária, com um número limitado de *bits*. NORTHROP (2014) discute uma série de tipos de ADC, tais como o ADC de Aproximação Sucessiva (SAR, do inglês *Successive Approximate Register*) e o ADC do tipo Delta-sigma.

Uma vez de posse dos dados digitalizados, sejam oriundos de um instrumento analógico ou digital, eles podem ser processados na própria unidade de processamento do módulo científico. Por exemplo, uma *string* de dados de condutividade elétrica, temperatura e pressão de um instrumento CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), deve ser tratada para recuperação das informações ou até mesmo para rejeição, por exemplo, em erros de medida.

Armazenamento e Comunicação

Após a digitalização e tratamento dos dados, o seu armazenamento local é importante à luz de diferentes aspectos, como preservação dos dados brutos para análises futuras e criação de *backups*. Geralmente, são utilizados módulos de SD *Card*.

Uma vez que esses dados estão disponíveis digitalmente no ODAS, eles podem ser transmitidos de diferentes formas para uma estação em terra, usando interfaces e protocolos de comunicação. Em alguns casos, o ODAS pode estar próximo à costa ou até mesmo em um cais, o que possibilita uma comunicação por fio. Por outro lado, são exigidas transmissões sem fio para os ODAS que operam em áreas afastadas. Soluções incluem transmissão via satélite e via rádio.

Monitoramento e Controle

Quando esses dados chegam a um sistema receptor, outras tecnologias realizam pós-processamentos nesses dados, como análises em tempo real utilizando algoritmos para extrair diferentes parâmetros dos dados.

Os parâmetros de interesse são armazenados em banco de dados, muitas das vezes em nuvem, e são apresentados em interfaces *web* para o usuário (FURG, 2024).

Apesar de não ser um processo de caminho do dado, vale destacar que essa comunicação entre ODAS e estação em terra também pode incluir o envio e recebimento de comandos de controle do ODAS e o monitoramento de parâmetros dele próprio, como nível de bateria e temperatura interna.

Síntese sobre os componentes típicos em ODAS

As Tabelas 2.1 e 2.2, elaboradas pelo autor, apresentam uma síntese sobre os componentes típicos esperados em ODAS, de acordo com sua plataforma, baseada nas definições discutidas nesta seção.

Tabela 2.1: Componentes típicos de ODAS (parte 1)

| Componente | Função | Plataforma | | | |
|---|---|------------|---|----|----|
| | | B | V | ES | ET |
| Estrutura de Suporte ou Plataforma, como boias, veículos autônomos e invólucros instalados em terra | Prover estabilidade e proteção aos componentes instalados | X | X | X | X |
| Sistema de Ancoragem | Manter a plataforma em posição fixa no ambiente marinho | X | | X | |
| Sistema de Navegação | Controlar e orientar o movimento do veículo em tempo real | | X | | |
| Sistema de Localização | Emitir sinal de localização do dispositivo | X | X | X | |
| Sistema de Recuperação ou de Segurança ou de Emergência | Recuperar o ODAS em casos de falha ou condição que comprometa a operação | X | X | X | |
| Sensores ou Instrumentos de Medição | Medir parâmetros específicos, como temperatura da água, salinidade e parâmetros de onda | X | X | X | X |

Legenda: B - Boias, V - Veículos Autônomos, ES - Estação Submarina, ET - Estação Terrestre

Tabela 2.2: Componentes típicos de ODAS (parte 2)

| Componente | Função | Plataforma | | | |
|---|--|------------|---|----|----|
| | | B | V | ES | ET |
| Sistema de Energia | Fornecer energia necessária para operação contínua | X | X | X | X |
| Sistemas de Condição- namento de Sinal, como filtros e amplifi- cadores | Ajustar e otimizar os sinais adqui- ridos pelos sensores para proces- samento ou armazenamento | X | X | X | X |
| Unidades de Processa- mento, que podem in- cluir microcontrolado- res, unidades de arma- zenamento local, RTC (<i>Real-Time Clock</i>), in- terface de interação lo- cal com o usuário e interface de comunica- ção com os sensores ou instrumentos | Digitalizar, Processar e Armaze- nar os dados coletados | X | X | X | X |
| Sistema de Comunica- ção | Transmitir dados e comandos en- tre o ODAS e um centro de con- trole | X | X | X | X |
| Sistema de Processa- mento e Armazena- mento Externo | Processar e armazenar dados de forma centralizada fora da plata- forma, possibilitando análise mais detalhada e armazenamento de longo prazo | X | X | X | X |
| Sistema de Controle e Monitoramento | Gerenciar e supervisionar o funci- onamento do ODAS, permitindo o controle remoto e monitora- mento em tempo real de dados de interesse | X | X | X | X |

Legenda: B - Boias, V - Veículos Autônomos, ES - Estação Submarina, ET - Estação Terrestre

2.1.3 Tipos de Aplicação

Diferentes categorias para aplicações de ODAS têm sido discutidas por diversos autores (FRANZ *et al.*, 2021; KULLENBERG *et al.*, 2021; PEARLMAN *et al.*, 2019).

Aplicações de monitoramento marinho utilizando veículos não tripulados, por exemplo, incluem: monitoramento de características físicas, bioquímicas e ecossistêmicas marinhas, de poluição, como derramamento de óleo e avaliação de resíduos plásticos, e aerossóis (YUAN *et al.*, 2023).

LIM *et al.* (2023) discutem ainda outras definições de aplicações para um Sistema Marinho Autônomo (AMS): mapeamento subaquático, observação de vida marinha, monitoramento da saúde costeira, aquicultura e monitoramento da qualidade da água, rastreamento de frentes oceânicas e detecção e rastreamento de plumas.

Nesta seção, são apresentadas pesquisas recentes em alguns desses contextos.

Monitoramento de regiões remotas

WÖLFL *et al.* (2019) abordam os avanços e desafios do mapeamento do fundo do mar em uma escala global, com ênfase no uso de dados batimétricos para monitoramento ambiental, navegação segura e conservação marinha. A pesquisa destaca a importância da colaboração internacional e de tecnologias autônomas, como veículos subaquáticos, para expandir o mapeamento em áreas remotas.

FAN *et al.* (2024) apresentam uma revisão abrangente sobre o uso de AUVs em regiões polares, abordando avanços, desafios tecnológicos e aplicações futuras dessa tecnologia. O estudo destaca as principais dificuldades enfrentadas pelos veículos nesses ambientes, como navegação sob gelo, prevenção de obstáculos e desafios de comunicação e energia. Além disso, os autores discutem aplicações como mapeamento de gelo, investigação ecológica e monitoramento geofísico, enfatizando a importância desses veículos no entendimento das interações entre oceano e gelo e no apoio às estratégias de proteção ambiental polar.

Navegação e Segurança Marítima

GENTILI *et al.* (2023) conduziram testes experimentais com sensores de Monitoramento Acústico Passivo (PAM) em áreas portuárias de Gênova e La Spezia, usando veículos autônomos subaquáticos para estimar a direção de chegada de sinais acústicos. Esse estudo demonstra a aplicabilidade de sensores PAM para monitoramento em ambientes portuários, destacando seu potencial para reforçar a segurança e vigilância em áreas de grande movimentação marítima.

HELAL *et al.* (2024) exploram a eficácia dos planadores autônomos subaquáticos no monitoramento de ruído oceânico, especialmente o ruído antropogênico emitido

por embarcações. A revisão sistemática investiga como esses veículos podem atuar como alternativas aos sistemas de monitoramento ancorados, destacando sua autonomia estendida e baixa assinatura de ruído, que os tornam eficazes para a avaliação das assinaturas acústicas de embarcações e o impacto do ruído nas áreas marinhas.

Eventos de intrusão de águas frias do Atlântico Sul Central (SACW) que alteraram significativamente os perfis de velocidade do som e a estratificação térmica da água foram identificados, revelando pela primeira vez os impactos na enseada dos Anjos, em Cabo Frio, RJ. A operação utilizou o ODAS "IARA" (*Integrated Acquisition System for Research in Acoustics*), composto por termômetros digitais e um sensor de nível do mar (LOPES et al., 2024). Os dados coletados dessas características físicas do mar na região para prever a variabilidade horizontal da estratificação térmica permitem estimar a distância de detecção de sonares (LOPES et al., 2024).

Gestão de Recursos Marinhos

CAUCHY et al. (2023) destacam as aplicações de planadores acústicos passivos - PAM (*Passive Acoustic Monitoring*) *gliders* - como ferramentas promissoras para monitoramento acústico no oceano para observações de longo prazo de populações marinhas, estimativas de densidade e respostas rápidas a detecções em tempo real. Além disso, é discutida a capacidade de coleta de dados em três dimensões, devido ao perfilamento vertical dos planadores, permitindo uma cobertura espacial superior à das observações estacionárias.

KIM et al. (2023) apresentam um método automatizado chamado *SoundScape Learning* (SSL) para separar coros de peixes em paisagens sonoras marinhas. Esse método utiliza análise de componentes principais robusta e redes neurais para identificar e classificar sons em paisagens acústicas complexas, possibilitando o monitoramento de populações e a compreensão de interações ambientais de forma não invasiva. A técnica é especialmente útil para a diferenciação de coros de peixes de ruídos antropogênicos, contribuindo para a conservação de espécies vulneráveis e a análise de impactos de atividades humanas no ecossistema marinho.

BARROSO et al. (2023) examinaram o uso de inteligência artificial (IA) para identificar e caracterizar sons de peixes, destacando o sucesso crescente de algoritmos de aprendizado de máquina (ML) e aprendizado profundo (DL) na detecção e classificação desses sons. O artigo aponta direções para pesquisas futuras, como separação de fontes e ampliação de dados, enfatizando a necessidade de uma biblioteca de sons de peixes validada. Para os autores, o avanço nesses aspectos, a combinação de IA e acústica passiva promete tornar o PAM uma ferramenta eficaz para auxílio às atividades relacionadas.

2.2 Avaliação da maturidade tecnológica

Nesta dissertação, são utilizados os conceitos da escala TRL (*Technology Readiness Level*) e a sua adaptação STRL (*Software Technology Readiness Level*) para avaliar o *hardware* e o *firmware* do ODAS proposto ao longo do seu desenvolvimento. São apresentados os conceitos básicos e abordagens de diferentes autores para essas escalas, bem como sua aplicação no contexto de projetos que envolvem ODAS.

2.2.1 Escalas TRL

Com o aumento da complexidade dos programas espaciais nos anos 70, surgiu a necessidade de avaliar a maturidade das tecnologias envolvidas. Em 1974, um pesquisador da NASA propôs a primeira escala de Níveis de Maturidade Tecnológica (TRL), que foi formalmente adotada em 1989 (SALAZAR e RUSSI-VIGOYA, 2021). Originalmente composta por 7 níveis, conforme apresentada na **Tabela 2.3**, essa escala permitia avaliar a maturidade de tecnologias em projetos espaciais, identificando os riscos técnicos, financeiros e cronológicos ao longo do ciclo de vida dos projetos. O objetivo da escala é mensurar o desempenho, confiabilidade, durabilidade e adequação operacional das tecnologias no ambiente esperado (SADIN *et al.*, 1989; SALAZAR e RUSSI-VIGOYA, 2021).

Tabela 2.3: Escala TRL original. Fonte: adaptado de SADIN *et al.* (1989)

| Níveis | Definições |
|--------|---|
| TRL 1 | Princípios básicos observados e relatados |
| TRL 2 | Aplicação potencial validada |
| TRL 3 | Prova do conceito demonstrada analiticamente e/ou experimentalmente |
| TRL 4 | Protótipo básico validado em ambiente laboratorial |
| TRL 5 | Protótipo básico validado em ambiente simulado ou real |
| TRL 6 | Adequação do sistema validado em ambiente simulado |
| TRL 7 | Adequação do sistema validado em ambiente real |

Na década de 1990, a escala sofreu uma expansão de 7 para 9 níveis, e pela primeira vez eles foram descritos e exemplificados, detalhadamente, e os custos de progressão de nível foram discutidos, conforme apresentado nas **Tabelas 2.4** e **2.5** (MANKINS, 1995, 2009).

Tabela 2.4: Reformulação da escala TRL com 9 níveis (década de 90) - parte 1. Fonte: adaptado de MANKINS (1995, 2009)

| Níveis | Custos para alcance |
|--|--|
| <p>TRL 1 – Princípios básicos observados e relatados: Observação e relato de princípios científicos básicos, que começam a ser traduzidos em pesquisa e desenvolvimento mais aplicados</p> | <p>Muito Baixo Atualização por MANKINS (2009): Depende da tecnologia, podendo ser maior que o custo do próprio sistema</p> |
| <p>TRL 2 – Conceito de tecnologia e/ou aplicação formulada: Os princípios observados são aplicados em conceitos de tecnologia que ainda são especulativos e sem prova experimental</p> | <p>Muito Baixo Atualização por MANKINS (2009): Baixo</p> |
| <p>TRL 3 – Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito característica: Nesta etapa, são realizados estudos analíticos e experimentos de laboratório para validar o conceito tecnológico, estabelecendo uma "prova de conceito"</p> | <p>Baixo Atualização por MANKINS (2009): Baixo a Moderado</p> |
| <p>TRL 4 – Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente de laboratório: Os elementos tecnológicos são integrados e testados em um ambiente de laboratório para validar a funcionalidade básica</p> | <p>Baixo a Moderado Atualização por MANKINS (2009): Moderado</p> |
| <p>TRL 5 – Validação de componente e/ou placa de ensaio em ambiente relevante: A fidelidade do componente aumenta, sendo testado em um ambiente que simula o uso operacional real</p> | <p>Moderado Atualização por MANKINS (2009): Moderado a Alto</p> |

Tabela 2.5: Reformulação da escala TRL com 9 níveis (década de 90) - parte 2. Fonte: adaptado de MANKINS (1995, 2009)

| Níveis | Custos para alcance |
|--|---|
| <p>TRL 6 – Demonstração de Modelo / Protótipo de Sistema / Subsistema em um ambiente relevante (solo ou espaço): Um modelo ou protótipo do sistema é testado em um ambiente relevante para confirmar seu desempenho</p> | Específico da Demonstração e Tecnologia |
| <p>TRL 7 – Demonstração do protótipo do sistema em ambiente espacial: Um protótipo próximo ao sistema final é testado no ambiente operacional esperado</p> | Específico da Demonstração e Tecnologia - Maior que o custo de TRL 6 |
| <p>TRL 8 – Sistema real concluído e “voo qualificado” por meio de teste e demonstração (solo ou espaço): O sistema é finalizado, com todas as tecnologias integradas e passa por testes rigorosos para garantir que atenda aos requisitos funcionais. Este nível marca o término do desenvolvimento principal</p> | Específico da Missão e Tecnologia - Maior que o custo de TRL 7 e de TRL 9 |
| <p>TRL 9 – Sistema real “comprovado em voo” por meio de operações de missão bem-sucedidas: A tecnologia é implantada em um sistema real e opera com sucesso em sua aplicação final. É neste nível que os últimos ajustes e correções são feitos, assegurando que todos os aspectos do desenvolvimento do sistema estejam completamente resolvidos</p> | Específico da Missão e Tecnologia – Menor que o custo de TRL 8 |

A escala TRL foi adotada e adaptada por diversas organizações ao redor do mundo, incluindo agências governamentais, indústrias e instituições acadêmicas (MANKINS, 2009). Em 1999, o Government Accountability Office (GAO) dos Estados Unidos recomendou ao Departamento de Defesa a adoção da escala TRL e foi formalmente apresentada no início dos anos 2000 (DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005; GAO, 1999).

Segundo o Manual de Engenharia de Sistemas da NASA, muitos problemas em

novos projetos tecnológicos resultam da incerteza inicial, especialmente pela falta de compreensão da maturidade tecnológica e das reservas de custo e cronograma necessárias para garantir a viabilidade do projeto. A prática de avaliação da prontidão tecnológica (TRL) minimiza esses problemas e ajuda a definir o escopo do programa. Embora as descrições de TRL pareçam simples, a terminologia é um desafio, sendo essencial criar definições consistentes e contar com uma equipe experiente para a avaliação.

A **Figura 2.6** apresenta outras segregações para os níveis TRL em diferentes grupos, para um melhor entendimento do conceito da escala (HENSEN *et al.*, 2015; NASA, 2016).

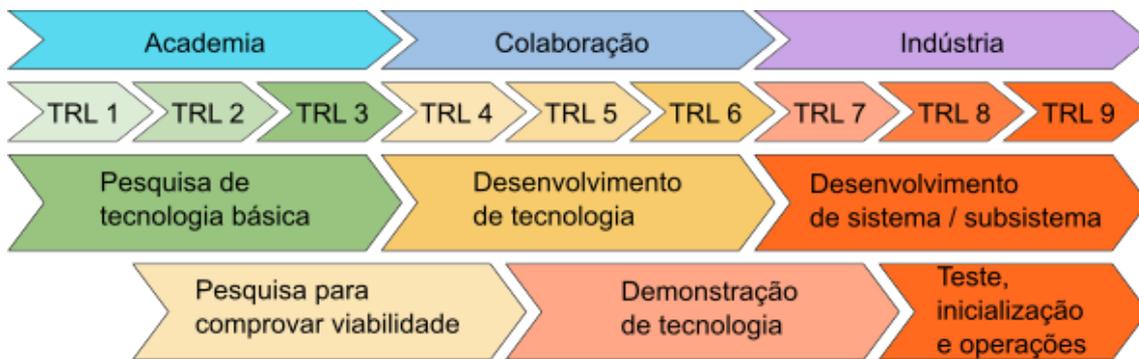


Figura 2.6: Níveis TRL em diferentes estágios de desenvolvimento. Fonte: adaptado de HENSEN *et al.* (2015); NASA (2016)

A escala TRL é eficaz para comunicar o *status* de novas tecnologias entre organizações e é a base dos processos modernos de Avaliação de Prontidão Tecnológica (TRA - *Technology Readiness Assessment*). Além dos TRL, deve ser considerado incluir métricas que avaliem o risco do desenvolvimento para o TRA, como a Metodologia de Análise Integrada de Tecnologia (ITAM) e o Grau de Dificuldade em Pesquisa e Desenvolvimento (R&D3) (MANKINS, 2009).

ALTUNOK e CAKMAK (2010) adaptaram uma calculadora de TRL, para avaliar a maturidade tecnológica de *hardwares* e *softwares*. A ferramenta usa perguntas padronizadas para garantir avaliações consistentes, ajudando na gestão de risco e tomada de decisões em projetos complexos.

O Comitê Técnico “Aeronaves e veículos espaciais” da ISO (*International Organization for Standardization*) formulou, em 2013, a ISO 16290:2013, a qual define uma norma internacional para os níveis TRL e seus critérios de avaliação. Para a sua produção, foram considerados os trabalhos relativos ao método TRL desenvolvidos pela NASA, pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) e por instituições espaciais europeias (DLR – Centro Aeroespacial Alemão, CNES – Centro Nacional de Estudos Espaciais, da França, e ESA – Agência Espacial Europeia). Ainda, segundo a norma, o procedimento detalhado para a avaliação do TRL deve

ser definido pela organização ou instituto responsável pela atividade (ISO, 2013).

Alguns dos conceitos importantes são definidos como (ISO, 2013):

- **Ambiente de Laboratório:** Ambiente controlado necessário para demonstrar os princípios fundamentais e o desempenho funcional de um elemento. Esse ambiente não necessariamente representa o ambiente operacional final do elemento, mas é utilizado para realizar testes iniciais e validar funções em um contexto controlado;
- **Ambiente Relevante:** é definido como o subconjunto mínimo do ambiente operacional necessário para demonstrar as funções críticas do desempenho de um elemento em condições próximas às de sua aplicação final. Esse ambiente permite testar e verificar as funções essenciais do elemento, mesmo que não inclua todas as condições do ambiente operacional completo, mas sim aquelas indispensáveis para comprovar o desempenho em situações semelhantes às reais; e
- **Ambiente Operacional:** Conjunto de condições naturais e induzidas que restringem o elemento, desde seu *design* até a operação.

WHITE *et al.* (2022) analisaram o conceito, a prática e aplicabilidade do TRL, e apresentaram uma calculadora adaptada para desenvolver tecnologias de detecção precoce de pragas de plantas. A calculadora, baseada em um questionário, agrupou as questões em três categorias: (1) Desenvolvimento de Tecnologia, (2) Tecnologia e Implantação e (3) Desenvolvimento de Negócios. A ferramenta mostrou potencial para promover inovação e superar a lacuna entre prova de conceito e comercialização.

No Brasil, a empresa EMBRAPPII adotou o uso da escala TRL e fez adaptações para incluir aplicações específicas, como fármacos e biofármacos, demonstrando a flexibilidade do modelo para diferentes setores tecnológicos (EMBRAPPII, 2020). Em 2024, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) apresentou um guia prático para avaliar a maturidade tecnológica no setor de energia elétrica (ANEEL, 2024).

No contexto militar, mais especificamente na Marinha do Brasil, a escala TRL tem sido adotada em conjunto com modelos para o Ciclo de Pesquisa, Desenvolvimento e “Produção” (Cadeia Logística) e segrega esses projetos para diferentes Órgãos de Direção Setorial (ODS), de acordo com o nível TRL atual. Ainda são adotados modelos de contratação tripartite ou quaripartite, envolvendo a Marinha do Brasil, fundações de apoio e empresas fabricantes e comercializadoras (MARINHA DO BRASIL, 2024).

Adaptação para *softwares*

A escala TRL foi adaptada por diferentes autores para uma escala STRL (*Software Technology Readiness Level*). A NASA implementou definições para avaliação da

maturidade de *softwares*. ARMSTRONG (2010) aborda as adaptações dos Níveis de Prontidão Tecnológica (TRL) ao *software*, realizadas pela NASA e pelo DoD dos Estados Unidos, destacando que o foco original da escala era em *hardware* e que o conceito de "tecnologia" não foi devidamente abordado para *software*. Ele aponta que os esforços existentes tratam mais da maturidade de *design* de produtos específicos do que da prontidão tecnológica de *software* como um todo. A ESA também fez adaptações para o uso da escala TRL no desenvolvimento de *software*, integrando-a em seus manuais para avaliar a maturidade de tecnologias nesse setor (HÉDER, 2017).

FERREIRA e RIBEIRO (2024) comparam a evolução de adaptações para a escala STRL e destacam a crescente relevância dessa escala como ferramenta para avaliar e direcionar investimentos em tecnologia de *software*, considerando as políticas públicas e os financiamentos governamentais voltados ao setor. O estudo evidencia como o Brasil tem incorporado o conceito de níveis de prontidão tecnológica, adaptando-o às especificidades locais, incluindo a implementação de metodologias pelo MCTI e EMBRAPPII. A **Tabela 2.6** apresenta uma dessas adaptações.

Tabela 2.6: Definições dos níveis da escala STRL. Fonte: EMBRAPPII (2020)

| Níveis | Definições |
|--------|--|
| STRL 1 | Início da conceituação básica provendo o detalhamento da " for- mulação matemática ". |
| STRL 2 | " Algoritmos " ou funções básicas são prototipadas e documentadas. |
| STRL 3 | Algoritmos são executados e testados em processador representativo, em laboratório. " Protótipo " |
| STRL 4 | Componentes básicos do <i>software</i> são integrados para estabelecer trabalharão juntos. " Earliest version " |
| STRL 5 | Todos os componentes do <i>software</i> são integrados em versão realística. O software é testado em ambiente controlado nas instalações do desenvolvedor. " Versão alfa " |
| STRL 6 | Protótipo completo é testado em ambiente virtual ou simulado. O software ainda está em desenvolvimento. " Versão beta " |
| STRL 7 | Verificação e validação são concluídas, a validade da solução é confirmada dentro do aplicativo pretendido. A especificação de requisitos é validada pelos usuários. O suporte de engenharia e organização de manutenção, incluindo o serviço de assistência técnica, estão em vigor. " Product release " |
| STRL 8 | Fim do desenvolvimento do sistema. Inclui teste e avaliação no sistema pretendido quanto às suas especificações. O resultado é versão de produção com configuração controlada. Documentação completa. " General product " |
| STRL 9 | Representa a aplicação real do software em sua forma final e sob condições projetadas, como as encontradas no teste operacional na aplicação. " Live product ", software em uso. |

Com base nas pesquisas realizadas, a **Figura 2.7** ilustra uma síntese de vantagens de uso e adaptação dessas escalas.

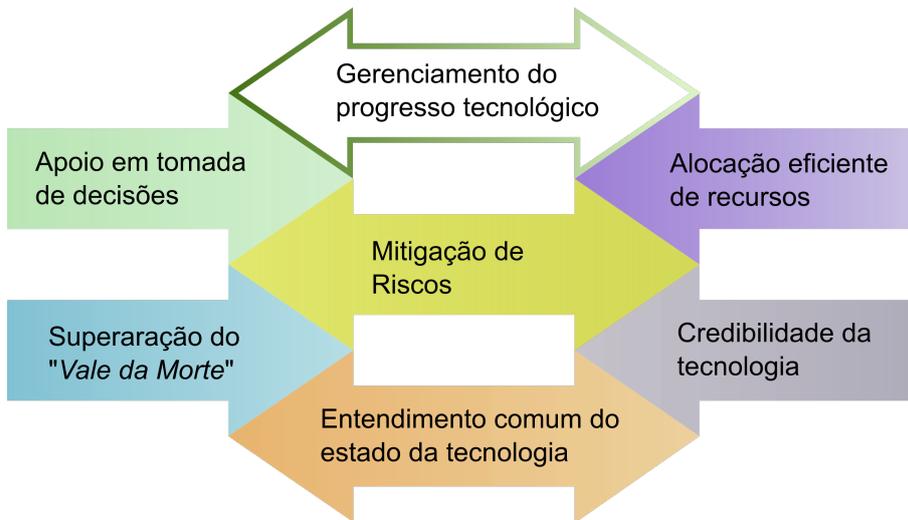


Figura 2.7: Vantagens do uso e adaptações da escala TRL. Fonte: adaptado de COSTA (2024); HÉDER (2017); MANKINS (2009); SALAZAR e RUSSI-VIGOYA (2021); WHITE *et al.* (2022)

Vale da Morte

Nesse contexto, o "Vale da Morte" refere-se ao período em que uma tecnologia, após ser demonstrada, enfrenta dificuldades para obter financiamento e avançar para a comercialização. Esse problema ocorre porque o governo considera a tecnologia muito aplicada para financiamento, enquanto o setor privado hesita devido aos riscos de implementação. Essa barreira é especialmente evidente na União Europeia, onde muitas tecnologias avançam em pesquisa teórica (níveis baixos de TRL), mas raramente chegam ao mercado devido a desafios nos níveis intermediários e finais de desenvolvimento. Para mitigar esses obstáculos, recomenda-se a formação de parcerias estratégicas entre governo e setor privado, simplificação dos processos regulatórios e incentivos financeiros para atrair investidores, promovendo a comercialização de tecnologias inovadoras (FRANK *et al.*, 1996; HÉDER, 2017).

Para COSTA (2024) muitas tecnologias promissoras falham em alcançar o mercado devido à falta de maturidade ou preparação inadequada. Ao utilizar a escala TRL, as empresas podem identificar o estágio de desenvolvimento de uma tecnologia, permitindo uma melhor alocação de recursos e aumentando as chances de sucesso comercial. Esse é o estágio (TRL 4-6) em que os projetos precisam de um alto aporte de investimento, mas com um risco elevado. A **Figura 2.8** ilustra como esse conceito está relacionado ao dispêndio do projeto durante o seu ciclo de vida.

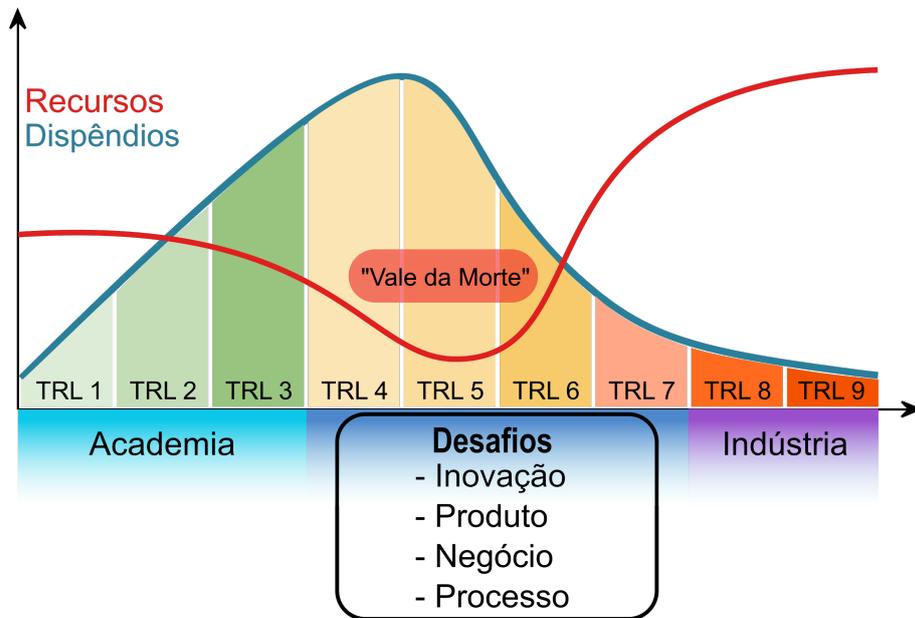


Figura 2.8: Comparativo do dispêndio dos projetos e “Vale da Morte”. Fonte: adaptado de COSTA (2024); HENSEN *et al.* (2015)

BOGOVIN e VIDISHCHEVA (2021) exploraram um modelo para a comercialização de resultados de atividades de inovação e pesquisa em universidades, destacando como os níveis iniciais da escala, frequentemente limitados a descobertas científicas básicas e provas de conceito, representam um desafio para a transformação em produtos comercializáveis. Para superar essa barreira, o estudo propõe a criação de centros de prova de conceito (PoCCs), que auxiliam pesquisadores a validar o potencial comercial de suas invenções nos primeiros estágios, reduzindo o risco e aumentando a viabilidade de avanços até os estágios mais altos de TRL, onde a tecnologia está pronta para a introdução no mercado.

2.2.2 Adaptações para Avaliação TRL no contexto de tecnologias do ambiente marinho

WALDMANN *et al.* (2010) apresentaram o *Ocean Sciences Technology Readiness Levels* (OS-TRL) para medição da maturidade de tecnologias de sensores para observação oceânica global, o qual agrupa os nove níveis da escala TRL em 4 níveis OS-TRL:

- OS-TRL 1: Prova de Conceito / Desenvolvimento (TRL 1-3);
- OS-TRL 2: Prototipagem de Pesquisa (TRL 4-6);
- OS-TRL 3: Produto Comercial (TRL 7-8); e
- OS-TRL 4: Missão Comprovada (TRL 9)

BIRCHILL *et al.* (2021) integraram um analisador microfluídico de fosfato em um planador subaquático para determinar as concentrações de fosfato no norte do

Mar do Norte na Europa. A escala OS-TRL apresentada por WALDMANN *et al.* (2010) foi aplicada ao desenvolvimento e foi obtida uma classificação “3 - Produto Comercial”.

A escala TRL foi utilizada no *Ocean Observatories Initiative* (OOI) para determinar o estado de prontidão tecnológica de sensores e infraestrutura, garantindo que as tecnologias empregadas fossem adequadas para condições ambientais reais e operacionais (BRASSEUR *et al.*, 2010). Ela foi adaptada para uma escala denominada OOI TRL, com 5 níveis:

- OOI TRL 1: Prova de Conceito / Desenvolvimento;
- OOI TRL 2: Pesquisa de Protótipo;
- OOI TRL 3: Pesquisa Comprovada;
- OOI TRL 4: Comercial; e
- OOI TRL 5: Operacional

Uma matriz que combina a escala TRL com uma escala TPL (*Technology Performance Levels*) foi utilizada para avaliar, comparar e discutir trajetórias de desenvolvimento de tecnologias de conversores de energia de onda (WEC - *Wave Energy Converters*) (WEBER, 2012). Esse modelo permite mapear a prontidão comercial e o desempenho econômico dessas tecnologias. Dois domínios principais de desenvolvimento — Pesquisa e Demonstração — foram identificados, com ênfase em um princípio orientador: priorizar o desempenho antes da prontidão. Essa abordagem visa otimizar tempo, custo e risco no desenvolvimento de tecnologias WEC, promovendo alto desempenho econômico e prontidão tecnológica. À medida que o setor se consolida, o uso de métricas objetivas de desempenho se torna essencial para orientar a concorrência entre tecnologias de energia renovável (WEBER, 2012).

ROLIN (2014) implementaram e aplicaram um questionário baseado na escala TRL para definir o status do desenvolvimento de produtos “NeXOS” de diferentes tipos – sensor, *software*, plataforma e componente – através de entrevistas e reuniões remotas entre o consórcio “NeXOS” e outros projetos relacionados. O autor apresenta um diagrama para o desenvolvimento dos produtos com diferentes processos (**Figura 2.9**), por exemplo, estudo de mercado e requisitos do sistema do sensor, e relaciona cada um deles com diferentes critérios de avaliação TRL. As discussões e conclusões dos autores incluem o importante papel do uso do método TRL nas avaliações dos desenvolvimentos para identificar problemas que não foram resolvidos (ou esquecidos).

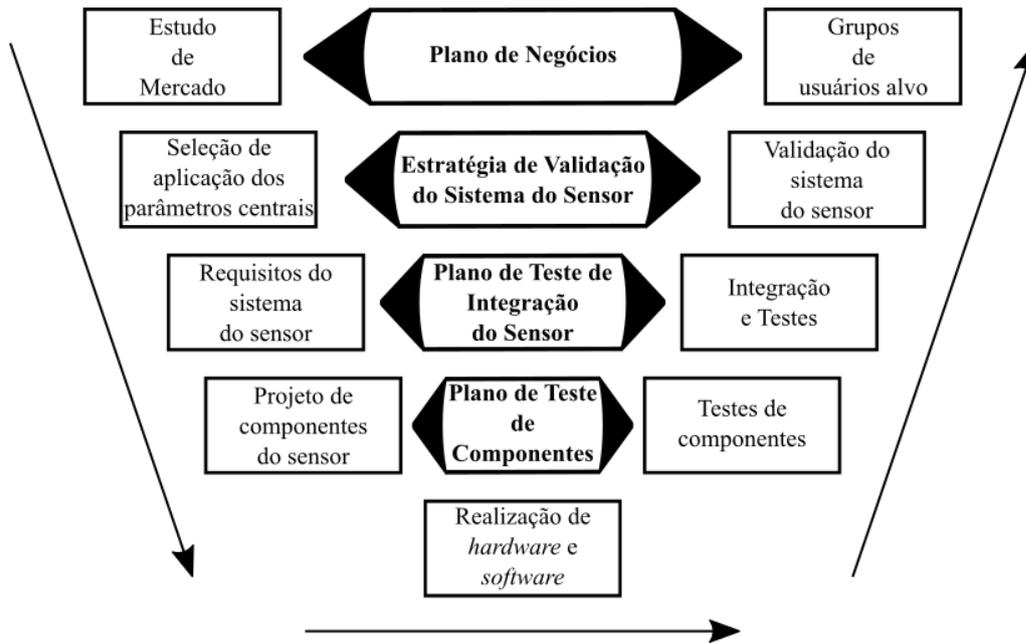


Figura 2.9: Diagrama “V” do processo de desenvolvimento do NeXOS. Fonte: adaptado de ROLIN (2014)

MARTZ *et al.* (2015) aplicaram a escala TRL para avaliar o estágio de maturidade de alguns sensores de monitoramento de acidificação dos oceanos. Os sensores de pH autônomos, por exemplo, alcançaram TRL 7, evidenciando capacidade de operação em ambiente real com resultados robustos e confiáveis para pesquisas de acidificação oceânica. Outros instrumentos, como analisadores contínuos de CO_2 , também progrediram até o TRL 6, permitindo medições em sistemas de fluxo, o que demonstra sua prontidão para aplicações experimentais, mas ainda requer melhorias para alcançar TRLs mais elevados e atender a demandas de precisão em monitoramento contínuo de alta resolução.

A escala TRL foi utilizada para avaliar o desenvolvimento de uma tecnologia de monitoramento *in situ* contínuo da qualidade da água e a detecção de hidrocarbonetos em níveis extremamente baixos em uma plataforma *offshore*. Inicialmente, essa tecnologia alcançou o nível TRL 2 para detecção de vazamento de hidrocarbonetos, indicando que estava no estágio de formulação de conceito e aplicação. Em relação ao monitoramento contínuo da qualidade da água, os experimentos preliminares realizados em diferentes condições naturais elevaram a tecnologia ao nível TRL 4, classificado como piloto experimental (BLANC *et al.*, 2017).

Segundo PRIEN (2007), para que a instrumentação *in situ* cumpra o potencial de alto impacto na ciência oceanográfica, a comunidade científica tem que encontrar mecanismos para preencher a lacuna de financiamento que existe entre os níveis TRL 5 e TRL 8, que apresentam altos riscos para a tecnologia ser financiada, o que está relacionado com o conceito do "Vale da Morte".

(MALALI e MARCHAND, 2020) avaliaram as maturidades tecnológica de siste-

mas de conversão de energia de ondas oceânicas (OWECS) disponíveis atualmente, usando a escala TRL. Foram analisados 20 dispositivos destinados a locais *onshore*, *nearshore* e *offshore*, considerando seu nível de maturidade técnica e funcionalidade em ambientes reais ou simulados. A classificação TRL variou de 2 a 9, indicando desde conceitos iniciais até sistemas plenamente operacionais.

A escala TRL tem sido utilizada para apoiar decisões políticas e técnicas no monitoramento de lixo plástico no ambiente marinho ALIANI *et al.* (2023); SANDRA *et al.* (2023).

ALIANI *et al.* (2023) apresentam a escala TRL como uma das ferramentas que permitirão a validação sistemática e a harmonização global dos métodos de monitoramento da poluição plástica.

SANDRA *et al.* (2023) fornecem uma visão abrangente das tecnologias potencialmente viáveis para a detecção *in situ* de plásticos em ambientes marinhos, destacando que a maioria delas atualmente se encontra em estágios TRL baixos a médios, o que ainda exige diversas etapas de desenvolvimento, testes e comercialização antes de poderem ser aplicadas de modo eficaz no ambiente real. Neste estudo, objetivos que caracterizam o produto final buscado foram definidos e serviram para determinar os níveis TRL de cada tecnologia. Para SANDRA *et al.* (2023), além do uso da escala TRL, é essencial utilizar esses objetivos como uma avaliação de comparabilidade entre as diferentes tecnologias para garantir a adequação dos dados de monitoramento à sua finalidade e que eles sejam comparáveis entre estudos que empregam diferentes abordagens analíticas.

CIANCA *et al.* (2023) destacam o uso da escala TRL como ferramenta para avaliar o progresso tecnológico de veículos de superfície autônomos (ASV) no contexto do monitoramento e observação do oceano, considerando aplicações em redes de observação como o EuroSea e iniciativas globais. Para os ASV, o artigo observa que a tecnologia está em estágios avançados de maturidade (TRL 8-9) em muitos casos, permitindo operações autônomas prolongadas e coleta de dados em grande escala. É ressaltado que os ASV desempenham um papel importante na modernização das redes de observação oceânicas, alinhando-se a estratégias internacionais como a EOOS (*European Ocean Observing System*) e o GOOS (*Global Ocean Observing System*).

A agência científica National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) tem adotado o uso da escala RL (*Readiness Levels*), que se aplica a diferentes tipos de projetos de P&D, incluindo produtos ou processos relacionados a tecnologias oceânicas, facilitando a transição de pesquisas para operações, aplicações, produtos comerciais ou outros usos. Em maio de 2020, a NOAA organizou um *workshop* virtual para discutir o uso e os desafios da escala RL, explorando melhorias na aplicação dessa métrica e sua relevância em projetos de P&D, incluindo tecnologias

oceânicas. O evento reuniu cerca de 50 participantes e teve como objetivo ajustar definições e categorização de itens em transição (como ferramentas e processos), visando uma avaliação mais consistente e precisa da maturidade tecnológica. Além disso, o *workshop* reforçou a importância de definir níveis de prontidão específicos para que projetos complexos avancem de maneira estruturada, permitindo à NOAA aprimorar seus produtos e serviços (CROSS *et al.*, 2023; WEINSTEIN *et al.*, 2020).

A **Figura 2.10** mostra como os níveis RL são definidos de forma simplificada, e a **Tabela 2.7** sintetiza a validação ou demonstração de produtos com base nos níveis alcançados.

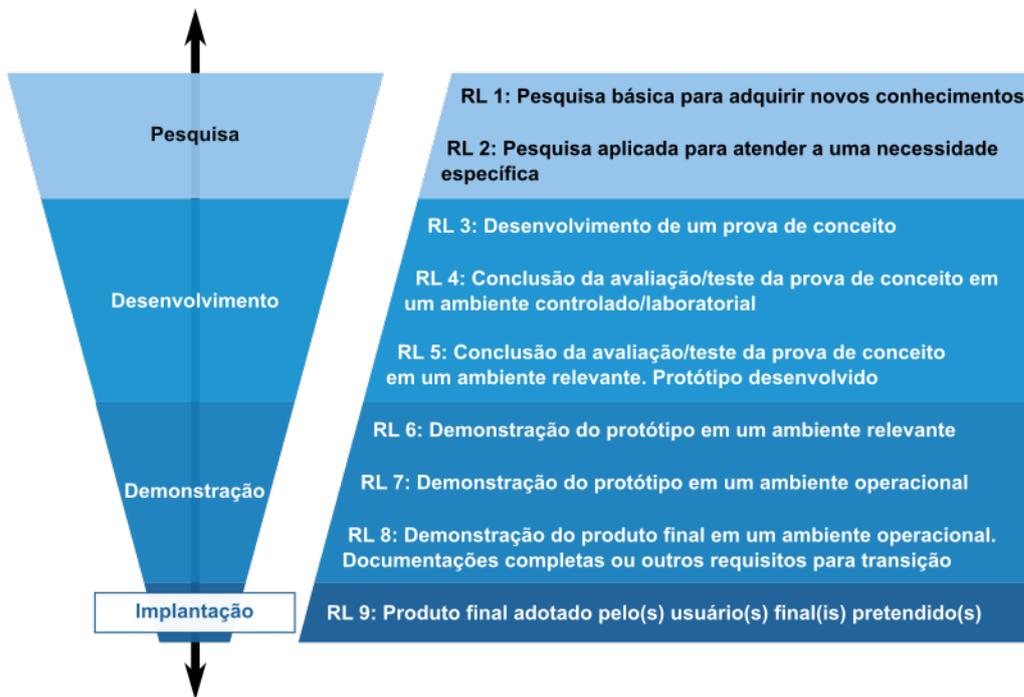


Figura 2.10: Níveis RL. Fonte: adaptado de HOLLINGSHEAD (2022)

Tabela 2.7: Validação e demonstração associados ao ambiente de desenvolvimento para cada nível RL. Fonte: adaptado de (HOLLINGSHEAD, 2022).

| Progresso de P&D | Ambiente de Laboratório | Ambiente Relevante | Ambiente Operacional |
|--|-------------------------|--------------------|----------------------|
| Prova de conceito validada | RL 4 | RL 5* | |
| Protótipo demonstrado | | RL 6 | RL 7 |
| Resultado final demonstrado | | | RL 8 |
| * Primeiro protótipo ainda não demonstrado | | | |

2.2.3 Desafios e limitações

OLECHOWSKI *et al.* (2015) oferece uma análise abrangente de práticas relacionadas aos TRL, identificando 15 desafios em sua implementação. Mesmo organizações avançadas enfrentam dificuldades, especialmente em relação à complexidade do sistema, planejamento e revisão, e validade da avaliação. O estudo fornece *insights* para desenvolvedores e gestores, destacando os desafios e sugerindo melhorias nos processos.

Para WHITE *et al.* (2022), o uso da escala TRL traz desafios frente à carência de descrições específicas dos níveis desenvolvidos em um contexto de tecnologias baseadas na biologia e negligencia as complexidades potenciais dos desafios ambientais.

Um aspecto importante destacado por FERREIRA e RIBEIRO (2024) é que, embora as escalas STRL sejam derivadas da TRL e ofereçam diretrizes para a avaliação de maturidade tecnológica de *softwares*, a intangibilidade e a influência humana no desenvolvimento de *software* impõem desafios únicos. Eles sugerem que, além da adaptação das escalas para contextos específicos, como a empresa EMBRAPII propõe, há uma necessidade de criar descrições mais detalhadas e adaptáveis para os diferentes tipos de tecnologias de *software*, com ênfase tanto no processo quanto no produto, a fim de refletir melhor a realidade das práticas de desenvolvimento.

Capítulo 3

Adaptação das escalas TRL e STRL para a avaliação tecnológica de um ODAS

Na maioria das adaptações das escalas TRL pesquisadas, os critérios de classificação são muito genéricos, o que não contribui para uma avaliação objetiva. O trabalho deste capítulo apresenta critérios específicos a produtos ODAS.

São feitas adaptações a partir das escalas TRL e STRL para a avaliação da maturidade tecnológica de um ODAS, aplicada de forma segmentada ao *hardware* e ao *firmware* do sistema, com base nos estudos sobre produtos similares e nas escalas discutidas no capítulo 2.

Foi considerado apenas o *firmware* para avaliação STRL, excluindo os *softwares* externos do módulo de interação, em razão da diferença entre suas naturezas. No capítulo 5, são discutidas questões de como a ferramenta de classificação STRL do *firmware* poderia ser adaptada para esses outros *softwares*.

Nos trabalhos pesquisados, especificamente sobre o uso da escala TRL e das escalas derivadas no contexto de desenvolvimento de ODAS, não foi observada separação entre *hardware* e *software*. No método proposto, procura-se avaliar essa segregação, de modo a disponibilizar uma ferramenta que também mede, de forma independente, a prontidão de um *firmware* que pode ser instalado em diferentes *hardwares*.

Com base nos estudos realizados e apresentados no capítulo 2, principalmente no trabalho de ROLIN (2014), são apresentados nas **Figuras 3.1 e 3.2** diagramas de progressão tecnológica que associam etapas de projeto aos níveis TRL e STRL e a diferentes aspectos, como, por exemplo, conceito e funcionalidade.

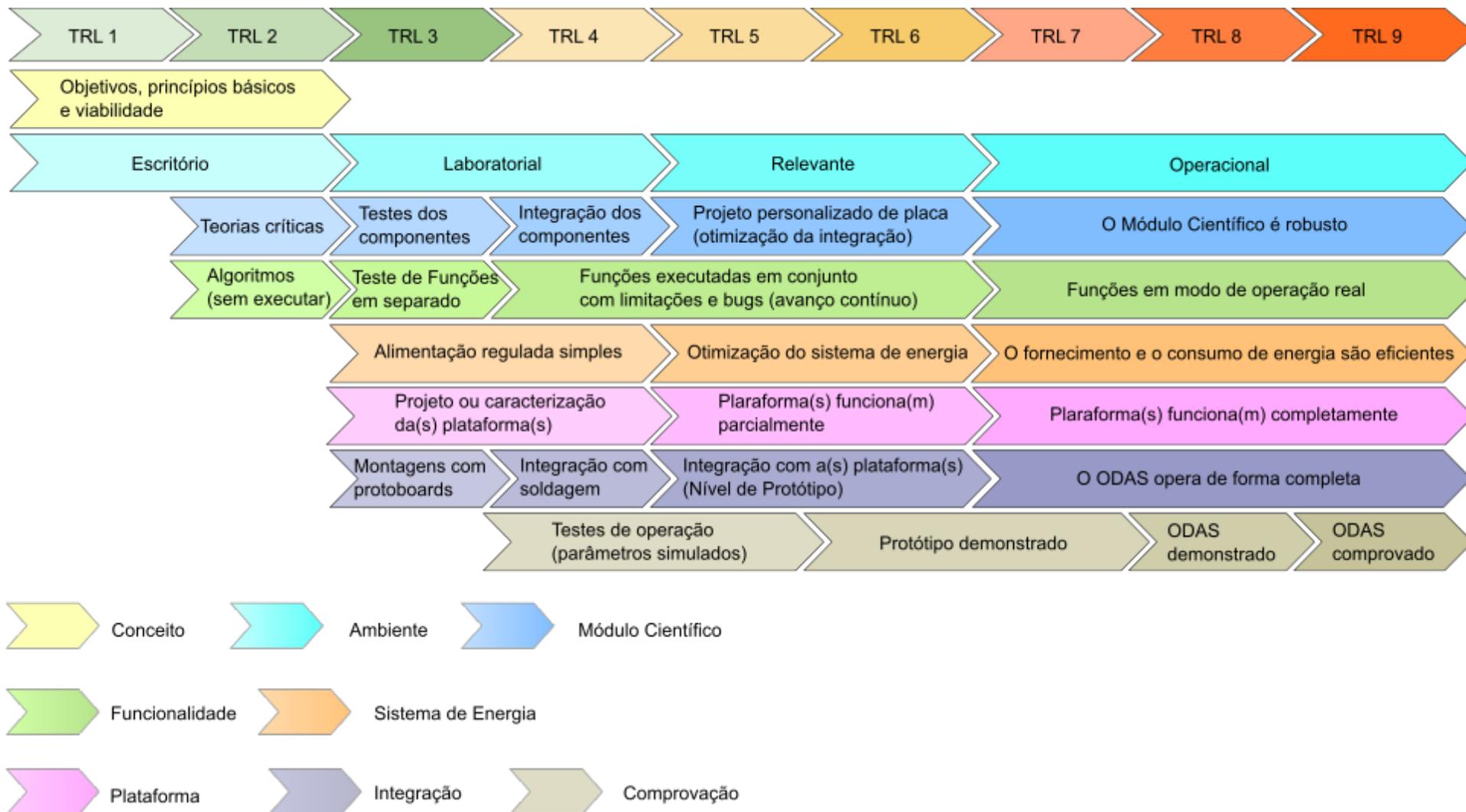


Figura 3.1: Diagrama de progressão tecnológica para o *hardware*.

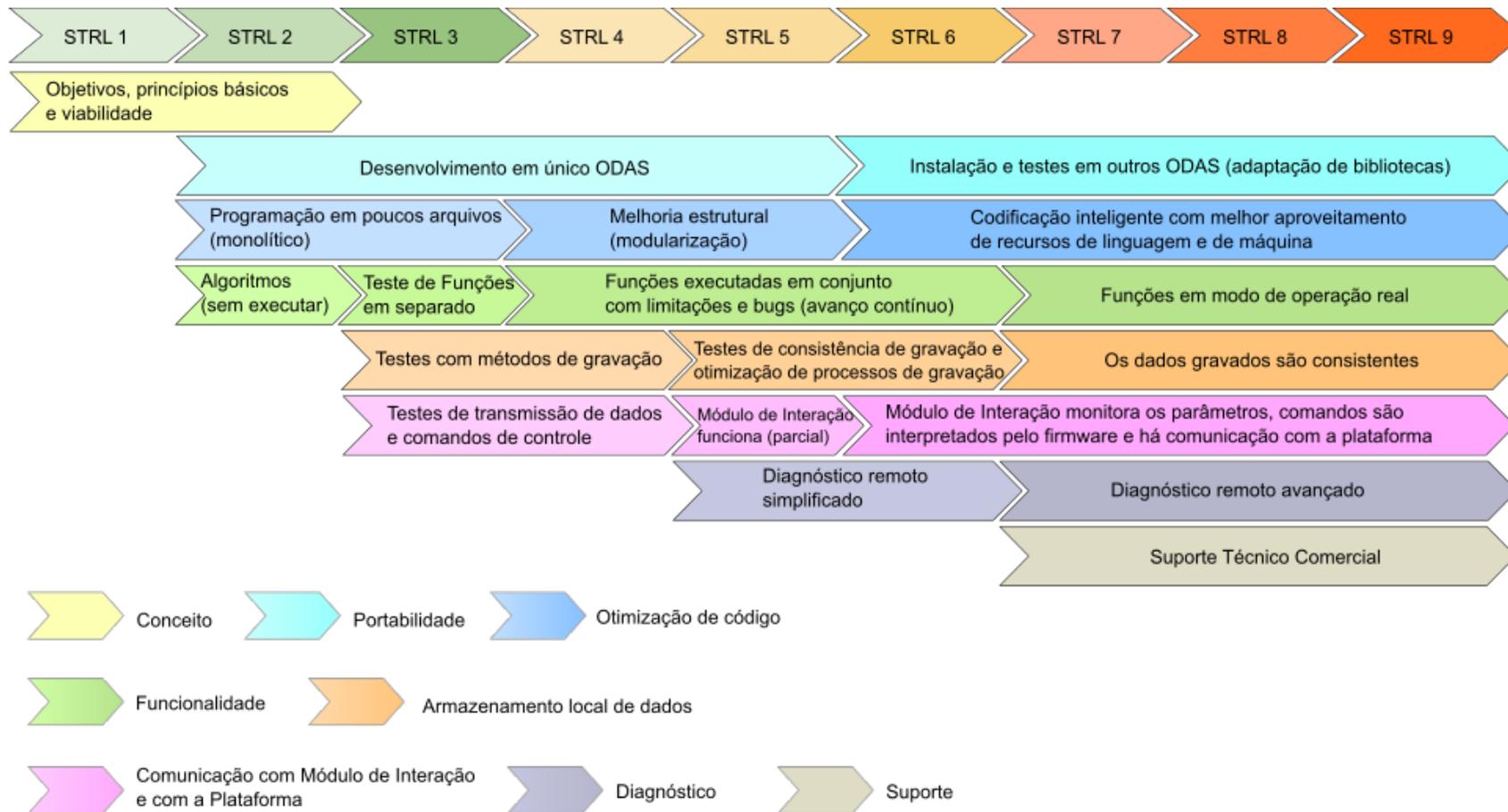


Figura 3.2: Diagrama de progressão tecnológica para o *firmware*.

Além dos conceitos dos ambientes de desenvolvimento de uma tecnologia, também discutidos no capítulo 2, outros aspectos foram considerados nesses diagramas para adaptar o método de classificação TRL e STRL:

- **Conceito**

Define o que é esperado de forma objetiva, incluindo o que se pretende medir, local e logística de operação; e conceitos teóricos de funcionamento, caso a ideia seja viável;

- **Módulo Científico, Sistema de Energia e Plataforma**

Todos os componentes físicos relacionados a cada um deles, conforme diagrama de blocos funcionais apresentado no capítulo 2;

- **Funcionalidade**

Define as etapas diretamente relacionadas ao funcionamento do ODAS, através da integração *hardware-firmware*.

Vale destacar, que as etapas de projeto relacionadas a esse aspecto foram apresentadas tanto no diagrama para o *hardware* quanto para o *firmware*.

- **Integração**

Define o nível de integração entre componentes;

- **Comprovação**

Define o nível de comprovação do ODAS.

- **Portabilidade**

Capacidade do *firmware* ser instalável em outros ODAS;

- **Otimização do código**

Nível de robustez da estrutura de codificação, o que inclui uso inteligente de recursos de linguagem, organização e boa prática de programação;

- **Funcionalidade**

Define o nível de funcionamento do ODAS (mesma definição para o *hardware*);

- **Armazenamento local de dados**

Algoritmo para gravar os dados brutos coletados;

- **Comunicação com o Módulo de Interação e com a Plataforma**

Capacidade de se comunicar com os *softwares* externos e com a unidade de processamento da Plataforma;

- **Diagnóstico**

Capacidade de diagnosticar falhas através da geração de *logs*;

- **Suporte**

Nível de suporte ao cliente para adaptações personalizadas conforme demanda.

Com base nesses diagramas, para cada nível TRL / STRL, são apresentados a seguir critérios de classificação, de modo que aqueles considerados **críticos** foram julgados como necessários para a progressão de nível tecnológico.

3.1 TRL / STRL 1

Hardware e Firmware

O ODAS em TRL / STRL 1 ainda é um produto textual, o qual engloba a identificação de problemas atuais que motivam o desenvolvimento de uma nova tecnologia de ODAS, apresentando as suas vantagens frente às tecnologias já disponíveis. Deverá ser realizada uma pesquisa de mercado para coletar dados para orientar quanto à decisão de avançar com o desenvolvimento, o que pode cooperar com a identificação de potenciais clientes.

Nesse documento também deve ser explorado o conceito fundamental teórico de um ODAS genérico, o que inclui a compreensão dos funcionamentos básicos, comuns em diferentes tipos de ODAS, e aqueles específicos de uma determinada classe de ODAS. Por exemplo, discutir os conceitos envolvidos nos processos de aquisição e condicionamento de sinais, transmissão de dados e gerenciamento de energia.

Vale destacar que grande parte do capítulo 2 desta dissertação, a discussão dos fundamentos básicos de um ODAS genérico, serviu para compor o material do ODAS que viria a ser desenvolvido nesta pesquisa (apresentado no capítulo 4) a nível TRL / STRL 1.

Por fim, é interessante que se tenha no documento um relatório das discussões realizadas pela equipe de desenvolvimento sobre as primeiras ideias e de como se pretende organizar o desenvolvimento do ODAS, o que inclui a definição de grupos específicos para cada atividade.

A Tabela 3.1 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 1.

Tabela 3.1: TRL / STRL 1

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|-----------------|
| TRL 1 | STRL 1 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Identificação do que motiva o desenvolvimento da tecnologia (Pesquisa de Mercado) • Compreensão dos princípios de funcionamento: aquisição e condicionamento de sinal, transmissão de dados, gerenciamento de energia, etc (Revisão Teórica Básica) • Realização de reuniões iniciais do projeto (esboçar as primeiras ideias) • Definição das equipes de trabalho e os locais de desenvolvimento | |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.2 TRL / STRL 2

Hardware

O *hardware* em TRL 2 ainda é um produto textual.

Nesse estágio é descrito o conceito técnico do ODAS. Deve ser relatado como se espera que cada uma das suas tecnologias funcione e como elas são relacionadas. Isso inclui a identificação das variáveis oceanográficas que devem ser medidas.

Nesse documento são apresentados os blocos funcionais de cada elemento do ODAS e os desempenhos esperados.

O projeto e/ou a seleção de componentes são apresentados. As suas características são descritas e projetos para o funcionamento do ODAS, envolvendo esses componentes, são apresentados (modelos teóricos críticos).

Publicar artigos com base no produto (textual) alcançado até o nível TRL 2 é importante para a validação da tecnologia.

Firmware

Para o *firmware* em STRL 2, devem ser definidos os algoritmos principais de funcionamento ou diagramas lógicos, com base no que foi relatado para o produto do *hardware*. Significa que deve ser analisado todo o caminho do dado para o ODAS proposto e sua finalidade, incluindo questões logísticas de operação, como: "onde", "quando", com qual frequência tais variáveis devem ser convertidas e/ou processadas, com qual formato devem ser armazenadas, etc.

Nesse estágio deve ser avaliado se há compatibilidade a nível de *software* entre os componentes escolhidos para o módulo científico e a unidade de processamento selecionada.

Também é importante publicar esses algoritmos, caso descrevam procedimentos relevantes.

Diversas publicações sobre ODAS têm o enfoque na sua teoria crítica de funcionamento e muitas das vezes os autores demonstram essas teorias com base nos avanços realizados em seus produtos.

A Tabela 3.2 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 2.

Tabela 3.2: TRL / STRL 2

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|---|---|
| TRL 2 | STRL 2 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Definição do conceito do ODAS (amadurecimento das ideias iniciais) • Identificação dos parâmetros de monitoramento (temperatura, pressão, detecções acústicas, etc) • Descrição do funcionamento básico do ODAS (Diagrama de Blocos Funcionais), incluindo todos os componentes, tais como: MCU, sistema de comunicação, sistema de energia, sensores, etc • Previsão dos desempenhos esperados • Caracterização inicial de componentes (pode incluir componentes que serão fabricados ou adquiridos) • Discussão dos conceitos críticos do ODAS ou de parte(s) dele(s) • Publicação de observações em revistas científicas ou afins | <ul style="list-style-type: none"> • Definição dos algoritmos críticos • Definição de diagrama lógico geral • Publicação de algoritmos em revistas científicas ou afins |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.3 TRL / STRL 3

Hardware

O produto do *hardware* do ODAS em nível TRL 3 é o conjunto de pequenas montagens experimentais que permite realizar testes específicos em seus componentes principais. Essas montagens são realizadas em *protoboards*, possibilitando a rápida configuração e reconfiguração dos circuitos e sensores para avaliar o desempenho individual de cada elemento em condições controladas. O uso de *protoboards* nesse estágio facilita a detecção e correção de falhas, a medição de parâmetros de funcionamento e o ajuste dos componentes, preparando-os para a integração em níveis de maturidade tecnológica mais avançados.

Firmware

O produto do *firmware* do ODAS em nível STRL 3 consiste na primeira codificação de funções específicas para testes iniciais dos principais componentes do ODAS, a serem realizados de forma controlada e direcionada. Inicialmente, são testados diferentes ambientes de desenvolvimento e analisadas as linguagens de programação compatíveis.

A Tabela 3.3 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 3.

Tabela 3.3: TRL / STRL 3

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|---|
| TRL 3 | STRL 3 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none">• Testes de amostragem e digitalização• Testes de componentes de condicionamento de sinal• Testes para o sistema de energia• Testes de gravação de dados• Testes de transmissão de dados• Testes para o conceito crítico do ODAS | <ul style="list-style-type: none">• Testes de ambiente de desenvolvimento e linguagens de programação• Testes de funções isoladas |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.4 TRL / STRL 4

Hardware

Uma vez realizados os testes nas pequenas montagens de partes do dispositivo, o produto esperado para o *hardware* do ODAS no TRL 4 é uma primeira integração física dos componentes, usando técnicas de soldagem em placas de ensaio. O dispositivo ainda não é considerado um protótipo.

Esse produto deve estar validado em ambiente de laboratório, onde ele é testado de forma controlada.

Firmware

No nível STRL 4, o produto esperado para o *firmware* do ODAS é a integração das funções desenvolvidas, com a execução de algoritmos críticos de forma integrada. Nesse estágio, os *schedulers* são preparados, incluindo a capacidade de receber comandos externos, e boas práticas de programação, como modularização, são aplicadas para organizar e otimizar o código. O *firmware* é validado em ambiente de laboratório, garantindo o funcionamento confiável em condições controladas.

A Tabela 3.4 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 4.

Tabela 3.4: TRL / STRL 4

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|---|---|
| TRL 4 | STRL 4 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none">• Integração de componentes• Calibração mecânica de componentes• Validação em ambiente de laboratório | <ul style="list-style-type: none">• Preparação dos <i>schedulers</i>, podendo incluir comandos externos• Aplicação de boas práticas de programação, incluindo modularização• As funções são executadas de forma integrada• Os algoritmos críticos funcionam |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.5 TRL / STRL 5

Hardware

Envolve a substituição de componentes por modelos de maior qualidade e melhorias significativas na integração entre os elementos do sistema, como o projeto de placa personalizada do Módulo Científico, considerando as características físicas das plataformas nas quais o ODAS será instalado.

Para validar o desempenho, realizam-se testes em condições simuladas que reproduzem as características do ambiente relevante, seguidos de validações diretas em cenários representativos.

Após a validação em ambiente relevante, o ODAS é integrado em plataformas específicas, se estabelecendo como um protótipo inicial.

A documentação do manual de operação do ODAS deve ser elaborada.

Firmware

O avanço no *firmware* inclui a otimização das funções para maximizar o aproveitamento dos recursos de *hardware*, garantindo maior eficiência e desempenho. São implementadas funções de diagnóstico do ODAS, permitindo o controle remoto para identificar e solucionar possíveis falhas.

A Tabela 3.5 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 5.

Tabela 3.5: TRL / STRL 5

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|---|
| TRL 5 | STRL 5 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Substituição de componentes por outros mais robustos • Melhoria na integração dos componentes • Testes em condições simuladas do ambiente • Validação de componentes em ambiente relevante • Integração com plataformas | <ul style="list-style-type: none"> • As funções são otimizadas para melhor aproveitamento de recursos de <i>hardware</i> • Implementações de funções de diagnóstico do ODAS, controladas remotamente |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.6 TRL / STRL 6

Hardware

Após a integração do dispositivo com plataformas específicas, devem ser realizados testes em ambiente relevante com o protótipo do ODAS, permitindo a demonstração de sua funcionalidade nesse ambiente, ficando pronto para as primeiras avaliações em ambiente operacional. O projeto detalhado do sistema é finalizado, incluindo definições para fabricação, montagem e integração com a plataforma.

A documentação do manual de operação do ODAS recebe atualizações.

Firmware

O *firmware* incorpora funções específicas para o controle e monitoramento dos parâmetros da plataforma.

A Tabela 3.6 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 6.

Tabela 3.6: TRL / STRL 6

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|---|---|
| TRL 6 | STRL 6 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none">• Testes do ODAS integrado com a plataforma em ambiente relevante• <i>Design</i> final do ODAS elaborado | <ul style="list-style-type: none">• Implementação de funções de controle e monitoramento de parâmetros da plataforma• <i>Firmware</i> funciona em outros ODAS |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.7 TRL / STRL 7

Hardware e Firmware

O protótipo do ODAS é demonstrado em ambiente operacional. A plataforma passa por testes rigorosos, incluindo resistência à pressão, variações de temperatura e vibração, além da validação de interfaces físicas e eletrônicas entre o módulo científico e a estrutura da plataforma. Os testes funcionais são realizados primeiramente em ambiente simulado, garantindo a robustez do sistema antes da implantação no mar. A plataforma é então posicionada no mar para validar sua capacidade de coletar dados ambientais, como salinidade e temperatura, além de sinais acústicos utili-

zando um hidrofone, enquanto transmite os dados para a Central de Processamento em terra. O sistema demonstra seu desempenho em condições operacionais reais, provando sua viabilidade para coleta e transmissão de dados confiáveis, mas ainda em estágio de protótipo, com ajustes contínuos necessários para maior eficiência e confiabilidade.

A Tabela 3.7 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 7.

Tabela 3.7: TRL / STRL 7

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|-----------------|
| TRL 7 | STRL 7 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Validação da integração do módulo científico na plataforma • Validação de coleta e transmissão de dados no ambiente operacional | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Testes de estanqueidade e resistência da plataforma no ambiente operacional, exceto estação terrestre, como um ODAS instalado em píer • Testes de temperatura, vibração e outros fatores ambientais | |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.8 TRL / STRL 8

Hardware e Firmware

O ODAS, como um produto final, é demonstrado em ambiente operacional. Todos os problemas de integração e fabricação identificados nos níveis anteriores foram solucionados, permitindo a replicação do sistema em pequenos lotes. O ODAS é submetido a múltiplas demonstrações em campo, operando de forma contínua em condições ambientais reais, como marés e ventos locais, e sendo manejado por pesquisadores treinados. Ele apresenta capacidade de armazenamento local e transmissão em tempo real, com módulo científico, sistema de energia e interfaces robustos, ajustados para operação prolongada. Além disso, uma versão comercial do sistema começa a ser delineada, acompanhada de manuais técnicos detalhados para montagem, operação e manutenção.

A Tabela 3.8 apresenta os critérios para classificação em TRL / STRL 8.

Tabela 3.8: TRL / STRL 8

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|-----------------|
| TRL 8 | STRL 8 |
| Crêterios de classifica o | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Capacitar pesquisadores locais para operarem o ODAS e avaliarem sua funcionalidade em campo • Sistema comercial disponível • Guias para montagem, opera o e manuten o do ODAS elaborados • Testes realizados com amplas condi oes ambientais • Demonstra o do ODAS realizada múltiplas vezes | |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.9 TRL / STRL 9

Hardware e Firmware

O ODAS   qualificado com diversas opera oes bem-sucedidas. Ele   um sistema totalmente funcional e confiável, pronto para aplica o prática em larga escala. Ele opera com eficiência em todas as condi oes ambientais esperadas, demonstrando completa robustez e adaptabilidade. O dispositivo já foi fabricado em múltiplas unidades para diferentes projetos e está em uso por diversas institui oes de pesquisa ou empresas, atendendo a uma variedade de objetivos científicos e operacionais. O ODAS apresenta capacidade comprovada de coleta e transmissão de dados com alta precisão, suportada por um ecossistema de usuários treinados e por uma documenta o abrangente, incluindo manuais, FAQs e relatórios operacionais. Com contratos comerciais estabelecidos e uma base consolidada de usuários, o ODAS se posiciona como uma soluço madura e autossuficiente, oferecendo suporte técnico e científico para o monitoramento oceânico de longo prazo e contribuindo para a conserva o e gestão sustentável dos recursos marinhos.

A Tabela 3.9 apresenta os cr terios para classifica o em TRL / STRL 9.

Tabela 3.9: TRL / STRL 9

| <i>Hardware</i> | <i>Firmware</i> |
|--|-----------------|
| TRL 9 | STRL 9 |
| Critérios de classificação | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Produzir várias unidades para clientes • O ODAS é operado por múltiplos usuários finais em diferentes cenários • Há alta confiabilidade e precisão nos dados coletados e na sua transmissão | |
| * Itens em negrito são considerados críticos | |

3.10 “TRLômetro”

Uma vez adaptada a escala TRL para o contexto deste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta nas linguagens *HTML* e *Javascript* para realizar a avaliação TRL / STRL de um produto ODAS, com base nos critérios definidos neste capítulo.

Para avançar de nível nas escalas, todos os critérios **críticos** devem ser atendidos.

O “TRLômetro” pode ser acessado pelo link: <http://trlometro.web.app>.

As **Figuras 3.3 e 3.4** apresentam a interface e um resultado de classificação.

No medidor, além dos níveis TRL / STRL, foram incluídas outras definições discutidas que agrupam esses níveis para uma melhor caracterização do estágio atual do produto ODAS.

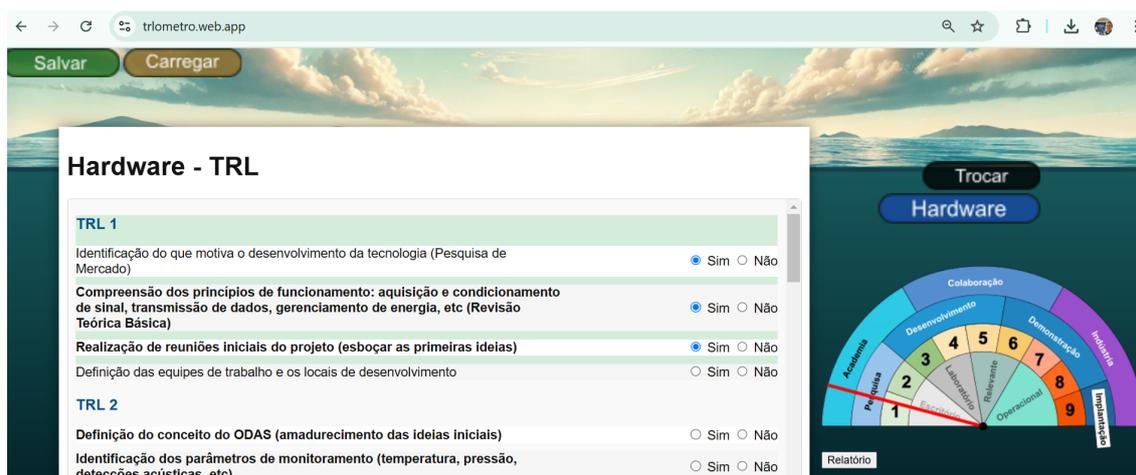


Figura 3.3: Interface do “TRLômetro”



Figura 3.4: Resultado de classificação

A avaliação atual pode ser salva para continuidade futura e, nessa versão, já existe uma opção de geração de relatório da classificação, que inclui o nível atual, um *snapshot* do medidor e data de avaliação.

Em uma próxima versão, serão adicionados campos de caracterização do projeto, como nome, prazos, equipe de desenvolvimento, entre outras informações, para compor o relatório de classificação TRL / STRL.

Capítulo 4

Desenvolvimento e classificação TRL e STRL de um ODAS multipropósito

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento de um ODAS e é aplicado o método do capítulo 3 para avaliar a maturidade do produto ao longo do projeto.

Para atender a um dos objetivos desta pesquisa, o dispositivo deve chegar a um nível de maturidade de validação laboratorial (TRL 4), registrando dados oceânicos, como temperatura e salinidade, além de detectar sinais acústicos. Os dados serão processados e transmitidos em tempo real para um banco de dados na nuvem, permitindo monitoramento via *website* e dispositivos móveis.

Este capítulo está dividido em seções para cada nível TRL (ou STRL), que retratam os produtos alcançados em cada nível (marcos do projeto).

Os *softwares* do módulo de interação não foram avaliados na escala STRL, porém os seus desenvolvimentos são apresentados em conjunto com aqueles do *hardware* e do *firmware*, em momentos oportunos.

4.1 TRL / STRL 1 - Princípios básicos

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento do ODAS que configurou em um produto de nível TRL 1 e STRL 1.

4.1.1 Pesquisa de Mercado

A primeira etapa desse projeto foi avaliar o mercado, no que tange às necessidades atuais de monitoramento oceanográfico, e identificar possíveis públicos-alvo.

Avaliação das necessidades atuais do mercado

O mercado global de sistemas de monitoramento oceanográfico está projetado para um crescimento significativo nas próximas décadas, impulsionado pela demanda cres-

cente de setores como petróleo e gás, pesquisa ambiental, monitoramento costeiro e órgãos governamentais. Entre 2023 e 2030, os avanços tecnológicos e a integração de dispositivos multifuncionais têm sido apontados como principais direcionadores, oferecendo oportunidades robustas para empresas ao longo de toda a cadeia de valor. Adicionalmente, esse mercado deve crescer de US\$ 1,5 bilhão em 2023 para US\$ 2,8 bilhões até 2032, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 7,2%. Esse crescimento é impulsionado pela necessidade de dados precisos e em tempo real, motivada por estudos sobre mudanças climáticas, pesquisas em biologia marinha e iniciativas de segurança marítima. Regiões como América do Norte, Europa e Ásia-Pacífico lideram as perspectivas de expansão, com investimentos em soluções inovadoras e urbanização acelerada. Tais dinâmicas consolidam o setor como estratégico para o futuro das indústrias relacionadas, destacando o papel de avanços em sensores, veículos autônomos submarinos e sistemas de comunicação de dados na ampliação das capacidades e aplicações dessas tecnologias (DATAINTELO, 2023; VPA RESEARCH, 2023).

No Brasil, o Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Baía de Santos (PMPAS) oferece *insights* valiosos sobre o mercado de monitoramento acústico submarino. Implementado como uma exigência regulatória pela PETROBRAS em parceria com o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o PMPAS revela uma demanda crescente por tecnologias que quantifiquem e caracterizem o ruído hidroacústico de origem antropogênica, principalmente em regiões costeiras e áreas de exploração *offshore*. Esse mercado potencial inclui empresas de petróleo e gás, instituições de pesquisa ambiental e órgãos reguladores que necessitam monitorar os impactos de atividades industriais sobre a biota marinha. A abordagem do PMPAS, que integra monitoramento móvel (como *gliders* e perfiladores), monitoramento fixo costeiro e oceânico, e modelagem numérica, destaca a demanda por dispositivos multifuncionais e adaptáveis a diferentes profundidades e condições ambientais. A necessidade de equipamentos que suportem longos períodos de coleta contínua e que consigam diferenciar fontes de ruído biológico, ambiental e antropogênico aponta para um mercado específico: o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento que combinam autonomia, robustez e precisão na aquisição de dados acústicos (LIMA *et al.*, 2022, 2024).

Também é de destaque a crescente demanda por tecnologias voltadas para a proteção de mamíferos marinhos. Conforme IEAPM (2024a), é apresentado o projeto EMAMPAS (Efeito das Manobras Militares na Paisagem Acústica Submarina), que visa monitorar e mitigar o impacto de atividades antropogênicas, como o ruído submarino gerado por operações de navegação e exploração marítima, que pode afetar a comunicação, navegação e bem-estar dos mamíferos marinhos.

CAUCHY *et al.* (2023) identificam prioridades como avanços tecnológicos para

melhorar a integração de sensores acústicos e preservação da autonomia dos *gliders*, métodos aprimorados para estimativas de densidade populacional e calibração para registrar níveis absolutos de ruído. Com o aumento da necessidade global de monitoramento de ruído submarino antropogênico, conforme destacado por organismos como a Organização Marítima Internacional e a Diretiva-Quadro de Estratégia Marinha da UE, há uma oportunidade clara para criar um dispositivo adaptado a essas exigências.

Também na esfera da Marinha do Brasil, o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz) se destaca como uma iniciativa fundamental para a proteção e monitoramento das Águas Jurisdicionais Brasileiras. A matéria enfatiza que no futuro haverá a incorporação de sensores acústicos aos sites de monitoramento. Isso reforça a necessidade de tecnologias avançadas de monitoramento acústico, com capacidade de operação autônoma e contínua, que possam fornecer dados detalhados sobre a presença e o comportamento de embarcações, bem como a identificação de atividades suspeitas (LAMPERT e COSTA, s.d.). Os autores ainda destacam:

O SisGAAz é um Programa Estratégico de elevada prioridade para a Marinha do Brasil, indispensável para a garantia da soberania sobre a "Amazônia Azul" e com potencial imenso para impulsionar o desenvolvimento econômico e tecnológico no País, além de ser um estuário para a geração de empregos. (LAMPERT e COSTA, s.d.)

O setor pesqueiro também enfrenta desafios para garantir a sustentabilidade dos estoques e minimizar os impactos ambientais, exigindo tecnologias que forneçam dados precisos e contínuos sobre as populações de peixes. O monitoramento acústico passivo (PAM) surge como uma ferramenta para atender a essa demanda, permitindo o rastreamento de espécies vocais e a coleta de informações sobre padrões de comportamento reprodutivo e sazonal. No Estuário do Tejo, em Portugal, o uso de PAM possibilitou identificar períodos críticos de agregação reprodutiva, oferecendo dados que podem ser integrados a métricas de captura por unidade de esforço (CPUE) para um gerenciamento adaptativo e sustentável. Essa abordagem é vital para evitar a sobre-exploração, ao correlacionar dados acústicos com a atividade pesqueira e assim permitir ajustes em tempo real nas práticas de captura, promovendo a preservação das populações e garantindo a viabilidade econômica da pesca (STRATOUDAKIS *et al.*, 2024).

Outra lacuna do mercado está relacionada às organizações no Brasil dedicadas à pesquisa, desenvolvimento e inovação, particularmente aquelas voltadas para as atividades militares. Para JUNIOR (2018), é fundamental, de forma gradual, direcionar uma parte dos investimentos em importação de tecnologia e serviços especializados para os setores de pesquisa e desenvolvimento, priorizando parcerias com

instituições acadêmicas e a indústria de defesa. Além disso, é importante atrair e reter os profissionais necessários para essas atividades.

Pesquisas e projetos desenvolvidos por instituições no Brasil buscam confrontar problemas relacionados às tecnologias importadas, que incluem a falta do domínio sobre elas, a baixa flexibilidade nas operações, os altos custos, a dependência contínua, entre outros fatores (NUNES, 2024). O domínio e a flexibilidade adquiridos a partir do desenvolvimento de tecnologias autóctones são essenciais para otimizar os projetos e minimizar esforços de modernização futura (CALDEIRA, 2023).

Nesse sentido, esta pesquisa de mercado também considerou as necessidades voltadas para a capacitação interna de ICTs e o desenvolvimento de tecnologias próprias com domínio de todo o ciclo de vida dos projetos.

Identificação de público-alvo potencial para o dispositivo

A partir dos estudos realizados no tópico anterior, podem ser listados diferentes públicos que poderiam se interessar pelo novo produto:

- Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação (ICT)
- Marinha do Brasil
- Empresas de petróleo e gás
- Órgãos reguladores e governamentais
- Indústria da pesca comercial
- Pesquisadores ambientais autônomos
- Organizações não governamentais (ONGs) ambientais

4.1.2 Compreender os princípios de funcionamento (Revisão Teórica Básica)

Essa etapa do produto do ODAS a nível TRL / STRL 1 foi desenvolvida e apresentada no capítulo 2, fazendo parte da pesquisa básica sobre as tecnologias, seus funcionamentos e aplicações.

4.1.3 Realizar reuniões iniciais do projeto (esboçar as primeiras ideias)

Neste estágio, o autor desta dissertação realizou junto aos seus orientadores algumas reuniões para discutir sobre os princípios básicos que embasariam a tecnologia e sobre aspectos que a conceituariam na fase TRL / STRL 2.

A **Figura 4.1** resgata o diagrama de funcionamento do ODAS apresentado no capítulo 2 e destaca as partes que serão exploradas.

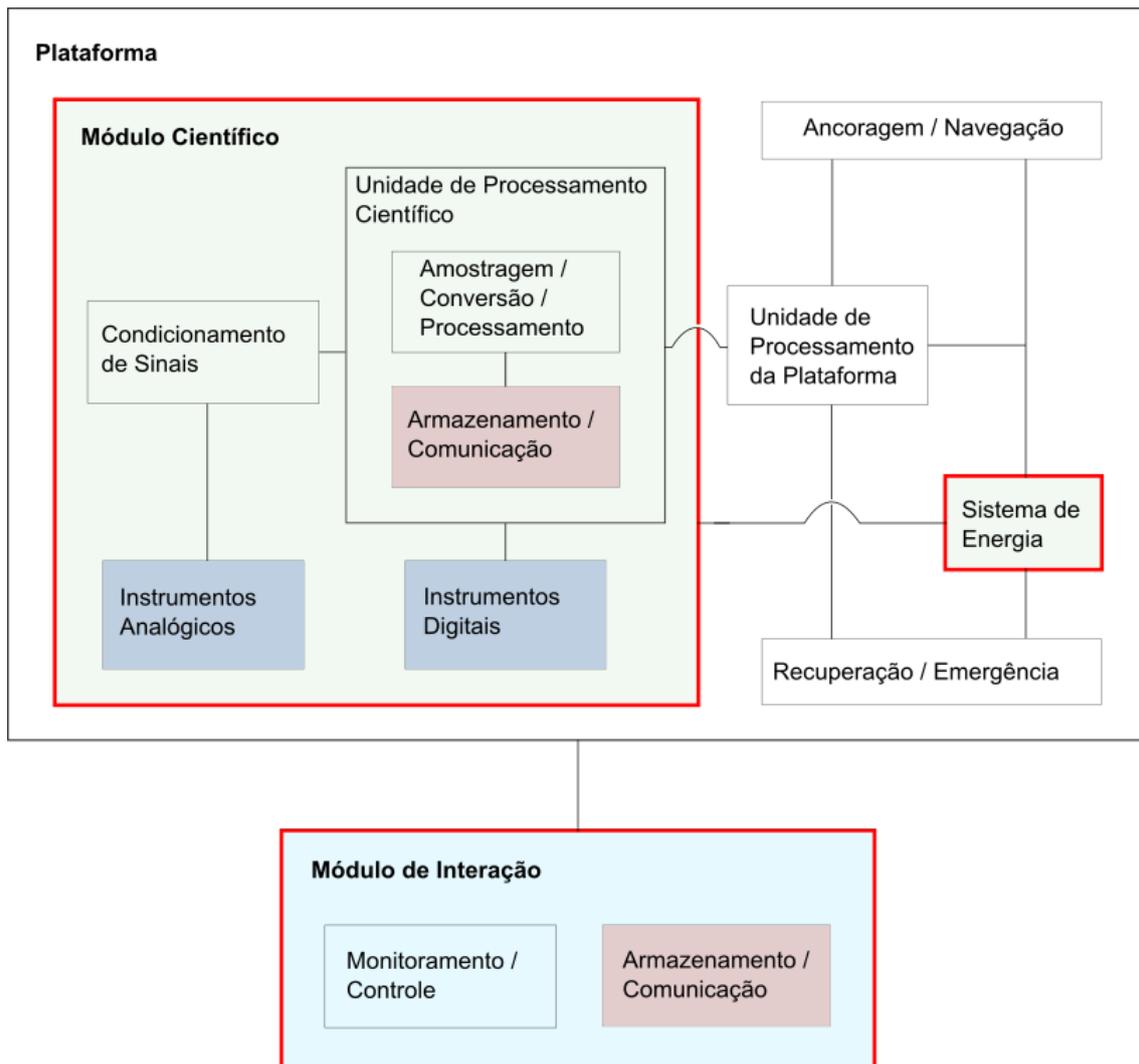


Figura 4.1: Diagrama simplificado de Blocos Funcionais

Os módulos científico e de interação deverão ser desenvolvidos de forma que sejam compatíveis com diferentes tipos de plataforma. O diagrama apresentado na **Figura 4.1** mostra que os blocos funcionais a serem explorados podem ser aplicados em diferentes plataformas.

Foi discutida a viabilidade de incluir no projeto a parte da plataforma de instalação do ODAS, que inicialmente se pensava em um veículo autônomo. Concluiu-se que os riscos envolvidos para o avanço tecnológico até uma maturidade média de TRL 4 ou TRL 5 em um prazo de até 2 anos eram elevados, mesmo para um veículo simplificado, de modo que seriam exigidos investimentos técnicos em áreas além da eletrônica, incluindo mecânica, robótica, hidrodinâmica, entre outras. Diante disso, foi definido que seriam desenvolvidas a parte científica do ODAS (Módulo Científico) e o Sistema de Energia, representando uma tecnologia componente de um futuro ODAS completo, com plataforma.

As discussões iniciais se centralizaram no objetivo de desenvolver o ODAS até um

nível no qual ocorresse uma validação em ambiente laboratorial, desde a aquisição, usando instrumentos comerciais, até a gravação dos dados processados, o que não exige ainda que o dispositivo tenha uma plataforma.

Por não existir necessidades com alto grau de inovação, com técnicas e tecnologias bem distintas daquelas consolidadas em produtos comerciais, o desenvolvimento do dispositivo deveria aproveitar ao máximo a replicação de princípios existentes.

Foram realizadas algumas atividades durante essa fase:

- **Definir uma operação teste alvo**

Uma vez disponível um instrumento CTD comercial em laboratório, um dos primeiros testes mapeados foi a sua aplicação com o ODAS.

Também foi definido no início do projeto o uso de hidrofones, que também era um recurso já disponível.

Os detalhes dessas operações seriam definidos no próximo nível de maturidade.

- **Realizar buscas no mercado sobre microcontroladores e outros componentes básicos do circuito elétrico**

Havia um SBC (*Single Board Computer*) disponível em laboratório, mas que era superdimensionado para os propósitos definidos.

Durante a busca da unidade de processamento para o módulo científico do ODAS, foram discutidas questões de linguagem de programação e compatibilidade com diferentes placas encontradas no mercado.

Foram realizados estudos sobre outros componentes potenciais presentes no mercado, como reguladores de tensão, amplificadores e potenciômetros.

4.1.4 Definições de equipes e locais de desenvolvimento

Como este trabalho tem um fim, principalmente acadêmico, não foram considerados outros desenvolvedores no projeto. E o desenvolvimento incluiu qualquer ambiente de escritório, Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc) e Laboratório de Traçadores, ambos na UFRJ, e o Laboratório de Acústica do IEAPM.

4.1.5 Avaliação em TRL / STRL 1

O produto do ODAS nesse nível foi o material textual apresentado nessa seção e naquelas de revisão de tecnologias ODAS, apresentadas no capítulo 2.

4.2 TRL / STRL 2 - Conceito

4.2.1 Conceito e desempenhos esperados

O esquema da **Figura 4.2** ilustra as tecnologias e as interações mútuas para o desenvolvimento do novo ODAS.

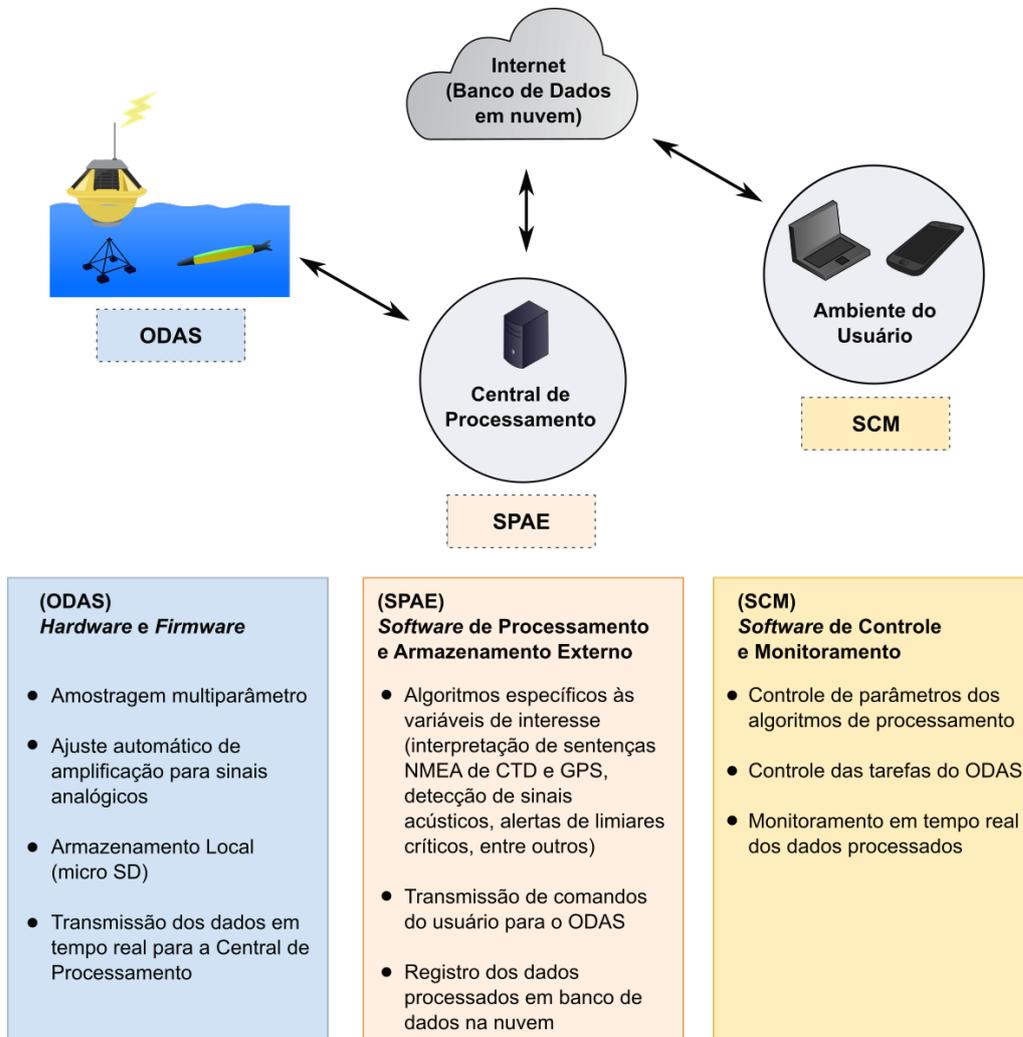


Figura 4.2: Conceito do novo ODAS

• ODAS

A parte principal deve ser instalada no Ambiente Operacional e deve ser composta de um *firmware*, com toda a lógica de seu funcionamento, e uma parte em *hardware* embarcado com uma estrutura física que caiba nos compartimentos estanques de veículos autônomos, de boias oceanográficas, dentre outras plataformas oceânicas.

O dispositivo deve coletar dados de instrumentos digitais, como CTD; e dados acústicos, condicionados por um algoritmo eficiente executado no *firmware* da

unidade de processamento científico, que realiza o controle de ganho, com o intuito de se obter uma maior faixa de operação de amplitude de sinal.

Os dados brutos devem ser armazenados localmente em módulo de gravação, como *SD card*.

- **Central de Processamento**

O ODAS deve transmitir os dados digitalizados para uma Central de Processamento em terra, onde o *Software* de Processamento e Armazenamento Externo (SPAEE) irá processar e gravar dados de interesse em um banco de dados em nuvem.

- **Ambiente do Usuário**

O *Software* de Controle e Monitoramento (SCM) servirá para controlar o ODAS e monitorar os dados processados em tempo real.

Desempenhos esperados

O ODAS deve ter as seguintes características:

- Tamanho compacto;
- Capacidade de adquirir dados de sinais acústicos de frequência de até 1 kHz. Esta operação seria a mais crítica do dispositivo, em termos de processamento;
- Fácil conexão ao PC para compilação de código do *firmware* da unidade de processamento;
- Compatível com linguagem de programação de nível baixo ou médio que tenha boa disponibilidade de bibliotecas e capacidade de alguns controles diretos sobre o *hardware* da unidade de processamento;
- Transmissão de dados em tempo real e armazenamento local;
- Fácil disponibilidade de componentes no mercado nacional;
- Unidade de Processamento de baixo consumo, descartando os SBC (*Single Board Computers*);
- Boa autonomia; e
- Custo reduzido.

O dispositivo deve ser versátil, mecanicamente e eletronicamente, e capaz de ser instalado em diferentes plataformas oceânicas, como boias oceanográficas e veículos autônomos.

A adoção de critérios limitados permitiu iniciar o desenvolvimento de forma mais rápida e sem comprometer os testes iniciais. A modularidade do dispositivo que seria buscada, permitiria, em um nível de maturidade mais avançado, realizar a substituição de componentes por outros mais robustos, para testes mais exigentes.

4.2.2 Funcionamento esperado e seleção de componentes

O diagrama apresentado no início deste capítulo agora é detalhado. A **Figura 4.3** apresenta os diferentes componentes do Módulo Científico que está sendo desenvolvido neste trabalho.

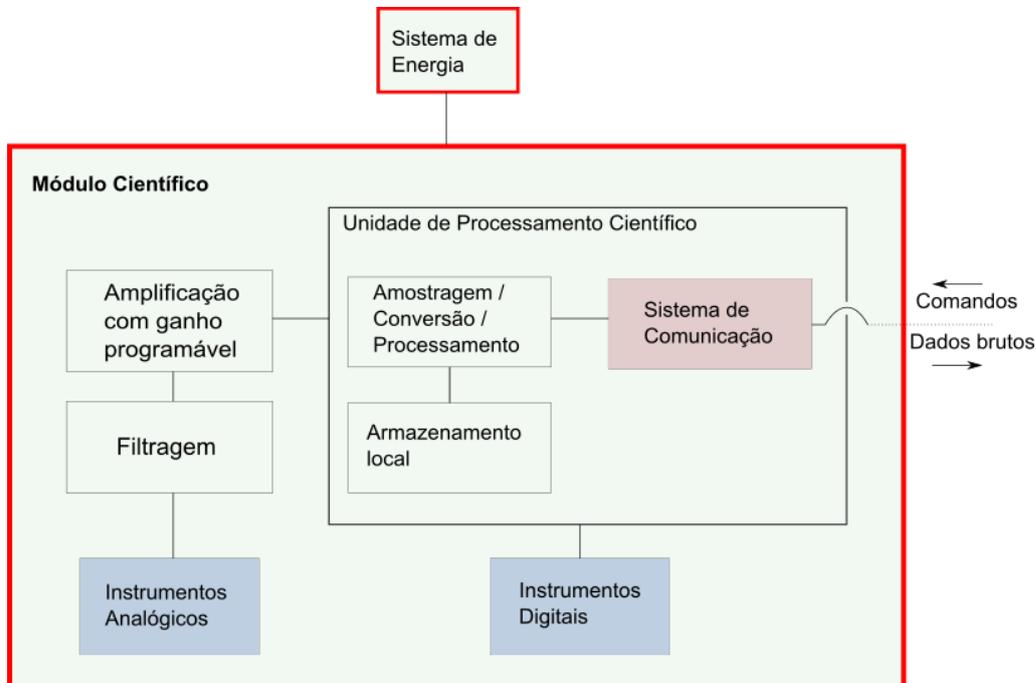


Figura 4.3: Diagrama de blocos funcionais para o Módulo Científico e para o Sistema de Energia

No capítulo 2 foram discutidos os conceitos genéricos desses componentes. Nesta seção, essa discussão é refinada com a definição de tipos de componentes para o projeto e a seleção de componentes.

• Unidade de Processamento Científico

Foi escolhido o MCU ATSAM21G18 da Microchip, por ter um custo acessível a nível acadêmico e apresentar especificações que atendem aos objetivos do ODAS. A **Tabela 4.1** apresenta suas principais características.

Além de suportar I2C e SPI, a comunicação serial utiliza o protocolo UART/USART, o que permite uma integração eficiente com diversos dispositivos digitais, como sensores e outros componentes eletrônicos, que se comunicam com diferentes protocolos, tornando uma escolha versátil para aplicações que demandam facilidade de interconexão em ambientes de desenvolvimento eletrônico, oferecendo várias possibilidades para o **Sistema de Comunicação** do dispositivo.

O *firmware* pode ser programado em linguagem baseada em C/C++, de nível médio e compatível com diversas bibliotecas *Arduino*, com recursos que

Tabela 4.1: Parâmetros Gerais do MCU ATSAM21G18. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a)

| | |
|--|----------------------|
| Processador | 32-Bit ARM Cortex M0 |
| Velocidade do <i>Clock</i> (frequência de operação) | Até 48 MHz |
| Tensão de Operação | 3,3 V |
| Memória <i>Flash</i> | 256 KB |
| Memória SRAM | 32 KB |
| Módulos de comunicação serial (SERCOM) configuráveis como UART/USART, I2C ou SPI | 6 |
| Pinos de entrada/saída de uso geral (GPIO, do inglês <i>General Purpose Input/Output</i>) | 20 |
| Conversor analógico-digital (ADC, do inglês <i>Analog-to-Digital Converter</i>) | 14 canais de 12 bits |
| Conversor digital-analógico (DAC, do inglês <i>Digital-to-Analog Converter</i>) | 1 canal de 10 bits |

facilitam toda a implementação, além de ser de código livre (*open-source*) e bem difundida nos desenvolvimentos de microcontroladores. Em complemento, o *Python*, implementado e otimizado para microcontroladores através do *CircuitPython*, também pode ser utilizado para a programação do MCU selecionado (testes das linguagens de programação foram realizados a nível TRL / STRL 3).

Foi escolhida a placa de desenvolvimento *Feather M0 Adalogger* da marca *Adafruit* (**Figura 4.4**), por conter o MCU selecionado.

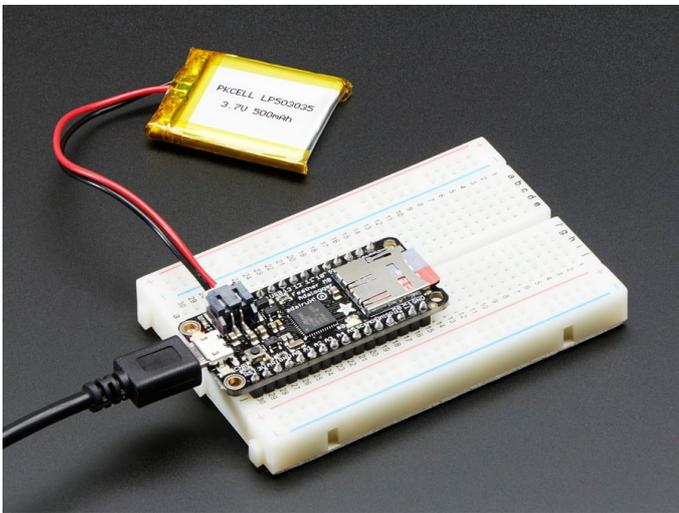


Figura 4.4: Placa de desenvolvimento selecionada. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a).

Nota: para simplificar sua citação ao longo do texto, será mencionada apenas como "placa".

A **Tabela 4.2** apresenta algumas das características da placa selecionada.

Tabela 4.2: Parâmetros Gerais da Feather M0 Adalogger. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a)

| | |
|------------------|--|
| Dimensões | 51 mm x 23 mm x 8 mm (sem os cabeçotes soldados) |
| Peso | 5,3 g |
| Outros | Regulador de Tensão de 3,3 V com saída de corrente de pico de 500 mA |

A unidade de processamento selecionada ainda apresenta USB embutido, o que facilita a sua comunicação com um computador, no qual seria programado o código do *firmware* do MCU, permitindo tanto a troca dos dados quanto o fornecimento de energia com uma conexão USB com apenas um fio. Além disso, a placa tem um conector para baterias de polímero de lítio, que podem ser recarregadas pela alimentação USB, enquanto o código está sendo depurado, por exemplo. Essas configurações viriam a oferecer facilidade de uso nos primeiros testes realizados. Para o **Armazenamento local**, ela conta ainda com um suporte de microSD.

- **Instrumentos Digitais**

Foi selecionado um CTD da marca *Sea-Bird Electronics*, que estava disponível no Laboratório de Traçadores, para as operações de aquisição de dados de temperatura, condutividade e pressão.

Outro equipamento que também pode ser utilizado em nível mais maduro é o GPS, podendo medir o posicionamento do ODAS ao longo do tempo, sendo útil, por exemplo, para medição de parâmetros de ondas ou localização da plataforma.

- **Instrumentos Analógicos**

Para aquisição de sinais de paisagem acústica submarina, seriam utilizados hidrofones do Laboratório de Acústica do IEAPM, que estão instalados em estações submarinas na região da Enseada dos Anjos da cidade de Arraial do Cabo. Os instrumentos apresentam cabeamento até o laboratório. O tratamento de possíveis perdas de sinal ao longo do caminho não foi matéria desta dissertação.

Foi selecionado e adquirido um microfone de eletreto de 2 terminais, conforme circuito apresentado na **Figura 4.5**, para possíveis usos durante os testes de condicionamento de sinal analógico, antes da implementação com hidrofones no ambiente oceânico.

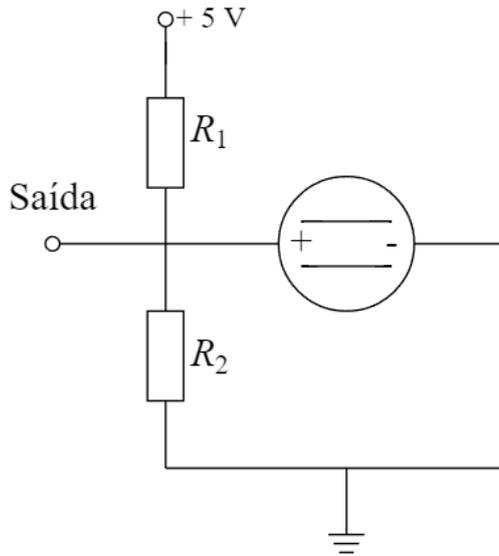


Figura 4.5: Circuito para o microfone de eletreto

A tensão de alimentação no microfone V_{mic} com base nos resistores R_1 e R_2 , é calculada com o divisor de tensão:

$$V_{\text{mic}} = V_{\text{in}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Onde:

- V_{mic} é a tensão sobre o microfone;
- V_{in} é a tensão de entrada (5V);
- R_1 é o resistor conectado ao V_{in} ; e
- R_2 é o resistor conectado ao microfone e ao terra

Foram definidos $R_1 = 1,5k\Omega$ e $R_2 = 2,2k\Omega$ para obter uma tensão de alimentação no microfone de $V_{\text{mic}} = 3V$, dentro de sua faixa de operação.

- **Filtragem e Amplificação com ganho programável para os sinais acústicos**

Seriam utilizados filtros passa-banda, passa-baixa e passa-alta em conjunto com 2 amplificadores de instrumentação e 2 módulos potenciômetros digitais. O esquema elétrico desse processo também está descrito na **Seção 4.2.3**.

Para a amplificação dos sinais, foi selecionado o amplificador de instrumentação de custo reduzido AD620 (ANALOG DEVICES, 2009), o qual além de apresentar alta impedância de entrada, baixa impedância de saída, alta precisão e estabilidade e baixo consumo (corrente de alimentação máxima de 1,3 mA), é capaz de operar com sinais de entrada diferenciais com alta rejeição de modo comum (CMRR - *Common-Mode Rejection Ratio*), sendo capaz de

rejeitar ruídos e interferências que são comuns a ambas as entradas, amplificando apenas a diferença entre elas. Suas características são apresentadas no **Apêndice A**.

A **Equação 4.1** define o cálculo de ganho do AD620, apresentado por ANALOG DEVICES (2009).

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k\Omega}{R_G} \right) \quad (4.1)$$

Para que ocorra a amplificação automática do sinal, foi selecionado o *trimpot* digital X9c103s (RENESAS, 2019), que também oferece ajuste da resistência com precisão digital. Ele seria utilizado para substituir o *trimpot* de ganho mecânico na placa do AD620.

O X9c103s oferece uma resistência total de $10K\Omega$, com 100 passos de ajuste. O seu controle digital seria feito por uma interface com os fios (INC), U/D (Up/Down) e Chip Select (CS), com a seguinte sistemática:

1. O pino digital U/D é configurado para alto (incremento) ou baixo (decremento) conforme necessário;
2. Habilitação do Chip, colocando o pino CS em nível baixo para habilitar o trimpot digital;
3. Envio de pulsos no pino INC para alterar o passo; e
4. Finalizar o ajuste, colocando o pino CS em nível alto para desabilitar o trimpot digital e manter a resistência ajustada estável.

• Sistema de Energia

Foram adquiridas 2 baterias de polímero de lítio (LiPO) com capacidade de 350 mAh conforme modelo da **Figura 4.4** e parâmetros da **Tabela 4.3**. Essas baterias seriam utilizadas como alimentação exclusiva da placa para os primeiros testes, não envolvendo os demais componentes do ODAS.

Tabela 4.3: Parâmetros da bateria selecionada. Fonte: ADAFRUIT INDUSTRIES (2024a)

| | |
|------------|---------------------------------|
| Tipo | Polímero de Íon de Lítio (LiPO) |
| Tensão | 3,7 V |
| Capacidade | 350 mAh |

Para os testes realizados a partir das primeiras montagens a nível TRL 3, também seria utilizado um par de baterias estacionárias de 12 V, conectadas em série, fornecendo as tensões - 12 V, + 12 V e 24 V, para serem usadas

na alimentação do CTD (12 V), no pré-amplificador do hidrofone (24 V) e no circuito do Módulo Científico (+ 5 V e - 5 V).

Reguladores de tensão de saída de -5V e +5V seriam utilizados, os quais estabilizam a tensão de saída, protegendo circuitos sensíveis contra variações de tensão de entrada. Foram selecionados o LM7805 da *Texas Instruments*, para o fornecimento de +5V DC regulada, e o LM7905 também da *Texas Instruments* para o fornecimento de -5V DC regulada. Em especial, a saída de -5V seria o polo de alimentação negativa dos amplificadores de instrumentação AD620.

• Sistema de Comunicação

Foi selecionado o módulo HW-044, que é um conversor RS-232 para TTL. Ele inclui 4 pinos TTL:

- *RX* é a linha de recepção de dados (deve ser conectado ao pino TX do ODAS);
- *TX* é a linha de transmissão de dados (deve ser conectado ao pino RX do ODAS);
- *VCC* é a tensão de alimentação; e
- *GND* para a conexão ao terra comum

Para a alimentação, ele suporta tensões de 3 V e 5 V.

Desta forma, para o **Sistema de Comunicação**, inicialmente, foi escolhida uma comunicação serial assíncrona por fio, utilizando a interface RS-232, com um conector DB-9, o que permite uma operação do dispositivo em locais limitados, exigindo que a Central de Processamento do Módulo de Interação esteja no mesmo local. Essa escolha para os primeiros níveis de maturidade do dispositivo atende aos primeiros testes que seriam realizados em ambiente de laboratório.

Foram adquiridas 3 unidades do módulo, uma para a comunicação com a Central de Processamento, um segundo para a comunicação com o instrumento CTD e uma terceira reserva para um novo instrumento digital, por exemplo, GPS.

Seleção de tecnologias para o Módulo de Interação

A **Figura 4.6** detalha os componentes do Módulo de Interação e seu funcionamento, compondo a Central de Processamento e o Ambiente do Usuário.

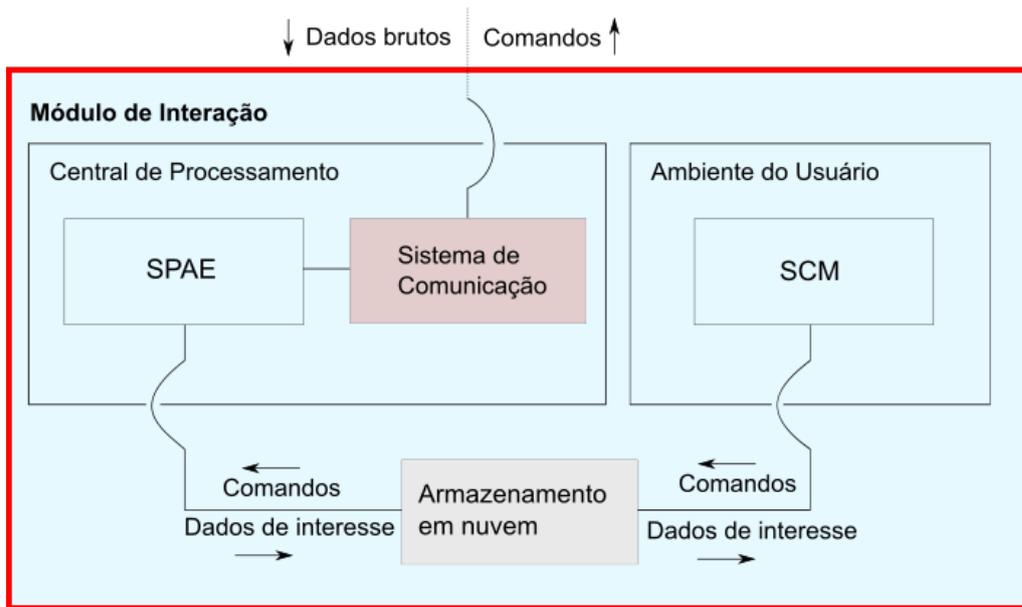


Figura 4.6: Módulo de Interação

- **Software de Processamento e Armazenamento Externo (SPAЕ)** A linguagem de programação *Python* foi definida como a mais apropriada, devido à sua ampla gama de bibliotecas especializadas em processamento numérico e análise de dados, como NumPy, SciPy, Pandas, entre outras. Além disso, *Python* possui ferramentas poderosas para a análise de espectro de frequência e tem desempenho robusto nessas tarefas de ciência de dados. Outros critérios considerados foram o seu acesso livre e a boa capacidade de se comunicar com dispositivos externos e com serviços web.
- **Software de Controle e Monitoramento (SCM)** Para esse tipo de sistema, que geralmente roda em navegadores, podem ser consideradas linguagens como HTML, em conjunto com JavaScript e PHP, e a linguagem Dart, esta última utilizando o *framework Flutter*, desenvolvido pela Google.

O *Flutter* foi escolhido por oferecer a capacidade de criar interfaces de usuário nativas de alta qualidade para *Android*, *iOS*, *web* e *desktop* a partir de um único código base, o que reduziria o tempo e os custos de desenvolvimento e manutenção. O *hot reload* do *Flutter* permite que os desenvolvedores vejam as mudanças instantaneamente, acelerando o ciclo de desenvolvimento e facilitando a experimentação e o refinamento contínuo do aplicativo. Com uma vasta biblioteca de *widgets* personalizáveis e uma forte comunidade de suporte, o *Flutter* proporciona uma plataforma robusta e flexível para criar aplicativos modernos e responsivos que atendem às necessidades dos usuários em múltiplos dispositivos (GOOGLE, 2024b).

- **Armazenamento em nuvem**

Optou-se em utilizar o *Cloud Firestore*, do *Google Firebase*, por ter fácil integração com o *Flutter* e *Python* e proporcionar uma maneira eficiente e escalável de armazenar e sincronizar dados entre clientes e servidores em tempo real (GOOGLE, 2024a).

Outra vantagem dessa ferramenta é que ela oferece muitos recursos com uma conta gratuita para testes, o que facilitaria o desenvolvimento do ODAS em níveis baixos de maturidade com poucos recursos financeiros disponíveis.

4.2.3 Conceitos críticos para o funcionamento do ODAS

Diagrama simplificado e condicionamento automatizado para o sinal acústico

A **Figura 4.7** apresenta o diagrama simplificado proposto para o Módulo Científico. Os filtros passa-banda na entrada servem para remover um possível nível DC do sinal e reduzir ruídos.

Essa abordagem permite condicionar o sinal de saída do hidrofone para uma ampla faixa de operação. Duas curvas teóricas interpoladas de amplificação, uma para cada método do diagrama da **Figura 4.7** (I e II), são apresentadas nas **Figuras 4.8 e 4.9**, sendo a segunda uma representação da primeira em escala logarítmica.

No eixo horizontal são os valores de resistência para cada passo dos 2 potenciômetros digitais, variando de 100 em 100 ohms e no eixo vertical são os valores da tensão do sinal na condição de entrada em cada um dos 2 amplificadores.

As cores nas curvas indicam faixas de tensões de saída, com verde representando uma amplificação equilibrada e a faixa amarela indicando resultados próximos à amplificação equilibrada.

Definiu-se como amplificação equilibrada, a condição em que um sinal amplificado tem amplitude entre 30% e 50% da amplitude máxima da faixa do ADC, o que dá amplitudes de 990 mV e de 1650 mV. Essa limitação pode parecer bem abaixo do limite de 3300 mV, mas busca evitar saturações de parte do sinal para casos de aumento de intensidade muito rápido. Vale ressaltar ainda que o uso do ADC, por exemplo, com resolução de 12 bits permitiria digitalizar o sinal amplificado com variação de ordem menor que 1 mV, já que $2^{12} = 4096 > 3300$, onde 3300 é a faixa de entrada do ADC. Desta forma, para os limites estipulados de 990 e 1650 mV, equivalem, respectivamente, a 1228 posições inteiras (30% de 4096) e 2048 posições inteiras (50% de 4096), o que geraria boa digitalização.

O primeiro potenciômetro atua para alterar a resistência de ganho do primeiro amplificador. O *firmware* deve ser programado para procurar um valor de passo para que a saída tenha uma amplificação equilibrada e, se for encontrado, o Método I será considerado. Vale ressaltar que é definido no *trimpot* mecânico de tensão

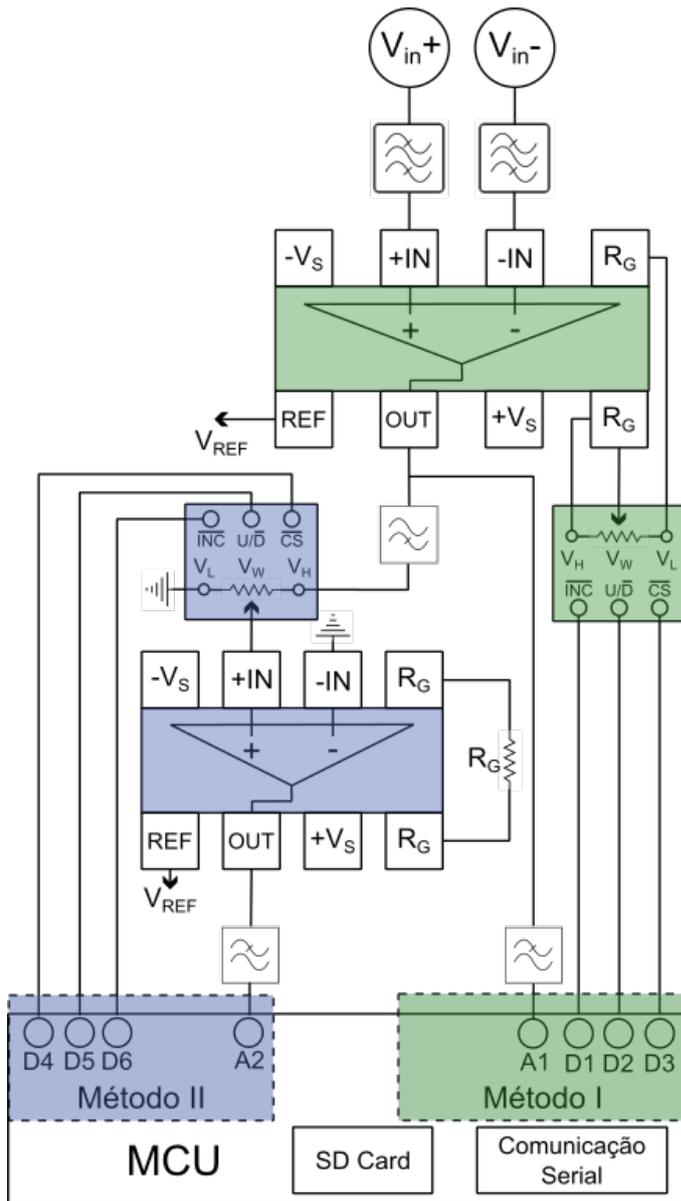


Figura 4.7: Diagrama simplificado do Módulo Científico

de referência um valor de 1650 mV para que o sinal de saída tenha sempre tensão positiva.

Caso a saída do primeiro amplificador não tenha solução para amplificação equilibrada, o primeiro potenciômetro é definido com resistência máxima, o filtro passa-alta remove esse nível DC de 1650 mV e o segundo potenciômetro atua como divisor resistivo. O segundo amplificador é configurado com resistência de ganho fixa e também com 1650 mV para a tensão de referência. O *firmware* deve ser programado para encontrar um valor de passo para o segundo potenciômetro de modo que a amplificação seja equilibrada.

Em ambos os métodos, o sinal chega no MCU após passar por um filtro passa-baixa para redução de ruídos.

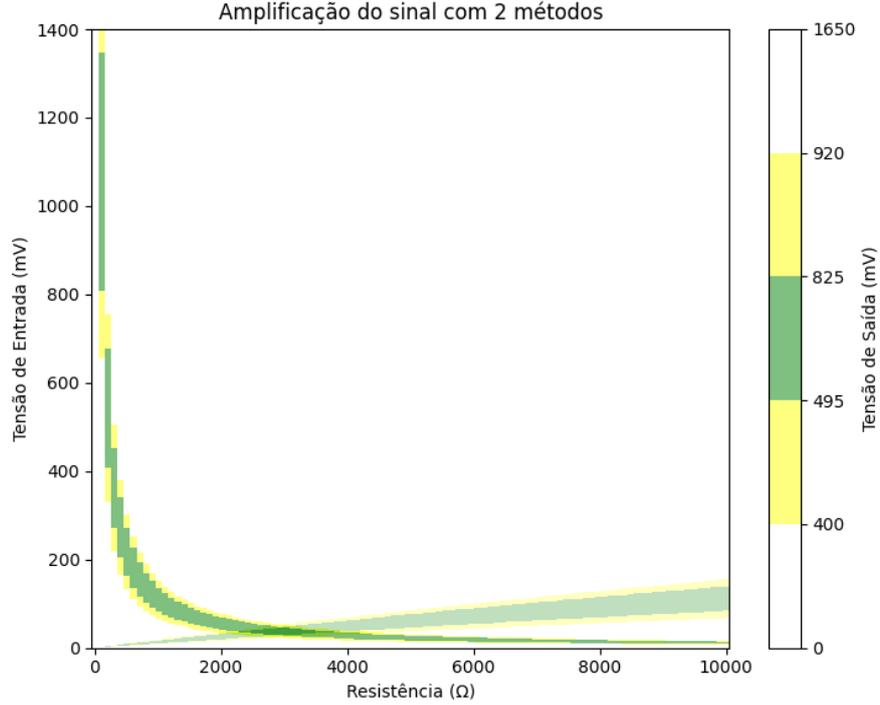


Figura 4.8: Curva de amplificação obtida pela sobreposição das curvas características das duas abordagens

As **Equações 4.2 e 4.4** apresentam, respectivamente, os cálculos teóricos de tensão de saída no Método I e no Método II.

$$V_{1out} = GV_{in} \quad (4.2)$$

Onde:

$$G = 1 + \left(\frac{49,4k\Omega}{100(s_1 + 1)} \right) \quad (4.3)$$

- s_1 é o número do passo do primeiro potenciômetro
- G é o ganho do primeiro amplificador
- V_{in} é a tensão de saída do hidrofone

$$V_{2out} = G'V_{1out}(s_{1max}) \left(\frac{s_2 + 1}{100} \right) \quad (4.4)$$

ou

$$V_{2out} = (G'G_{min})V_{in} \left(\frac{s_2 + 1}{100} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

$$G' \approx 5,05 \quad (4.6)$$

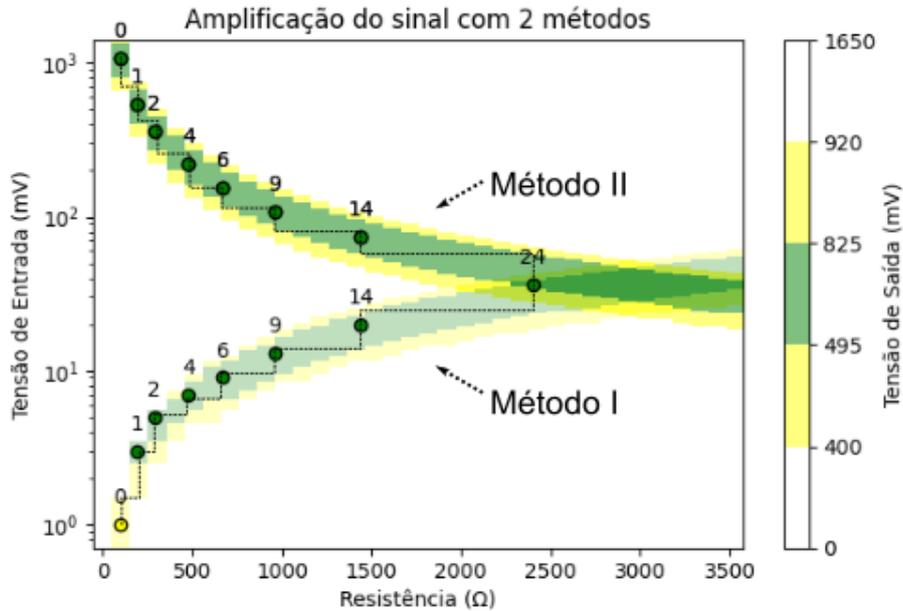


Figura 4.9: Curva de amplificação obtida pela sobreposição das curvas características das duas abordagens (*zoom*)

- G' é o ganho fixo do segundo amplificador
- s_2 é o número do passo do segundo potenciômetro
- $V_{1out}(s_{1max})$ é a tensão de saída do primeiro amplificador configurado com resistência de ganho máxima

As curvas foram geradas considerando um valor de 5,05 para G' para que o ganho combinado $G'G_{min}$ tivesse um valor de 30, já que $G_{min} = G(99) = 5,94$. Isso foi apenas uma definição para facilitar a verificação dos valores calculados no algoritmo de geração das curvas teóricas. Por outro lado, a definição apresentou um bom resultado e foi mantida, como apresentado na figura 4.9. Essa informação é importante para reconstruir o sinal original na análise dos dados coletados.

Vale observar na **Figura 4.9**, que foi possível limitar um conjunto com poucos passos dos 100 disponíveis nos potenciômetros (0, 1, 2, 4, 6, 9, 14 e 24).

Por fim, ao analisar as curvas, foram definidas as seguintes faixas de amplitude de saída de sinal do hidrofone ou de outros instrumentos analógicos para cada método:

- Método I - entre 1 e 80 mV
- Método II - entre 80 até 2700 mV

Algoritmo de seleção de método e ajuste ganho

As **Tabelas 4.4 até 4.5** apresentam as matrizes teóricas de limiares do pico do segmento de n amostras em que ocorrem as alterações de passo. O caminho tracejado da **Figura 4.9** representa apenas as alterações adjacentes entre posições de ajuste. Com a abordagem das matrizes, se ocorrer uma alteração abrupta na amplitude, o

algoritmo poderia alterar diretamente para a posição mais adequada sem passar pelas posições intermediárias. Em outras palavras, cada elemento $L_{i,j}$ da matriz indica o limiar para mudar do passo i para o passo j . Essa abordagem de alteração direta minimizaria o tempo de processamento de ajuste do ganho e, conseqüentemente, maximiza a taxa de amostragem.

Tabela 4.4: Matriz de limiares de alteração do passo para o Método I (em mV)

| Passo | 24 | 14 | 9 | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 24 | - | 2145 | 1993 | 1899 | 1826 | 1754 | 1723 | 1692 |
| 14 | 2475 | - | 2145 | 2057 | 1938 | 1820 | 1769 | 1718 |
| 9 | 2834 | 2475 | - | 2145 | 2078 | 1902 | 1826 | 1751 |
| 6 | 3100 | 2688 | 2475 | - | 2145 | 2008 | 1901 | 1793 |
| 4 | - | 2947 | 2598 | 2475 | - | 2049 | 1999 | 1850 |
| 2 | - | - | 3100 | 2727 | 2478 | - | 2145 | 1981 |
| 1 | - | - | - | 3100 | 2766 | 2475 | - | 2145 |
| 0 | - | - | - | - | - | 2888 | 2475 | - |

Tabela 4.5: Matriz de limiares de alteração do passo para o Método II (em mV)

| Passo | 24 | 14 | 9 | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 24 | - | 2475 | 2888 | - | - | - | - | - |
| 14 | 2145 | - | 2475 | 2708 | 3000 | - | - | - |
| 9 | 1983 | 2145 | - | 2475 | 2640 | - | - | - |
| 6 | 1883 | 2036 | 2145 | - | 2475 | 2805 | - | - |
| 4 | 1817 | 1926 | 2064 | 2145 | - | 2477 | 2888 | - |
| 2 | 1750 | 1816 | 1898 | 2004 | 2144 | - | 2475 | 3000 |
| 1 | 1717 | 1760 | 1816 | 1886 | 1981 | 2145 | - | 2475 |
| 0 | 1683 | 1705 | 1733 | 1768 | 1815 | 1925 | 2145 | - |

A amplitude do sinal de entrada é considerada como a amplitude de um segmento de n amostras do sinal, onde n é definido pelo usuário, relativo a um intervalo imediatamente anterior ao instante de escolha de método e ajuste de ganho. Em outras palavras, o método busca prever, em tempo real, o ganho ideal para amplificar as próximas amostras de dados do sinal com base nas últimas n amostras.

Por exemplo, se o interesse for estudar sinais de frequências próximas a 1 kHz, e supondo que o dispositivo realizasse a amostragem em até aproximadamente 10 ksp/s, o usuário poderia definir $n = 20$ para que o algoritmo realizasse a verificação de necessidade de alternância de método de amplificação e o ajuste de ganho a cada

2 ciclos de sinal ($20 = (2) \times 10 / 1$), com base na amplitude desse segmento de sinal de dois ciclos.

O algoritmo implementado está apresentado na **Figura 4.10**, cujos símbolos são definidos a seguir:

- s_1 - passo do primeiro potenciômetro
- s_2 - passo do segundo potenciômetro
- n - tamanho do segmento de sinal (definido pelo usuário)
- p_{SEG} - valor de pico do segmento atual de n amostras

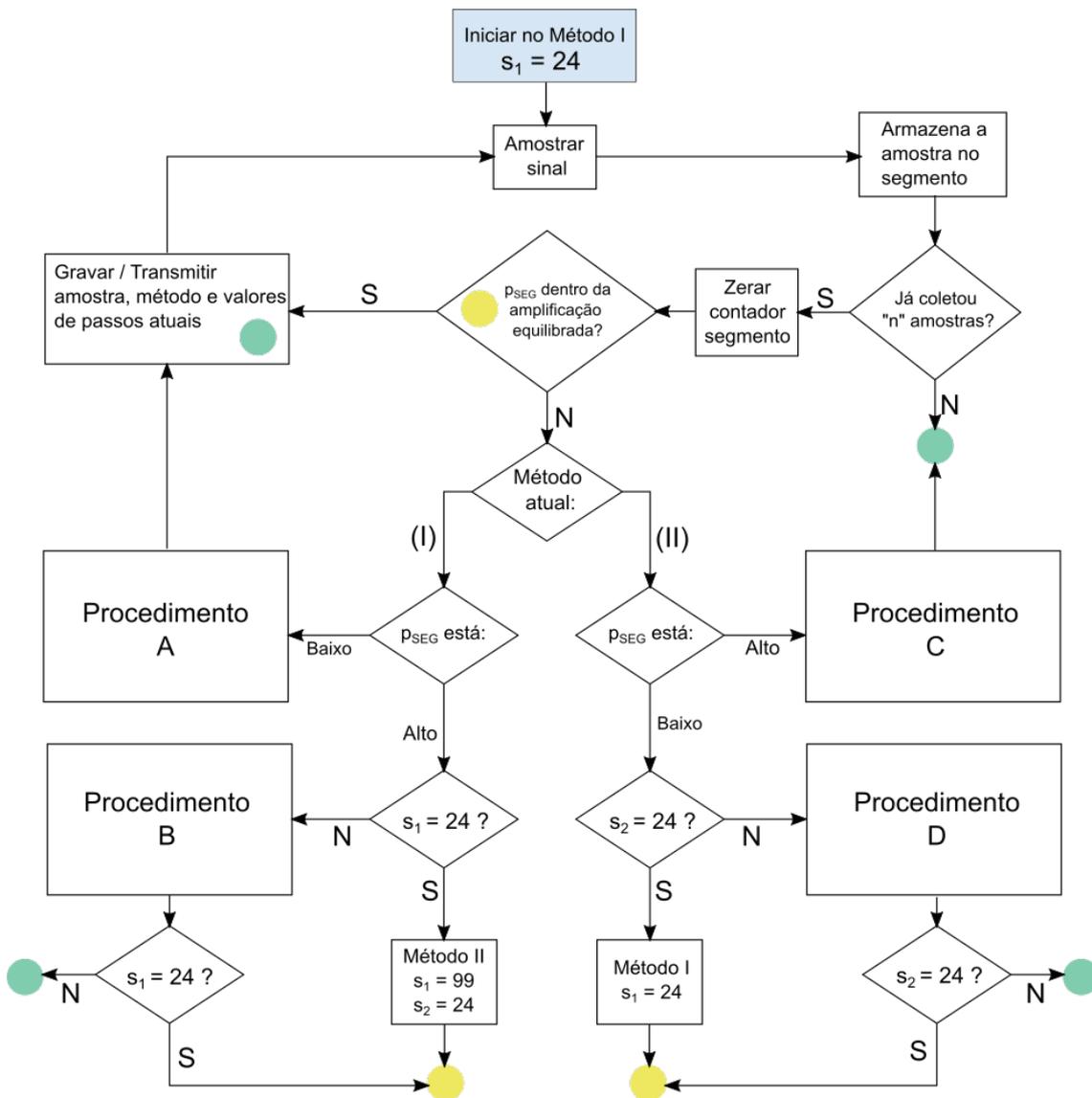


Figura 4.10: Algoritmo de Amplificação Automática

• **Procedimento A**

s_1 reduz para o último passo das colunas da tabela de limiares em que o valor do limiar é maior que p_{SEG}

- **Procedimento B**

s_1 aumenta para o primeiro passo das colunas da tabela de limiares em que o valor do limiar é menor que p_{SEG}

- **Procedimento C**

s_2 reduz para o último passo das colunas da tabela de limiares em que o valor do limiar é menor que p_{SEG}

- **Procedimento D**

s_2 aumenta para o primeiro passo das colunas da tabela de limiares em que o valor do limiar é maior que p_{SEG}

O dispositivo é configurado para iniciar a amplificação usando o método I com passo 24, que é o passo em que há alternância de método (se necessário), quando o segmento de sinal de entrada tem amplitude em torno de 80 mV.

O sinal é amplificado nessa configuração até formar o primeiro segmento de n amostras. Em seguida, ele começa a verificar se o pico do último segmento amplificado (p_{SEG}) está dentro do intervalo da amplificação equilibrada e, caso negativo, o algoritmo verifica se vai ser necessário alternar o método ou aumentar ou diminuir o passo.

Se o método I está sendo utilizado, a alternância para o método II ocorre quando o dispositivo está com o passo 24 e a amplificação acima do limiar máximo da amplificação equilibrada. Já o caminho contrário, para alterar para o método I, o dispositivo também está com passo 24 e a amplificação está abaixo do limiar mínimo de amplificação equilibrada.

No caso de aumento ou diminuição do passo, o algoritmo tem um *loop* para verificar na matriz de limiares o limiar de mudança direta de passo, conforme procedimentos A, B, C e D descritos.

Vale destacar que os círculos coloridos no fluxograma foram usados apenas para simplificar o desenho, de modo que o círculo verde significa um caminho para o bloco "Gravar / Transmitir amostra, método e valores de passos atuais" e o círculo amarelo significa um caminho para o bloco " p_{SEG} dentro da amplificação equilibrada?".

Descrição geral de funcionalidade do *Firmware*

Foram analisadas as compatibilidades entre os componentes selecionados e a placa escolhida.

A **Figura 4.11** apresenta uma solução possível para a implementação do *firmware* do dispositivo, com base nesses componentes.

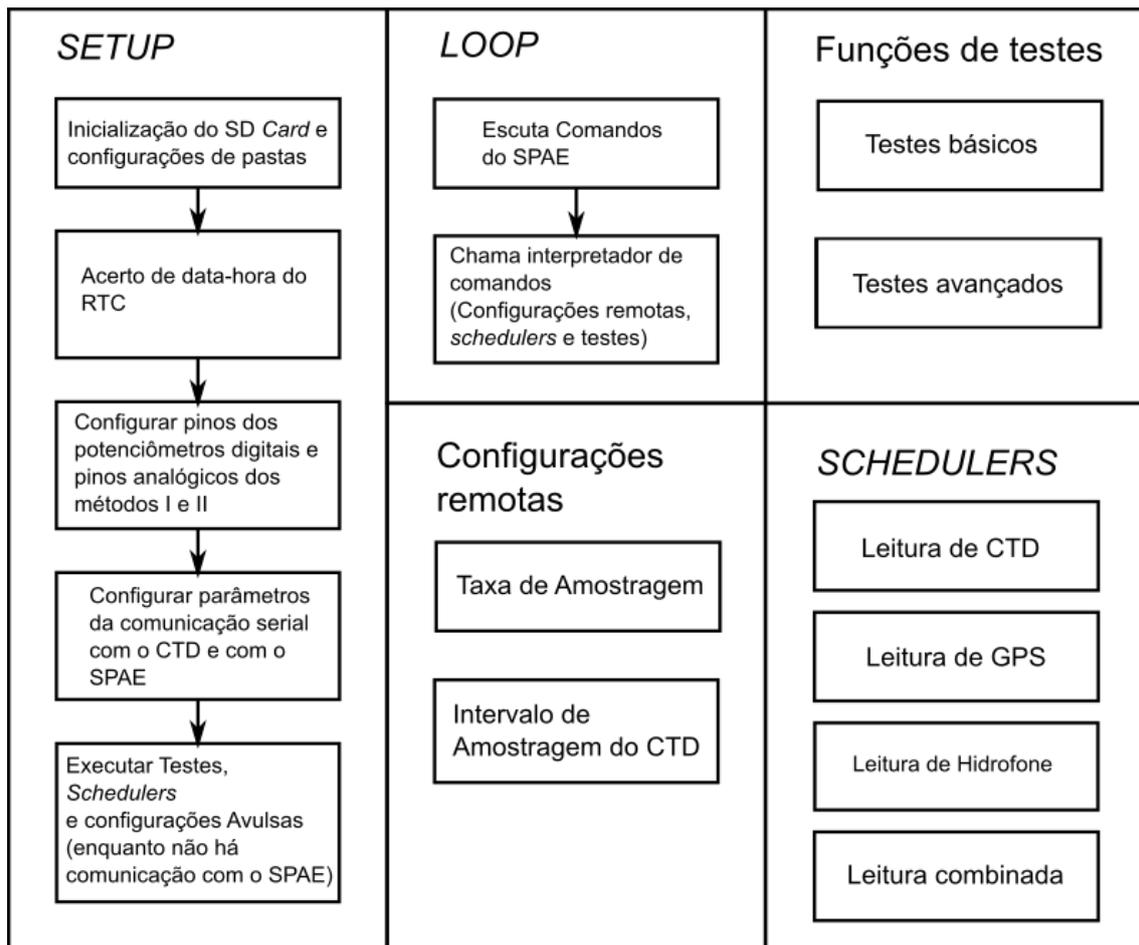


Figura 4.11: Descrição geral de funcionalidade do *firmware*

Na função *setup* serão implementadas todas as configurações básicas. No caso específico da placa escolhida, o RTC (*Real-Time Clock*) integrado dela não tem uma bateria de *backup*, logo sempre que a placa fica sem energia, o RTC é zerado. Para os primeiros testes, o tempo zero do RTC será definido via código no *setup*. Outra abordagem que poderia ser testada é a criação de uma configuração remota para acerto do RTC através do envio de um comando com os parâmetros de data-hora em tempo real pelo Módulo de Interação. Outra abordagem é a aquisição de um módulo RTC externo.

A função *loop* só será implementada quando houver comunicação entre o Módulo Científico e o Módulo de Interação. Nesse nível de maturidade, o ODAS ficará em modo de espera até que os *schedulers* sejam ativados, que são as rotinas responsáveis por organizar e controlar a execução de tarefas para a operação do ODAS.

No início do desenvolvimento em bancada, seriam exploradas apenas a função *setup* e as funções de testes para as pequenas montagens a nível TRL 3.

Espera-se desenvolver um *firmware* bem estruturado, com comentários escritos de forma padronizada para uma melhor continuidade no desenvolvimento, o qual pode se dar por equipes de programação com diversos programadores e, ainda, que

seja implementado de uma forma que facilite a sua adaptação para outros *hardwares*.

Essa estrutura organizada pode ser atingida com o uso de variáveis globais em arquivos próprios, criação de classes específicas, geração de fluxogramas dos algoritmos para uma compreensão gráfica do código, entre outras abordagens para otimizar o desenvolvimento.

Os detalhes das funções apresentadas estão discutidos no próximo nível de maturidade.

4.2.4 Publicar observações em revistas científicas ou afins

Algumas publicações sobre os conceitos críticos para o funcionamento esperado do ODAS foram realizadas.

Foi apresentado o trabalho intitulado *Sistema de aquisição de dados oceanográficos multipropósito em tempo real* no XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite, realizado na cidade de Cabo Frio/RJ, em 2023. Foram discutidas não só as ideias para o Módulo de Interação e conceitos teóricos críticos, mas também atividades realizadas nos níveis TRL / STRL 3 e 4 do ODAS (SOUZA, 2023).

O trabalho intitulado *Dispositivo embarcado para aquisição de sinais com mudança do método de amplificação e controle de ganho* foi publicado e apresentado no XXV Congresso Brasileiro de Automática, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, em 2024. De semelhante modo, foram apresentados resultados da implementação dos conceitos críticos do ODAS (SOUZA *et al.*, 2024).

4.2.5 Avaliação em TRL / STRL 2

Até aqui foram realizados desenvolvimentos conceituais e teóricos, com geração de ideias e elaboração de planos. Os conceitos críticos do ODAS foram bem definidos e diagramas lógicos para o *firmware* foram apresentados. O trabalho realizado nesse ambiente de escritório foi considerado satisfatório para prosseguir com os próximos passos em ambiente de laboratório.

O ODAS até aqui também foi um produto textual. A **Tabela 4.6** sintetiza o produto conceituado com suas principais características.

Tabela 4.6: Síntese do conceito do ODAS proposto

| Item | Descrição |
|------------------------------|---|
| MCU | ATSAMD21G18 com o processador 32-Bit ARM Cortex M0 |
| Canais Analógicos e Digitais | 20 GPIO, 14 canais de 12 bits para conversão AD e 1 DAC de 10 bits |
| Interfaces de comunicação | UART/USART, I2C ou SPI |
| Sistema de Energia | + 5 V e - 5 V (Módulo Científico) 12 V (CTD) 24 V (Hidrofone) |
| Funções críticas | Leitura de CTD, GPS e outros instrumentos digitais Leitura de Hidrofone para sinais de até 1 kHz, com amplificação automatizada para sinais de entrada com amplitudes entre 1 mV - 2700 mV |
| <i>Firmware</i> | Estruturado em 5 grandes grupos: <i>SETUP</i> , <i>LOOP</i> , Configurações remotas, Funções de testes e <i>SCHEDULERS</i> Linguagem: C++ ou <i>CircuitPython</i> |
| Módulo de Interação | SPAЕ - Processamento de dados e comandos e armazenamento em banco de dados em nuvem SCM - Controle do ODAS e monitoramento de dados pelo usuário |

4.3 TRL / STRL 3 - Prova do conceito

Nessa fase é onde se inicia o ambiente laboratorial. Serão apresentados os primeiros testes e pequenas montagens com partes isoladas do novo ODAS.

4.3.1 Preparação para os experimentos

Para testar e garantir o desempenho e a confiabilidade da aquisição analógica do dispositivo, foram utilizados o gerador de funções modelo CFG250 da Tektronix (TEKTRONIX, 2018), com capacidade de gerar sinais de até 2 MHz e controle preciso de amplitude, e o osciloscópio modelo TBS 1072B, também da Tektronix, com largura de banda de 70 MHz e taxa de amostragem de até 1 GS/s (TEKTRONIX, 2024).

Esses equipamentos foram escolhidos para, respectivamente, simular a fonte acústica e visualizar graficamente o sinal, permitindo verificar a correspondência entre

os parâmetros configurados no gerador e a saída do ADC do dispositivo.

Preparação dos ambientes de implementação de *software*

Conforme instruções na página oficial da placa selecionada (ADAFRUIT INDUSTRIES, 2024a), é sugerido o uso do Arduino IDE para desenvolvimento do *firmware*. No entanto, foi definido o uso do VS Code, devido à experiência do autor e por ele ser compatível com a extensão *PlatformIO*, que é uma plataforma de desenvolvimento projetada para facilitar a criação de projetos para Internet das Coisas (IoT) e sistemas embarcados usando as linguagens compiladas C e C++, com suporte para diversos microcontroladores, incluindo o utilizado neste projeto, e instalação fácil de inúmeras bibliotecas (PLATFORMIO LABS, 2024).

O VS Code também serviria para a implementação dos *softwares* do Módulo de Interação. Além disso, ele pode ser integrado facilmente com o GitHub, que é uma plataforma de hospedagem de código-fonte que utiliza o controle de versão Git. Ele permite a colaboração em projetos de *software*, oferecendo ferramentas para rastrear mudanças, gerenciar versões e integrar *workflows* de desenvolvimento. No contexto da escala STRL, pode ser bem aproveitado tanto para projetos individuais quanto colaborativos, com suporte a repositórios públicos e privados (GITHUB, INC., 2024).

Por outro lado, a placa também suporta a biblioteca *Adafruit CircuitPython* para implementação em Python. Foi instalado o Mu Editor para testes iniciais (ADAFRUIT INDUSTRIES, 2024b).

Dessa forma, os primeiros códigos seriam testados nas 2 diferentes linguagens compatíveis para comparar seus desempenhos.

4.3.2 Implementação e testes de funções básicas

Nessa etapa, foram implementadas algumas funções de testes básicos do diagrama da **Figura 4.11**.

As funções criadas foram:

- Ajuste de Data-hora do RTC
- Leitura de um pino analógico
- Leitura da tensão da bateria
- Teste de taxa de amostragem
- Gravação de dados no SD Card

Foi usada a linguagem C++ no VS Code em um novo projeto usando o *PlatformIO* e a codificação foi feita em arquivo único (*main.cpp*).

Testes de taxa de amostragem para linguagens compatíveis

O algoritmo da função de teste de taxa de amostragem também foi codificado com o *CircuitPython* para investigar o desempenho do microcontrolador com cada uma das 2 linguagens compatíveis com a placa.

A taxa de processamento que o dispositivo atingiria é um fator crítico, já que uma das operações esperadas é a aquisição de sinais analógicos.

Diante disso, para a definição da linguagem que seria adotada, foi implementado um teste de taxa de amostragem do sinal analógico da tensão da bateria.

Para padronizar o teste, em ambas as linguagens, a tensão de bateria foi lida em sua forma de valor inteiro do pino analógico durante 5 segundos por 8 vezes, com velocidade máxima de processamento suportada e foi armazenada em uma mesma variável em cada execução do *loop* do *firmware*. A **Tabela 4.7** compara os resultados encontrados.

Tabela 4.7: Resultados do teste de taxa de amostragem

| Teste | <i>CircuitPython</i> (ksps) | C++ (ksps) |
|--------------------------|-----------------------------|---------------|
| #1 | 4,847 | 44,784 |
| #2 | 4,846 | 44,789 |
| #3 | 4,847 | 44,787 |
| #4 | 4,847 | 44,784 |
| #5 | 4,847 | 44,791 |
| #6 | 4,846 | 44,781 |
| #7 | 4,845 | 44,782 |
| #8 | 4,847 | 44,795 |
| Taxa Média (ksps) | 4,847 | 44,786 |

Os resultados mostraram uma eficiência na amostragem bem superior ao utilizar a linguagem C++, o que era de se esperar, já que o *CircuitPython* funciona de forma interpretada em tempo de execução, enquanto que o C++ é compilado antes da execução.

Dessa forma, com a taxa alcançada ao utilizar o *CircuitPython*, a operação de aquisição acústica do dispositivo seria inviável. Mesmo sem implementar todas as tarefas necessárias, como liberação de dados da memória volátil, operações aritméticas e gravação no cartão SD, a amostragem média ficou abaixo de 5 ksps, o que comprometeria a fidelidade e representatividade dos sinais amostrados, que seriam distorcidos. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar C++ no desenvolvimento do *firmware* do ODAS.

Testes de desempenho do ADC

O gerador de sinais e o osciloscópio foram utilizados para simular sinais em diferentes frequências próximas a 1 kHz, com amplitudes de 100 mV e nível médio do sinal em 1,65 V, que representa a metade da faixa de operação do ADC. Foram testados sinais até essa ordem de frequência em razão do objetivo proposto de aquisição de sinais de baixa frequência, que compõem fontes da biodiversidade costeira e do tráfego de embarcações presente na Enseada dos Anjos, em Arraial do Cabo, como apresentado no Capítulo 1.

Foram realizados testes com o ADC em resoluções de 8, 10 e 12 bits e frequências de 500, 1000 e 2000 Hz.

Foi programada uma função única para esse teste para realizar cada processo de amostragem e gravação no cartão SD. Foi incluído um atraso no código entre as mudanças de frequência para permitir o ajuste do sinal do gerador. Os *leds* foram utilizados para informar a finalização de cada processo.

A placa foi codificada para amostrar o sinal em cada caso a 10 ksps, usando como fonte de alimentação a bateria LiPO de 3,7 V.

Da **Figura 4.12 até 4.14** são apresentados os resultados da coleta dos dados sintéticos e comparações com seus respectivos sinais teóricos.

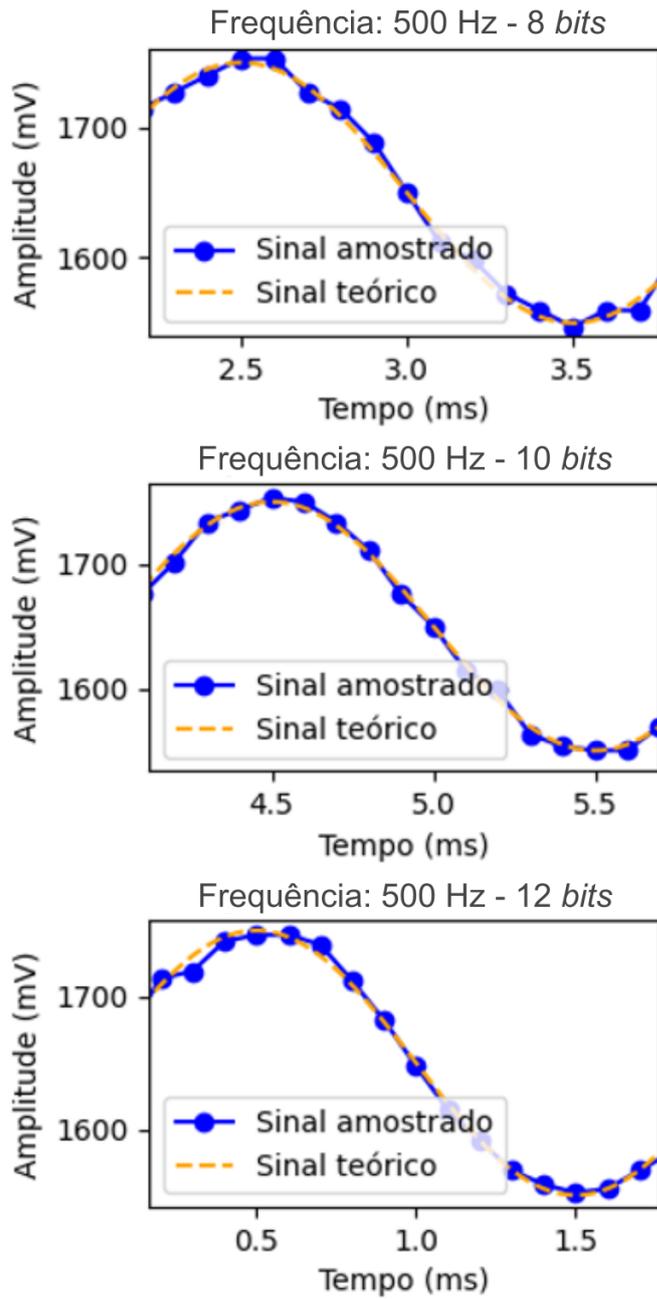


Figura 4.12: Digitalização para testes do ADC de sinal de 500 Hz

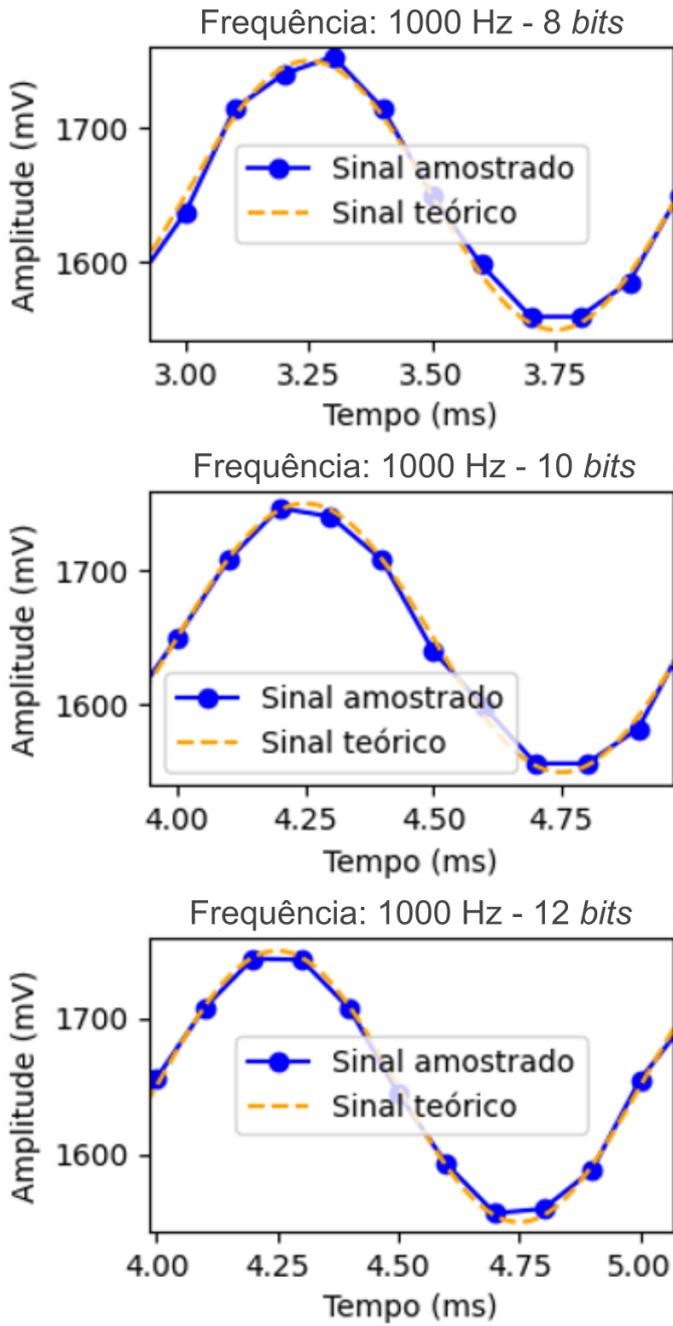


Figura 4.13: Digitalização para testes do ADC de sinal de 1 kHz

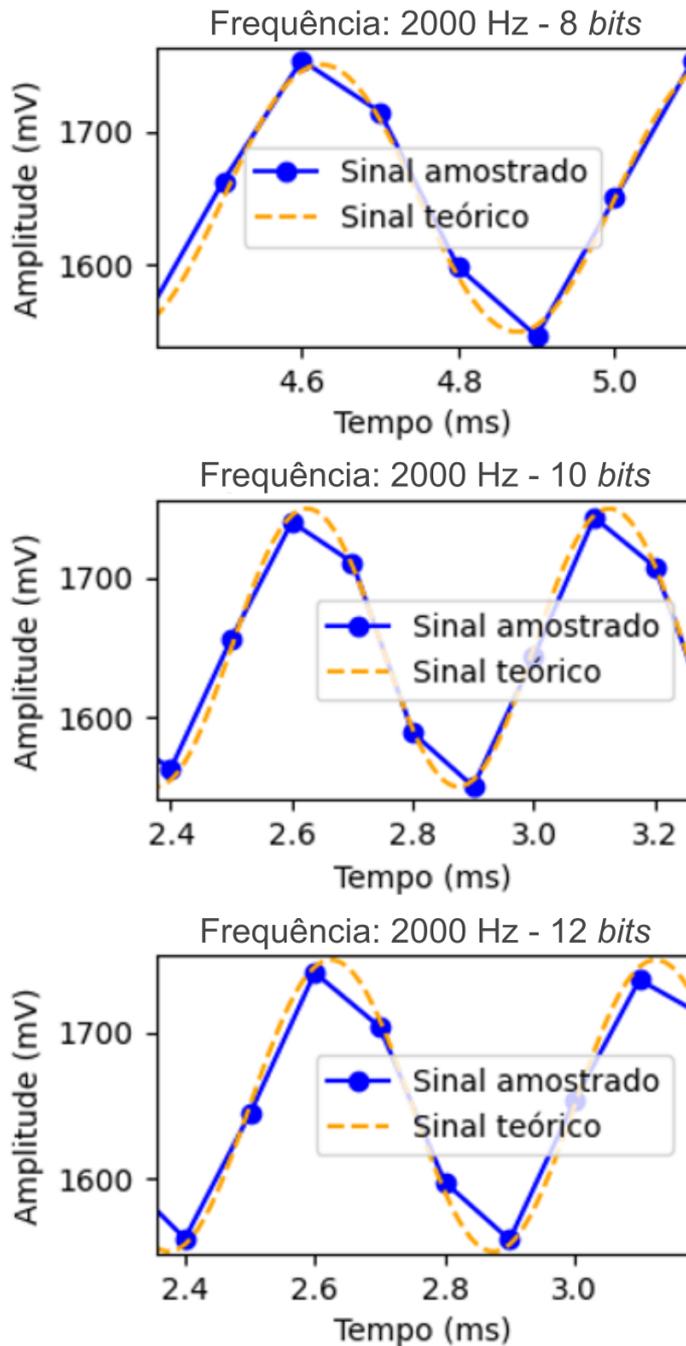


Figura 4.14: Digitalização para testes do ADC de sinal de 2 kHz

Não foi constatada muita diferença na qualidade entre as resoluções nessa ordem de grandeza de sinal. Visto que o conceito crítico do ODAS prevê amplificar os sinais para terem amplitudes entre 30% e 50% do limite do ADC (3300 mV). De qualquer modo, foi adotado o uso da resolução de 12 *bits* para os próximos experimentos.

Na última frequência de teste, 2 kHz, o sinal começa a ter um aspecto diferente do esperado, porém o seu espectro de frequência, conforme visto na **Figura 4.15**, ainda é muito bem definido, permitindo a identificação clara de sua frequência, sem considerar outros ruídos que estariam presentes na aquisição.

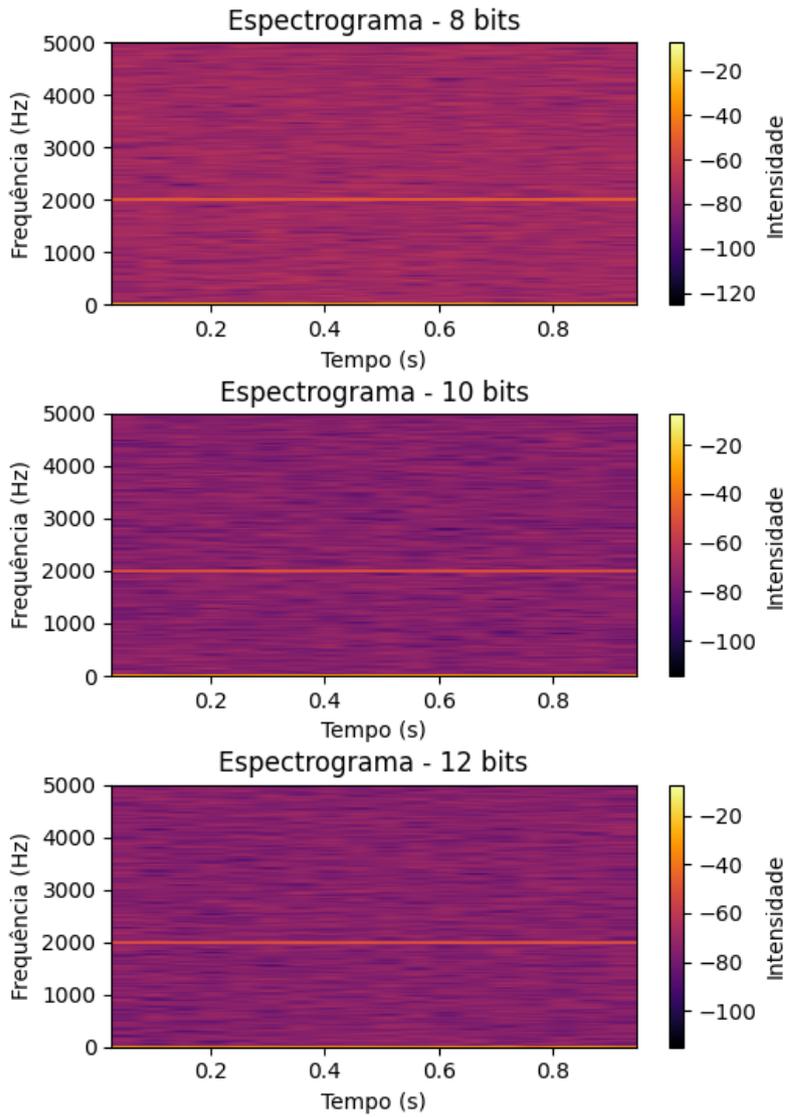


Figura 4.15: Espectro de frequência para o sinal de 2 kHz

Nesse estágio, o foco foi observar o desempenho do ADC de um sinal apenas com ruídos dos instrumentos, do circuito e da fonte de alimentação.

A **Figura 4.16** apresenta o resultado da digitalização do sinal de 1 kHz, utilizando a fonte de alimentação do próprio PC, através da conexão serial da placa.

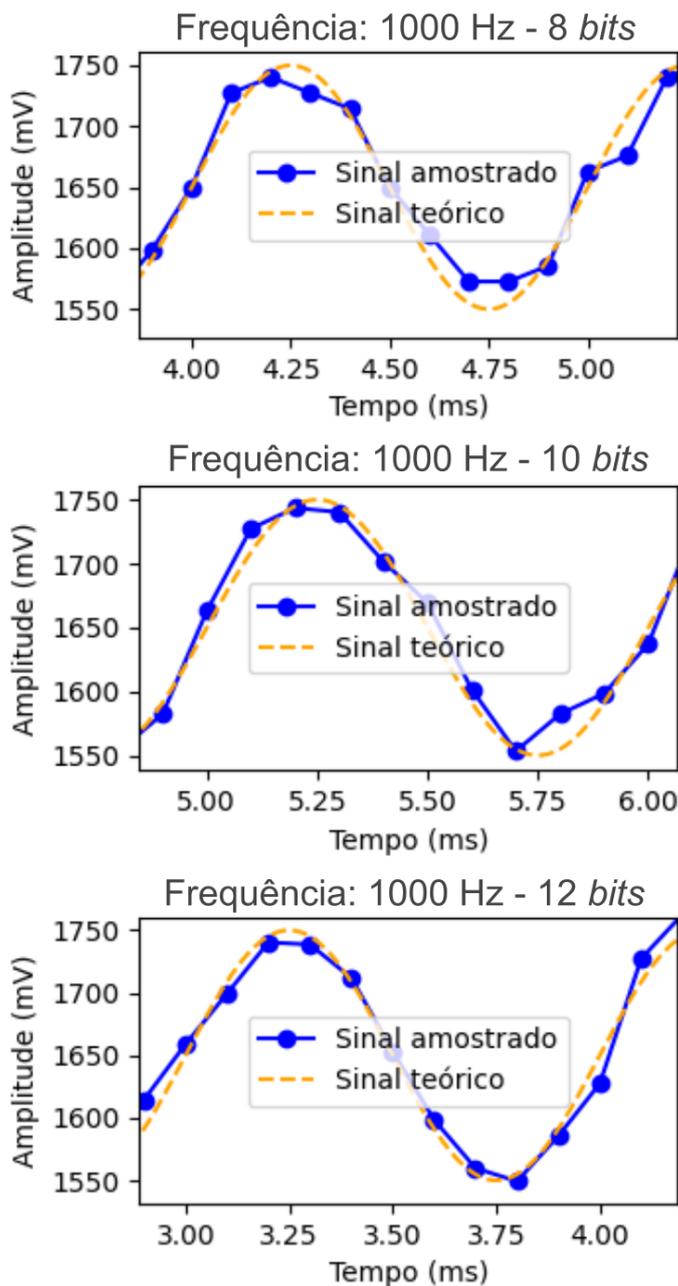


Figura 4.16: Digitalização de sinal com o PC como fonte de alimentação

A Tabela 4.8 apresenta os comparativos da relação SNR, conforme a Equação 4.7, para a aquisição de sinal de 1 kHz utilizando os dois tipos de sistemas de energia.

Tabela 4.8: Comparativos de SNR para a aquisição do sinal de 1 kHz com diferentes sistemas de energia

| Fonte | SNR (8 bits) | SNR (10 bits) | SNR (12 bits) |
|----------|--------------|---------------|---------------|
| PC | 41,43 dB | 41,53 dB | 41,56 dB |
| Baterias | 51,81 dB | 55,38 dB | 55,73 dB |

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) \quad (4.7)$$

Onde P_{signal} e $P_{\text{ruído}}$ são as potências do sinal e do ruído, respectivamente. Estas podem ser calculadas como:

$$P_{\text{sinal}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_{\text{teórico},i}^2 \quad (4.8)$$

$$P_{\text{ruído}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i^2 \quad (4.9)$$

Onde $s_{\text{teórico},i}$ são os valores do sinal esperado e n_i são os valores do ruído. O valor N é o número total de amostras.

A potência do ruído é calculada considerando o ruído como a diferença entre o sinal teórico e o sinal digitalizado:

$$n_i = s_{\text{teórico},i} - s_{\text{digitalizado},i} \quad (4.10)$$

Para realizar os cálculos dos SNR, foi utilizado um período de 1 segundo e o sinal teórico de referência para cada caso foi calculado usando uma resolução temporal de 50 ksp/s (cinco vezes a amostragem de aquisição do sinal pelo dispositivo). Além disso, foi considerada uma resolução infinita para o cálculo das tensões teóricas, o que faz com que parte do ruído seja contribuição exclusiva da digitalização com uma resolução finita.

Em razão da diferença entre o número de pontos da curva teórica (50.000) e da curva adquirida (10.000), foi necessário interpolar os sinais digitalizados para calcular a potência do ruído em cada ponto. O resultado validou que o uso das baterias melhora a qualidade da digitalização dos dados.

De forma geral, o teste com o ADC integrado ao *hardware* foi satisfatório, de modo que o ODAS possa operar na aquisição de sinais acústicos submarinos de até a ordem de 1 kHz, como aqueles oriundos de tráfego oceânico e de diversas fontes biológicas, apresentados na **Figura 2.2** do capítulo 2. Isso está alinhado com o objetivo deste trabalho que tange ao monitoramento acústico submarino de fontes de baixa frequência.

4.3.3 Implementação do SPAE e do sistema de comunicação

A primeira versão do SPAE (*Software* de Processamento e Armazenamento Externo) foi codificada apenas com um algoritmo para transmissão de dados. A linguagem utilizada foi *Python*, conforme discussão da **Seção 4.2.2**.

Foram implementadas as rotinas de comunicação serial entre a placa e o PC da Central de Processamento. A comunicação serial assíncrona foi configurada utilizando os pinos RX (11) e TX (10) da placa, conectados ao módulo HW-044, que realiza a conversão RS-232 para TTL.

Uma placa de circuito impresso padrão foi utilizada para construir o sistema de energia, soldando os reguladores de tensão LM7805 e LM7905 e demais componentes do circuito. As baterias de 12 V foram ligadas em série e conectadas ao sistema, fornecendo 5 V para a placa e para o módulo HW-044.

A comunicação serial foi configurada com os seguintes parâmetros nos códigos dos dois terminais:

- **Velocidade de transmissão (*baud rate*):** 460.800 bps
- **Configuração dos dados :** 8 bits de dados, sem paridade, 1 bit de parada

Para definir a velocidade de transmissão, foi considerado o envio de 10.000 amostras por segundo, quando o ODAS estiver operando com o *scheduler* de leitura de hidrofone. Além disso, devem ser transmitidas informações do método de amplificação e do passo utilizado no potenciômetro para a Central de Processamento, para permitir a medição do sinal em sua grandeza física.

A **Tabela 4.9** apresenta a solução adotada para otimizar o envio das informações usando até 2 *bytes*.

Tabela 4.9: Estrutura para transmissão de dados em 2 *bytes* (16 *bits*)

| <i>Bits</i> | Uso | Total |
|-------------|---|-------|
| 0-11 | Amostra de 12 bits | 12 |
| 12 | Método de amplificação (2 valores possíveis - [I, II]) | 1 |
| 13-15 | Passo do potenciômetro (8 valores possíveis - [0, 1, 2, 4, 6, 9, 14, 24]) | 3 |

Como os protocolos de comunicação serial são projetados para trabalhar com *bytes* completos e cada amostra é representada por mais de 1 *byte*, seria implementado o envio contínuo das informações de condicionamento de sinal. Vale destacar que nesse estágio ainda não havia sido implementada a função do *scheduler* de leitura do hidrofone e os testes de transmissão se limitaram a envios e recebimentos avulsos de 2 *bytes*.

Para o SPAE, foi utilizada a biblioteca `pyserial` para gerenciar a interface serial (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024). O módulo HW-044 foi conectado à placa usando uma *proto-board* e os testes de comunicação foram realizados com sucesso.

4.3.4 Implementação para uso do CTD e do GPS

A mesma estrutura implementada para a transmissão de dados entre o ODAS e o SPAE foi utilizada com uma segunda unidade do módulo HW-044 e a função do *scheduler* de leitura do CTD foi programada.

Foi consultado o manual do instrumento e utilizado seu *software* proprietário para ativar a transmissão dos dados via comunicação serial.

O CTD foi alimentado com o terminal do sistema de energia que fornece 12 V e foi conectado ao módulo HW-044. As sentenças NMEA (*National Marine Electronics Association*) com os dados foram recebidos pelo ODAS e foram transmitidos para o SPAE com sucesso. A operação foi realizada em bancada de laboratório.

Além disso, uma terceira unidade do módulo HW-044 foi utilizada e foi implementado o *scheduler* de leitura GPS. Como não havia um componente de GPS, foi utilizado o simulador GPS-Simulator para simular o envio, recebimento e interpretação das sentenças NMEA (MICROSOFT, 2024). O *scheduler* foi programado para interpretar sentenças GPRMC (*Recommended Minimum Specific GPS/Transit Data*), que também fornecem informações de curso e velocidade. O algoritmo foi testado com sucesso.

4.3.5 Testes e preparação de componentes para leitura do hidrofone

Os dois amplificadores de instrumentação AD620 foram testados separadamente para verificar seus funcionamentos. Para isso, eles foram alimentados com as saídas + 5 V e - 5 V do sistema de energia. Foram usados sinais sintéticos gerados pelo gerador de funções do laboratório. O potenciômetro mecânico manual de ajuste de ganho de um dos amplificadores foi removido e foram soldados terminais para conexão com um dos potenciômetros digitais X9c103s, para automatizar o ganho do sinal. Os *trimpots* para nível DC de referência foram ajustados para 1,65 V em ambos os amplificadores.

Os potenciômetros digitais também foram testados. Foi criada uma função de teste no *firmware*, onde são configurados os pinos de INC, U/D e CS, conforme descritos na **Seção 4.2.2**. Eles foram alimentados com +5 V e os incrementos e decrementos de passo foram testados usando o gerador de sinais com saída conectada ao terminal VH e o terra conectado ao VL. O terminal VW foi conectado ao osciloscópio para observar o comportamento do sinal ao mudar o passo.

No nível TRL 2, foram definidas as curvas teóricas de amplificação, considerando os valores nominais de resistência dos potenciômetros. Segundo o *datasheet*, os potenciômetros X9C103S, com resistência nominal de 10 k Ω , têm uma incerteza no valor total de $\pm 20\%$.

Foram medidos $9,62\text{ k}\Omega$ e $9,67\text{ k}\Omega$ para as resistências máximas dos potenciômetros. A partir desses resultados, as curvas teóricas sofreram uma compressão horizontal e os valores para as tabelas de limiares também foram ajustados. Vale destacar que, nesse estágio, os potenciômetros já foram identificados para os respectivos métodos de condicionamento automatizado de sinal (I e II).

4.3.6 Armazenamento em nuvem

Conforme discutido na **Seção 4.2.2**, o *firebase firestore* foi escolhido para armazenamento em nuvem devido à sua escalabilidade, facilidade de integração com aplicações em tempo real e suporte a operações eficientes de leitura e escrita. A escolha foi motivada pela necessidade de um banco de dados que permitisse a organização flexível de dados em coleções e documentos, além de oferecer confiabilidade para sincronização com múltiplas plataformas.

Nesse nível de maturidade, foi criada uma única coleção chamada "testes" para armazenar documentos de dados dos testes realizados nos tópicos anteriores que envolvem o uso do sistema de comunicação.

Para utilizar esse banco de dados, é necessário criar um projeto para ter acesso ao arquivo de credenciais, o qual deve ser utilizado nos aplicativos, incluindo o SPAE.

O SPAE foi atualizado para realizar a gravação dos dados recebidos do ODAS. Foi utilizada a biblioteca *google-coud-firestore* para a implementação da função de gravação (GOOGLE, 2024c). A gravação foi realizada com sucesso.

4.3.7 Implementação do SCM

Para o *Software* de Controle e Monitoramento (SCM), foi utilizada a linguagem *Dart* com o *framework Flutter*, conforme discutido na **Seção 4.2.2**.

Foi implementada uma interface inicial, ainda sem funcionamento, com aspectos esperados para interação com os usuários (**Figuras 4.17 e 4.18**)



Figura 4.17: Dashboard simplificado para o SCM

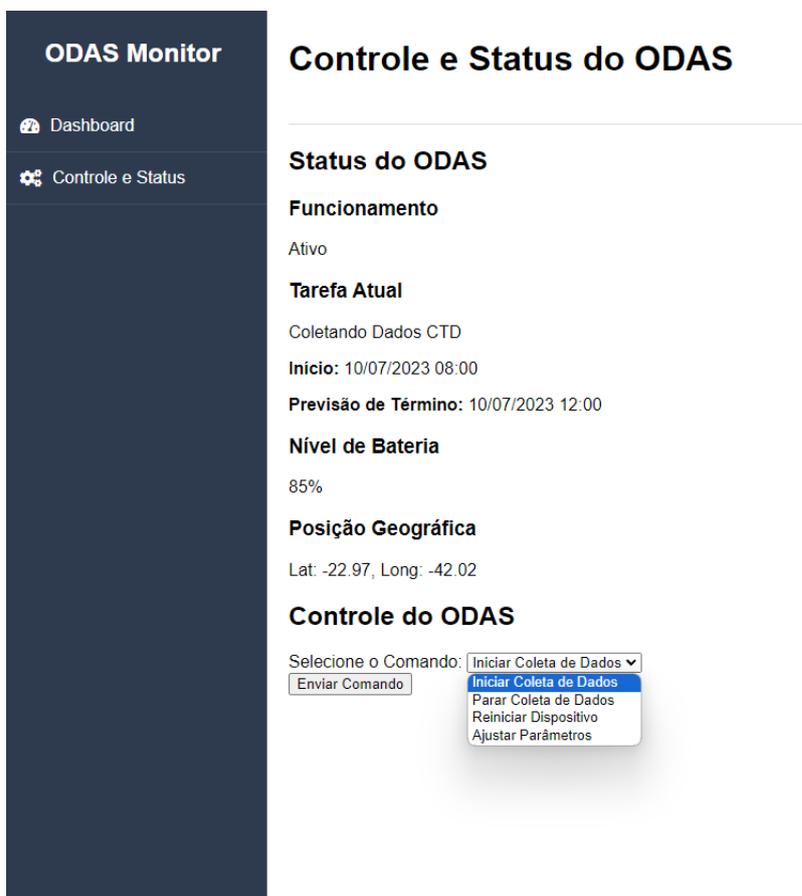


Figura 4.18: Tela para envio de comandos ao ODAS

De forma semelhante ao SPAE, no projeto flutter do SCM foi utilizado o pacote *cloud_firestore* para permitir o acesso às coleções (GOOGLE, 2024a).

Nesse estágio, ainda não foram implementadas exibições de dados em interface, mas o acesso a eles no *firestore* foi testado com sucesso.

4.3.8 Avaliação em TRL / STRL 3

Até aqui foram realizados procedimentos de testes mais concentrados em componentes individualmente, envolvendo o uso de sinais analógicos sintéticos, montagens específicas, codificação de funções de testes no *firmware* e a primeira versão do Módulo de Interação. No nível TRL 3, a integração de componentes se restringiu ao uso de *protoboards*.

O produto do hardware em nível TRL 3 se resumiu em:

- Sistema de energia com saídas reguladas
- Sistema de comunicação funcional
- Leitura de CTD e de GPS funcionais
- Componentes físicos para o *scheduler* de leitura de hidrofone testados e adaptados

O produto do *firmware* em nível STRL 3 se resumiu na programação de:

- Funções do SETUP
- Funções de testes, incluindo aquela de transmissão de dados com a Central de Processamento
- *Schedulers* de leitura do CTD e leitura do GPS

Vale destacar que as funções de leitura do CTD e do GPS foram acionadas pelo SETUP. A interpretação de comandos enviados pelo SCM via banco de dados em nuvem e via SPAE seria implementada no próximo nível de maturidade.

Ainda, foi incluído no produto do ODAS, nesse estágio, uma versão inicial do Módulo de Interação, com testes realizados para:

- Recebimento de dados do ODAS e gravação em nuvem (SPAE); e
- Monitoramento desses dados em tempo real em aplicativo *web* (SCM).

4.4 TRL / STRL 4 - Validação em ambiente de laboratório

A partir desse estágio, o ODAS começa a tomar uma forma mais integrada, onde são apresentadas a integração dos componentes por soldagem e testes completos do dispositivo no ambiente laboratorial. Isso também envolveu a evolução do *firmware* e do Módulo de Interação.

4.4.1 Integração inicial do *hardware* do ODAS

Neste estágio, foi desenvolvida a primeira versão do *hardware* integrado. Foram utilizadas 2 placas retangulares perfuradas para integração dos componentes, de

modo que cada placa tem 2 trilhas centrais conectadas longitudinalmente de borda a borda, onde foram conectados +5V e terra para serem conectados na maior parte dos componentes; e ilhas conectadas transversalmente para facilitar as conexões.

A ideia foi utilizar as 2 placas de forma espaçada, primeiro para facilitar a integração da placa de desenvolvimento, que apresenta pinos nos dois bordos e para que o *hardware* tivesse uma abertura central para passagem de conexões por baixo do conjunto.

A **Figura 4.19** ilustra essa abordagem para o arranjo usado e a **Figura 4.20** apresenta o resultado da integração com o uso de 2 baterias de 9 V para teste.

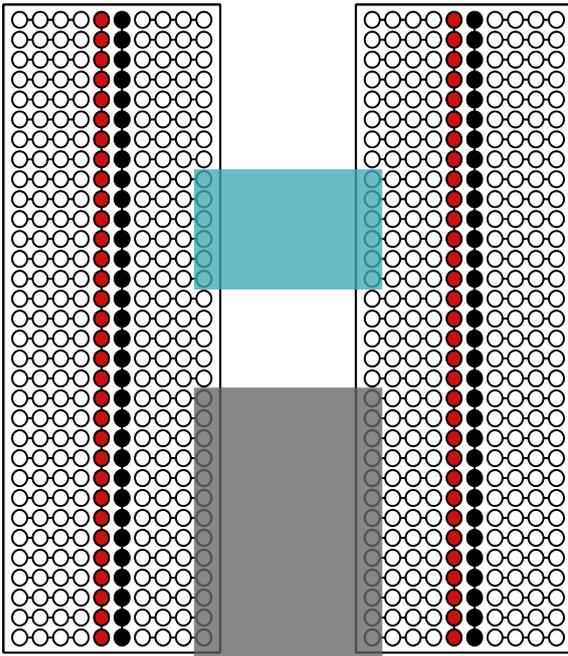


Figura 4.19: Abordagem do arranjo da primeira integração de componentes físicos

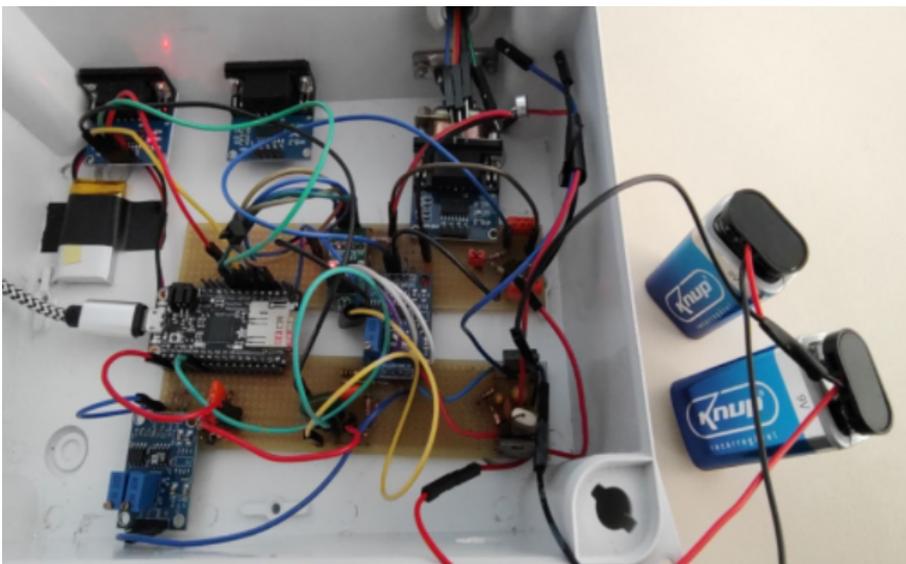


Figura 4.20: Primeira integração de componentes físicos

4.4.2 Implementação da função de interpretação de comandos

Até então, todas as tarefas realizadas para os testes iniciais foram programadas dentro da função *setup()* do *firmware*.

Foi iniciado o uso da função *loop()*, onde foi implementada uma rotina de escuta de dados recebidos no canal do sistema de comunicação. Sempre que uma informação é recebida, uma função de interpretação de comando é chamada para acionar tarefas específicas do ODAS.

4.4.3 Atualização do Módulo de Interação

Para permitir o uso em tempo real das ações de comando, foi criada uma coleção no *firestore* chamada "comandos" e foram testadas algumas tecnologias do *Google Firebase* e do *Google Cloud* (GOOGLE, 2024a), que não geraram custos para os testes realizados:

- ***Functions***

Foi criada uma função que roda no ambiente do *firebase* para informar alterações nas coleções de comandos e de testes.

- ***Pub/Sub***

Permite comunicação assíncrona entre sistemas através de um modelo de publicação e assinatura, garantindo entrega confiável e escalável de mensagens (GOOGLE, 2024b). Foi utilizado para o SPAE escutar os comandos executados pelo SCM.

Foi criada uma assinatura de comandos e foi implementado uma *function* para publicar no tópico da assinatura quando a coleção sofre alterações. Dessa forma, foi programado no código do SPAE uma função de inscrição no tópico.

- ***Messaging***

Foi implementado, também em *flutter*, um aplicativo *mobile* para rodar em segundo plano para que os usuários possam receber notificações no *smartphone* sobre os eventos ocorridos no banco de dados. Por exemplo, quando o SPAE armazena algum dado de interesse, o *Functions* aciona o *Messaging* para notificar o usuário (GOOGLE, 2024c).

- ***Extensões do firebase: Trigger Email from Firestore e Send Messages with Twilio***

Além disso, foram testadas com êxito algumas extensões para recebimento de *e-mail* e SMS quando são gerados novos documentos em uma coleção do

firestore (GOOGLE, 2024b). Foi utilizado o *SendGrid* como provedor (SENDGRID, 2024).

Assim, com essas tecnologias, foi possível interpretar comandos pelo SPAE e permitiu que os usuários recebessem notificações em tempo real sobre eventos no banco de dados.

4.4.4 Melhoria estrutural do *firmware*

Com o intuito de reservar espaço na memória *flash* integrada, foi utilizado o pré-processor do C++ para condicionar a compilação de trechos do código através do uso das diretivas `#if`, `#else` e `#endif`, que permitem incluir ou excluir blocos específicos do código com base em definições feitas no momento da compilação. Isso foi bastante útil para manter os códigos dos testes iniciais implementados nos níveis mais baixos de maturidade.

O código, anteriormente concentrado em um único arquivo (*main.cpp*), foi modularizado em diferentes arquivos `.h` e `.cpp` para melhorar a organização, manutenção e reutilização do código. Essa estrutura consiste em separar as definições de funções e classes em arquivos de cabeçalho (`.h`) e suas implementações em arquivos de código (`.cpp`), permitindo que diferentes partes do projeto sejam desenvolvidas e testadas de forma independente. Por exemplo, todas as funções de testes implementadas inicialmente foram realocadas e reestruturadas para os arquivos *util.h* e *util.cpp*. A **Figura 4.21** apresenta a estrutura de pastas e arquivos definida.

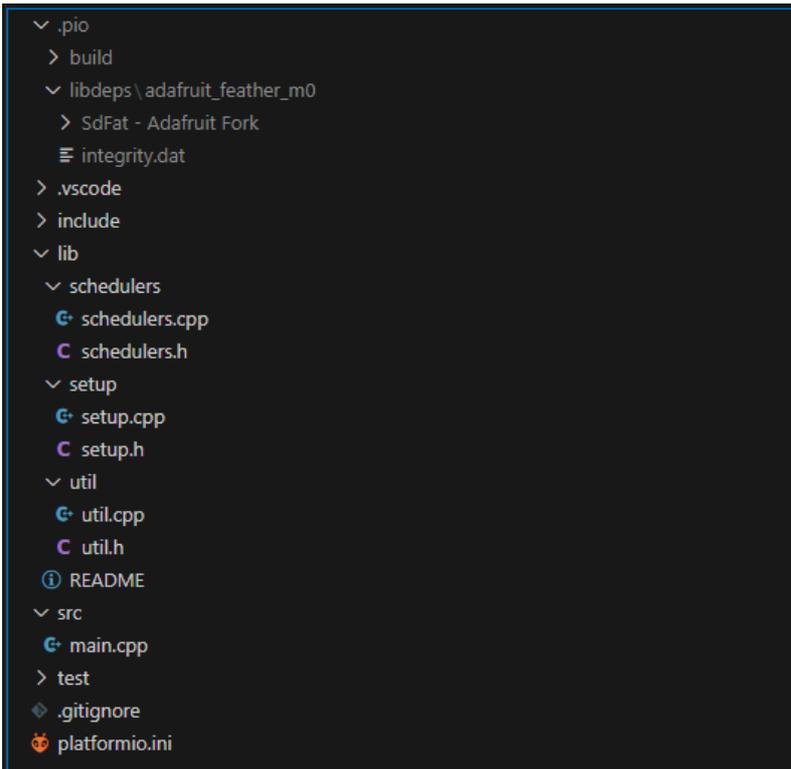


Figura 4.21: Modularização dos arquivos do *firmware*

- **Arquivo *main.cpp*** - ficou mais limpo, menor e mais organizado, contendo apenas as devidas chamadas nas funções *setup()* e *loop()*
- **Arquivos *setup*** - funções de configuração estática chamadas pela função *setup()* do *main.cpp* e funções de configuração remota chamadas pela função interpretadora de comandos
- **Arquivos *schedulers*** - funções operacionais do ODAS
- **Arquivos *util*** - função interpretadora de comandos e funções de testes. Vale destacar que algumas funções de testes deixaram de ser apenas para teste e se tornaram operacionais e são chamadas pelas funções dos *schedulers*, por exemplo, gravação de dados no cartão SD

4.4.5 Implementação para uso do hidrofone

Após a integração das partes do ODAS, foi criada a função do *scheduler* de leitura do hidrofone, considerando o algoritmo apresentado na **Figura 4.10** da **Seção 4.2.3**.

Vale destacar que dentro das funções de *scheduler* também foram implementadas rotinas de escuta de comandos. Por exemplo, enquanto o ODAS realiza uma tarefa de aquisição de sinais do hidrofone, o usuário poderia enviar um comando para abortar.

Foi feita uma nova calibração nos valores das tabelas de limiares de mudança de passo, usando o algoritmo do *firmware* para teste dos potenciômetros, sendo

selecionados os passos definidos no algoritmo (0, 1, 2, 4, 6, 9, 14 e 24), um a um.

Foi utilizado o gerador de sinais e o osciloscópio. Os valores de amplitude de tensão foram variando para observar se as saídas no osciloscópio estavam em conformidade com as "paredes" amarelas das curvas teóricas (**Figura 4.9**) que já tinham sofrido ajustes a nível TRL 3, quando as resistências reais dos potenciômetros tinham sido medidas. Lembrando que, para conferir a curva do Método II, o passo do primeiro potenciômetro deve ser fixado em 99. Foram realizados alguns ajustes nos valores dos limiares.

4.4.6 Teste da amplificação automatizada

Neste estágio, o ODAS estava pronto para o primeiro teste completo, onde seria verificado o desempenho da amplificação automatizada.

Para testar o dispositivo, foi montada em uma *proto-board* a segunda unidade da placa *feather m0 adalogger* conectada com o DAC (*Digital-to-Analog Converter*) MCP 4725 da *Microchip* (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2016). O seu *firmware* foi programado para gerar indefinidamente sinais de 500 Hz com variações na amplitude até uma faixa de 800 mV e até uma faixa de 2400 mV, ambos com 7 taxas de variação: 4, 8, 16, 32, 64, 128 e 256 mV/ciclo. A **Figura 4.22** apresenta um desses sinais de entrada, os quais foram adquiridos pelo ODAS a uma taxa de 8 ksps por um período de 10 s, totalizando em todas as aquisições um conjunto de 80.000 amostras, sendo 16 amostras por ciclo de sinal.

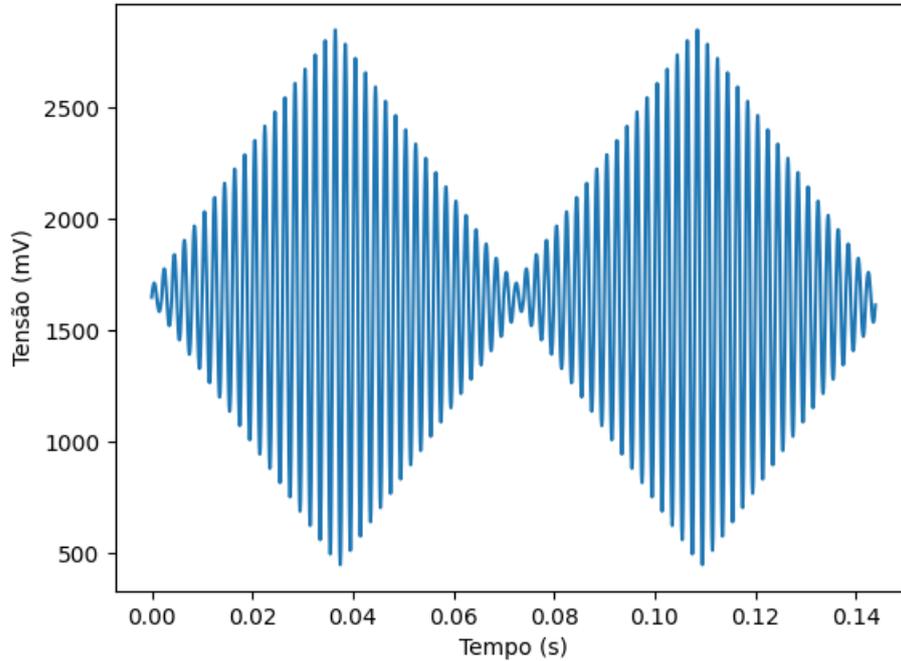


Figura 4.22: Sinal de 500 Hz com variação de amplitude até 2400 mV com taxa de variação de 64 mV/ciclo

Como o dispositivo com o DAC não tinha comunicação com outra interface, o seu *firmware* teve que ser alterado manualmente para cada experimento, variando os parâmetros de amplitude máxima e taxa de variação.

O teste avaliaria se o ODAS seria capaz de realizar a amplificação equilibrada, discutida na **Seção 4.2.3**. Considerou-se avaliar a saturação de amostras nos resultados adquiridos a partir do terceiro ajuste de ganho, já que a configuração inicial do algoritmo (método I - passo 24) pode estar bem diferente da condição ideal.

Foi implementada a interpretação do comando "*hydrophone_sr_d_n*" na função de interpretação definida nos arquivos *util* do *firmware* do ODAS, o qual chama o *scheduler* de leitura do hidrofone com os parâmetros fornecidos, onde:

- **sr** - taxa de amostragem em ksps
- **d** - duração em segundos
- **n** - numero de amostras para segmento de avaliação de método e ganho

Além disso, foram implementados todos os códigos necessários do "caminho" do comando até chegar no ODAS.

Foi implementada no SPAE a função de recebimento dos dados acústicos do ODAS, considerando 2 *bytes* para cada amostra, conforme **Tabela 4.9**, contendo informações da própria amostra, do método e do valor de passo.

Vale destacar que, especialmente para os dados do hidrofone, as amostras são armazenadas em memória local, e só após o término da tarefa elas são gravadas no

firestore. Contudo, nesse experimento, por ser um teste, os dados brutos não foram gravados no banco para poupar armazenamento.

O comando foi executado pelo SCM, criando um documento na coleção "comandos" do *firestore*, ativando a função do *firebase function* que está programada para publicar o comando no tópico de comandos no Pub/Sub, quando detectada a criação de novos documentos na coleção "comandos". O SPAE, por estar inscrito nesse tópico, é notificado e a sua função de *callback* é ativada para que o comando seja transmitido para o ODAS.

Para testar as notificações para o usuário, após término de cada tarefa, o número total de amostras saturadas foi armazenado em um novo documento da coleção "testes". Foram consideradas amostras saturadas aquelas com valores 0 ou 4095.

Na função do *functions*, também há uma rotina de observação de novos documentos nessa coleção e, quando ocorre, é lançada uma notificação pelo Messaging e o usuário recebe uma notificação no *smartphone* através do aplicativo que está executando em segundo plano.

Além disso, na mesma função de observação, são gerados novos documentos em coleções chamadas "*mail*" e "*messages*", para ativar as extensões de notificação por *e-mail* e SMS. A **Figura 4.23** apresenta uma das notificações recebidas.

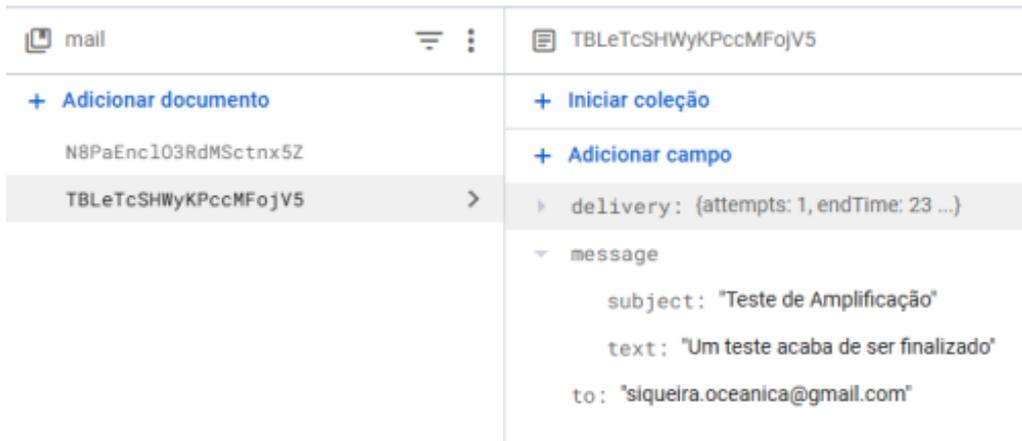


Figura 4.23: Notificação recebida por *e-mail* após termino de tarefa de leitura de sinal

Foi implementada ainda, no SPAE, uma função de testes para gravar localmente arquivos dos dados brutos desses experimentos. As **Figuras 4.24 e 4.25** apresentam os resultados obtidos no controle de ganho, baseados no número relativo de amostras perdidas (ou saturadas), para diferentes taxas de variação da amplitude do sinal de entrada e diferentes valores para o tamanho n do segmento utilizado para ajustar o ganho.

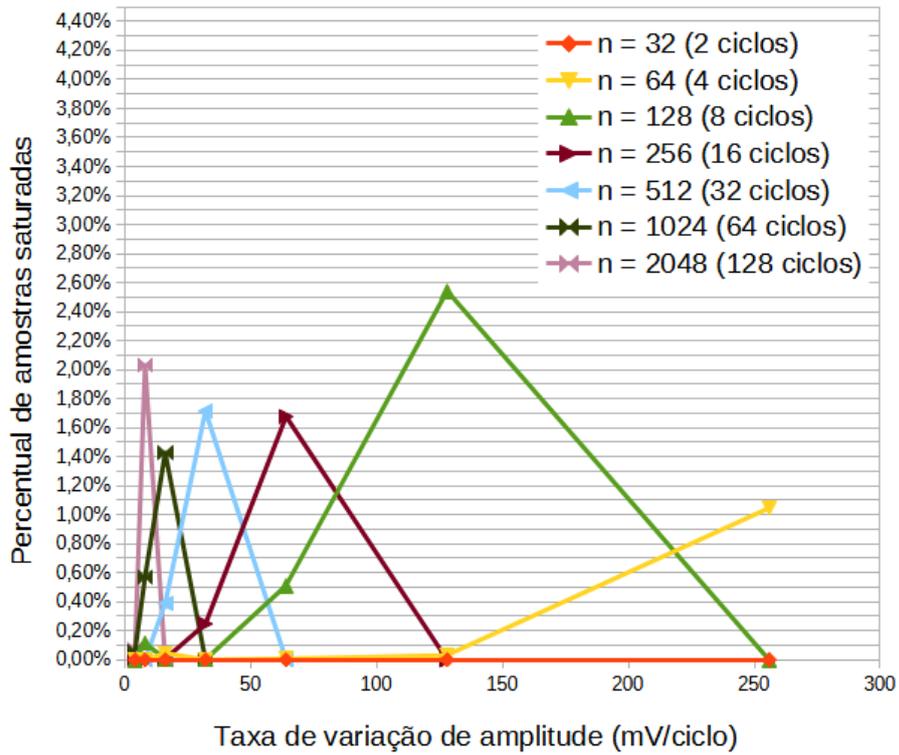


Figura 4.24: Percentual de amostras saturadas na amplificação de sinal com amplitude variada até 800 mV para diferentes taxas de variação e diferentes valores de n

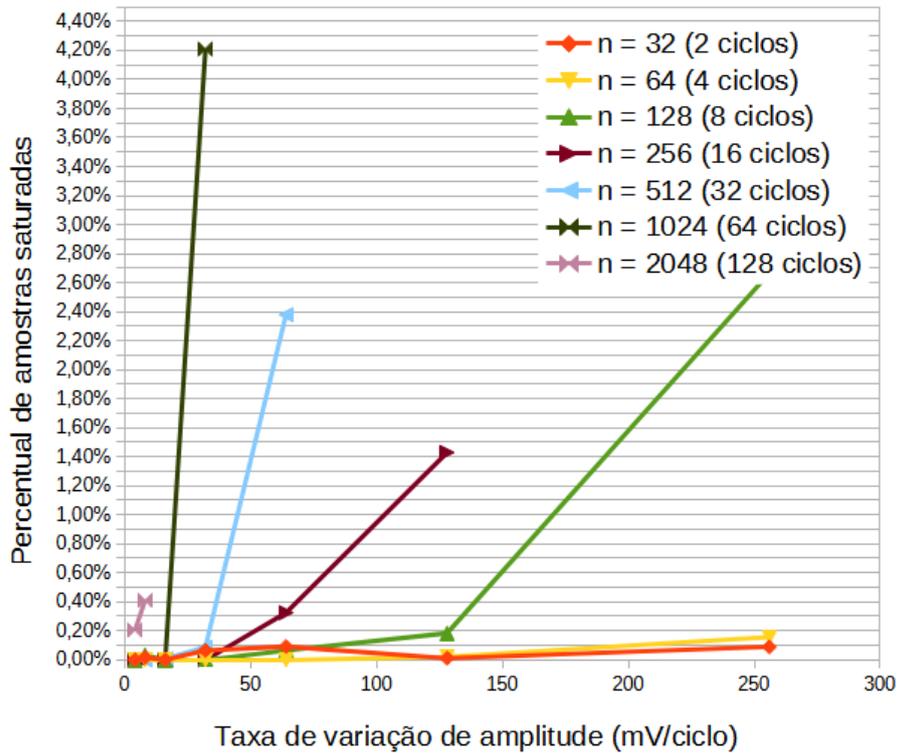


Figura 4.25: Percentual de amostras saturadas na amplificação de sinal com amplitude variada até 2400 mV para diferentes taxas de variação e diferentes valores de n

As **Figuras 4.26 até 4.28** mostram algumas das saídas desses resultados. A variação de cor entre azul e verde no sinal nas figuras representa instantes de variação de método de amplificação ou ajuste de ganho e as envoltórias em amarelo e verde representam os limites para amplificação equilibrada (30% a 50% de 3300 mV), conforme discussão na **Seção 4.2.3**.

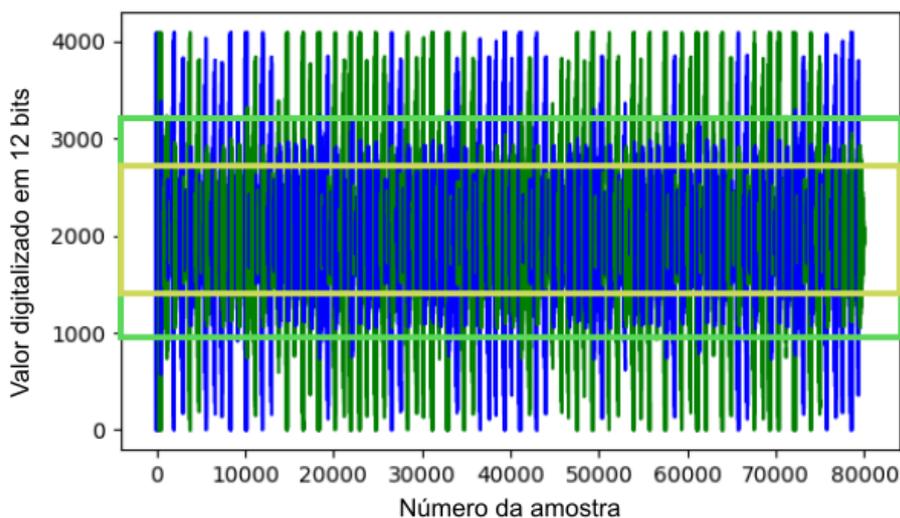


Figura 4.26: Sinal com amplitude variante até 800 mV, $n = 256$ (16 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 64 mV/ciclo

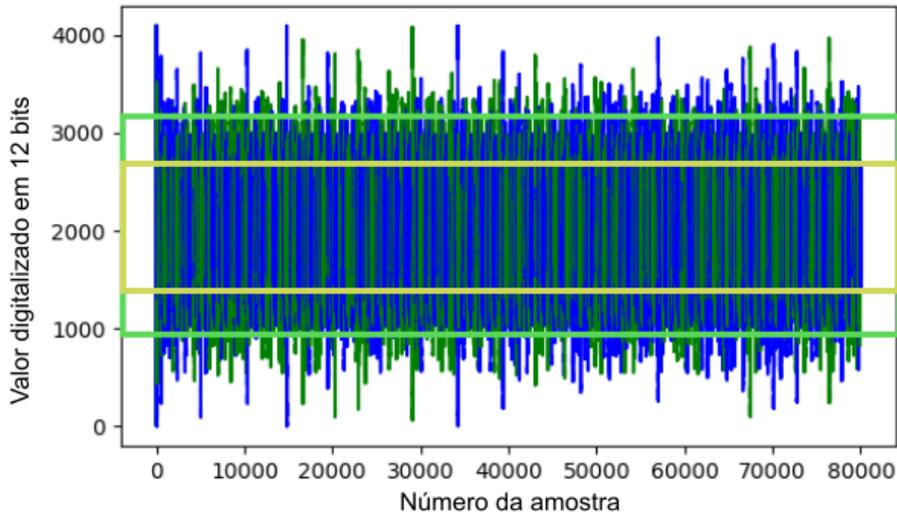


Figura 4.27: Sinal com amplitude variante até 2400 mV, $n = 32$ (2 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 128 mV/ciclo

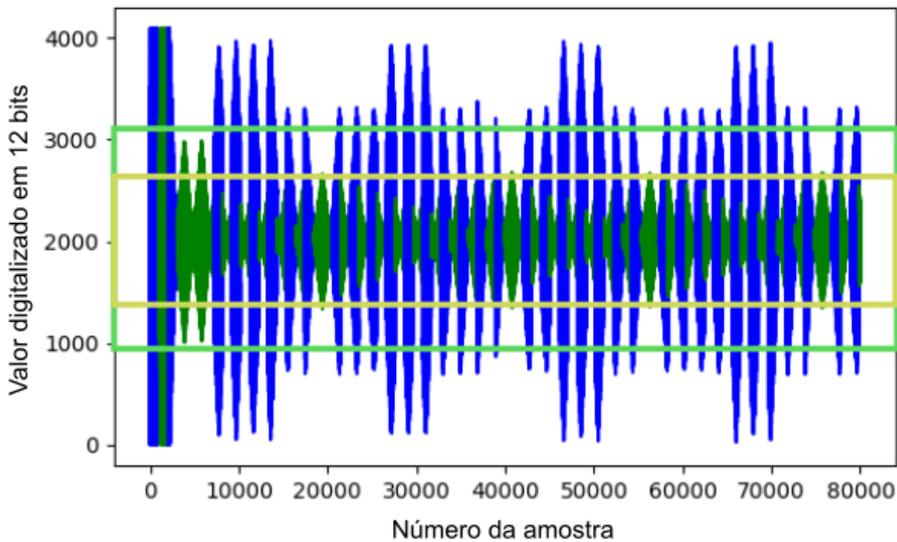


Figura 4.28: Sinal com amplitude variante até 800 mV, $n = 1024$ (64 ciclos) e taxa de variação de amplitude de 32 mV/ciclo

Entre os resultados apresentados nas **Figuras 4.26 até 4.28**, o primeiro mostrou que a escolha de n foi inadequada, ocorrendo mais saturação. No último, embora não tenha havido perda de dados após o ajuste inicial, a escolha de n também foi inadequada para a taxa de variação de amplitude de 32 mV, pois a amplificação dos segmentos não foi consistente com a amplificação equilibrada, ficando com pico abaixo do limiar mínimo ou acima do limiar máximo em quase todo o sinal.

Na **Figura 4.24**, observa-se que para uma determinada escolha de n , há uma queda significativa na saturação a partir de uma taxa específica de variação de amplitude. No experimento da **Figura 4.27**, a escolha de n foi adequada, resultando em amplificação equilibrada na maior parte do sinal.

De modo geral, o uso de um valor menor de n nos testes com sinal sintético resultou em melhor controle na amplificação do sinal, com menores perdas de informação (menos saturação), como apresentado nas **Figuras 4.24 e 4.25**.

Protocolo do experimento

1. Verificar conexões das baterias
2. Montagem e alimentação da segunda placa com o DAC em *proto-board*
3. Alimentação do ODAS ("aguardando comando")
4. Verificação de acesso à internet pelo PC da Central de Processamento
5. Execução do SPAE
6. Ajuste de parâmetros no código do *firmware* do dispositivo do DAC, compilação, desconexão do PC, alimentação pelo sistema de energia do ODAS
7. Execução do comando "hydrophone_8_10_n" pelo SCM, onde "n" variou entre os valores [32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048]
8. Repetir passos 6 e 7 para cada configuração de amplitude máxima e taxa de variação do sinal gerado

4.4.7 Processamento de Detecção de *Chirps* lineares

O próximo passo foi criar a primeira função de processamento de sinais coletados pelo hidrofone no SPAE.

Os *chirps* lineares são sinais cujas frequências variam de forma linear ao longo do tempo e são utilizados no contexto de aplicações acústicas submarinas.

Para testar o desempenho do algoritmo sem depender do ODAS, foi implementado um arquivo *python* (*writer.py*) que define e utiliza uma função geradora de sinal sintético, capaz de gerar sinais com componentes de diferentes frequências, sendo possível simular *chirps* lineares no sinal, em diferentes tempos.

Além disso, para considerar a *thread* de uso da comunicação serial, foi utilizado o *Null-modem emulator (com0com)*, um *driver* de porta serial virtual de código aberto (SOURCEFORGE, 2024).

O *writer.py* escreve os dados sintéticos em uma porta serial virtual na taxa de 12 ksps, que é a taxa máxima que o ODAS consegue operar com o algoritmo de amplificação automática. Essa geração de dados nessa resolução simplificaria o envio de amostra por amostra, com passo de uma unidade no vetor do sinal sintético, simulando o recebimento real do sinal pelo sistema de comunicação.

O arquivo *reader.py* foi implementado para recebimento desses dados em tempo real e processamento de detecção de *chirp* linear.

A **Figura 4.29** apresenta o diagrama do algoritmo de detecção de *chirp* linear.

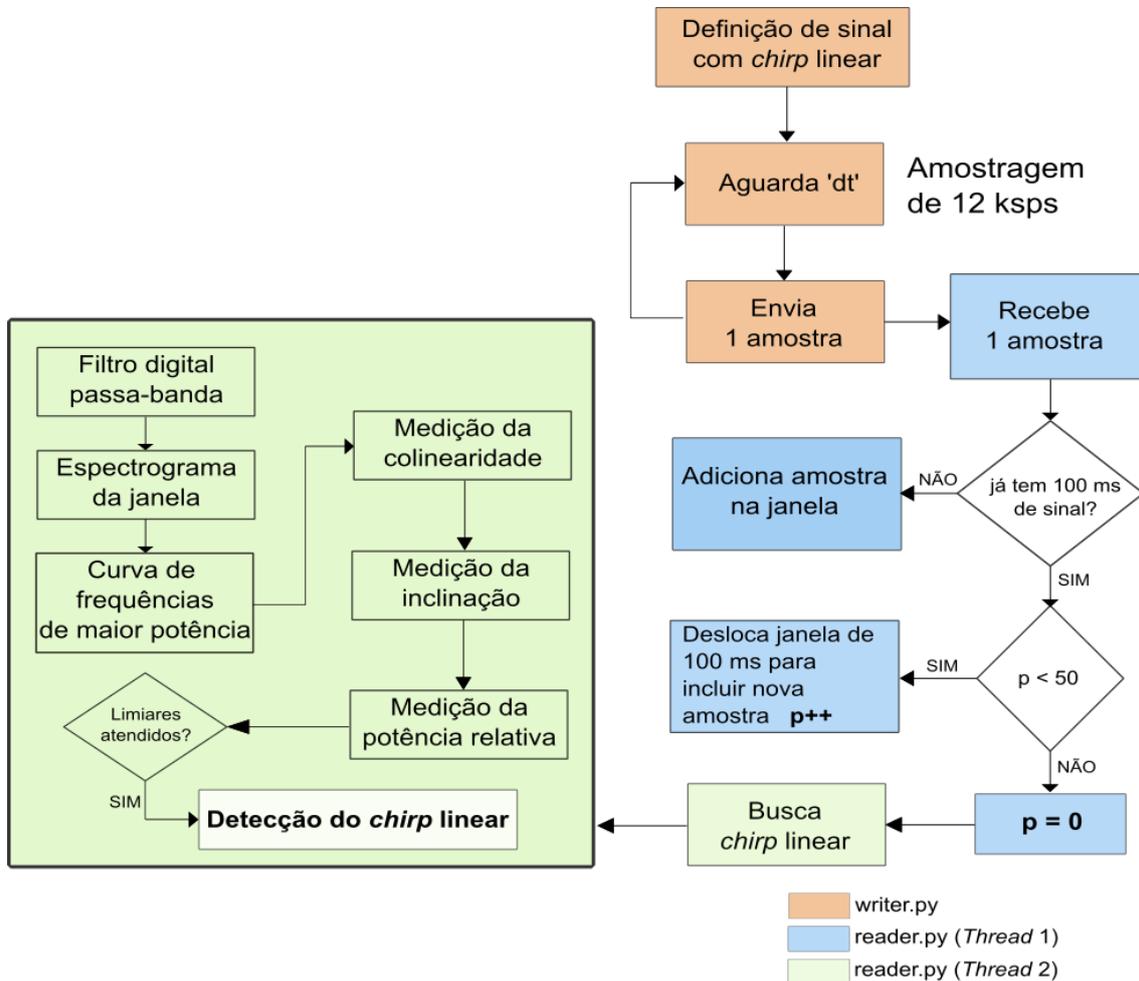


Figura 4.29: Algoritmo de detecção de *chirp* linear

A detecção do *chirp* linear é ativada, ao receber as primeiras 1200 amostras, equivalente a 100 ms, e depois a cada 50 amostras.

A primeira parte da Figura 4.30 apresenta o tempo de processamento de detecção de *chirp* linear (curva azul), a cada amostra recebida, e o tempo de envio de cada amostra pelo remetente simulado. A segunda parte mostra o tempo relativo entre eles.

Esse resultado mostrou que não foi possível executar o algoritmo de detecção de *chirp* linear efetivamente em tempo real, ao receber amostra por amostra, com o PC utilizado. A partir dos resultados, observa-se que o tempo de processamento da detecção de *chirp* linear no sinal chega até 26 vezes o tempo de amostragem de cada amostra do sinal. Desta forma, foi definido que a detecção de *chirp* linear ocorreria a cada 50 amostras, o que equivale a aproximadamente 4,2 ms para a amostragem de 12 ksps.

Portanto, no algoritmo apresentado na **Figura 4.29**, o valor de p define o contador que é zerado a cada 50 amostras. Ou seja, enquanto não se passam 50 amostras, a janela de 100 ms é deslocada com novas amostras.

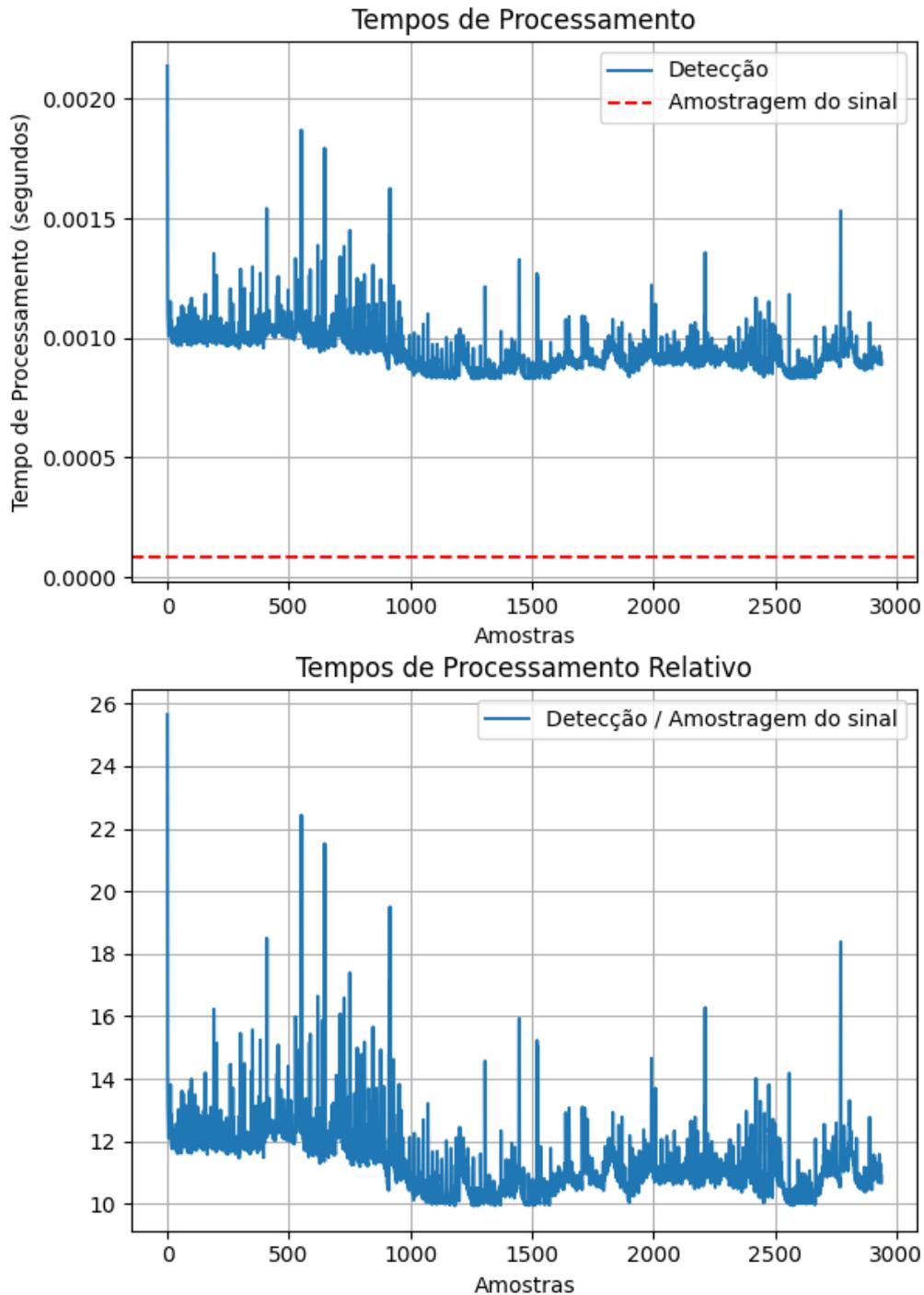


Figura 4.30: Tempos de processamento do algoritmo

O resultado também sugere que o algoritmo seja implementado com o conceito de *multithreading*. Enquanto ocorre a detecção do *chirp* linear, o SPAE deve continuar recebendo as amostras do sinal.

Desta forma, no arquivo *reader.py*, foram realizados os processamentos em duas *threads*, uma para recebimento de dados pela porta serial e outra para detecção de *chirp* linear.

O usuário deverá definir limites para os parâmetros considerados no algoritmo de acordo com a aplicação e realizar calibrações. Os parâmetros são relacionados à curva de frequências de maior potência ao longo do tempo. São eles:

- **Colinearidade**
- **Inclinação**
- **Potência relativa sobre o sinal**

Para calcular a colinearidade dos pontos da curva de frequências de maior potência no sinal, o vetor de entrada com essas frequências é tratado como os valores de y (ordenadas). As abscissas x são criadas como um vetor igualmente espaçado.

Ajusta-se uma regressão linear aos pontos (x_i, y_i) , com a equação:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (4.11)$$

Onde β_0 e β_1 são os coeficientes da regressão e são determinados minimizando a soma dos quadrados dos resíduos:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2 \quad (4.12)$$

Utilizando os coeficientes ajustados, os valores preditos \hat{y} são calculados:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad \text{para} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n - 1 \quad (4.13)$$

O Coeficiente de Determinação R^2 é calculado para medir a **colinearidade**:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.14)$$

Onde:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \quad (4.15)$$

Com os valores ajustados, a **inclinação** da curva é definida pelo coeficiente β_1 .

A **Figura 4.31** apresenta os resultados de espectrogramas para diferentes resoluções temporais com sobreposição de 50% de um sinal ruidoso com um *chirp* linear adicionado de frequência inicial de 100 Hz e final de 1 kHz. Foi observado que para janelas de 100 ms, uma resolução temporal de 200 pontos com sobreposição de 50% apresentou um bom resultado, o que equivale ao cálculo espectral para 11 segmentos:

$$n_{seg} = \left(\frac{samples - noverlap}{nperseg - noverlap} \right) = \left(\frac{1200 - 100}{200 - 100} \right) = 11 \quad (4.16)$$

onde:

$$noverlap = \frac{nperseg}{2} \quad (4.17)$$

Em todos os casos, foi definido 1024 pontos para o cálculo da FFT.

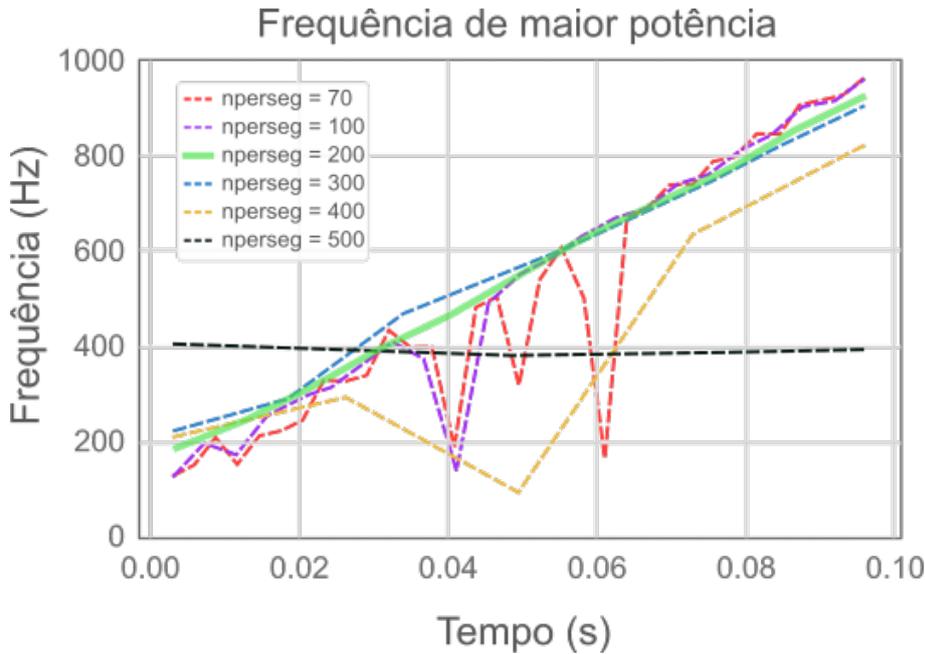


Figura 4.31: Resultados dos espectrogramas

Para uso do algoritmo com o ODAS, o comando para a função de detecção de *chirp* linear ainda não havia sido implementado no SCM, sendo necessária uma chamada manual no código do SPAE.

4.4.8 Validação do ODAS em ambiente de laboratório

Uma vez testada a amplificação automática e implementado o algoritmo de detecção de *chirp* linear, foi realizado um experimento com uso de um hidrofone instalado em uma estação submarina na Enseada dos Anjos, em Arraial do Cabo/RJ.

Apesar de ser uma operação de coleta de dados reais, o instrumento tem seus terminais de saída em laboratório, o que não exigiu a instalação do ODAS em um ambiente relevante ou operacional. Desta forma, foi considerado um experimento em ambiente de laboratório. A **Figura 4.32** mostra a estação submarina, instalada a uma profundidade de 10 m, próximo à Praia dos Anjos em Arraial do Cabo/RJ.



Figura 4.32: Estação submarina do IEAPM, instalada a uma profundidade de 10 m, próximo à Praia dos Anjos em Arraial do Cabo/RJ

Os terminais do hidrofone foram conectados ao ODAS e foi realizada a aquisição de sinal da paisagem acústica local. Com suporte do Laboratório de Acústica do IE-APM, um transdutor acústico, localizado em outra estação submarina, foi utilizado para emitir um sinal de *chirp* linear em intervalos constantes.

O SCM foi utilizado para comandar "hydrophone_12_180_1024" via aplicativo web, para amostragem em 12 ksps por 3 minutos com verificação de seleção de método e ajuste de ganho a cada 1024 amostras.

Durante o experimento, não foram detectados os *chirps* lineares, que foram emitidos a cada 20 segundos com frequência inicial de 4 kHz, frequência final de 5 kHz e duração de 100 ms.

Já a amplificação automatizada funcionou bem. Os dados brutos foram armazenados em arquivo local, usando a função de testes do SPAE. A **Figura 4.33** apresenta parte do sinal digitalizado, com saturação em apenas 13 amostras.

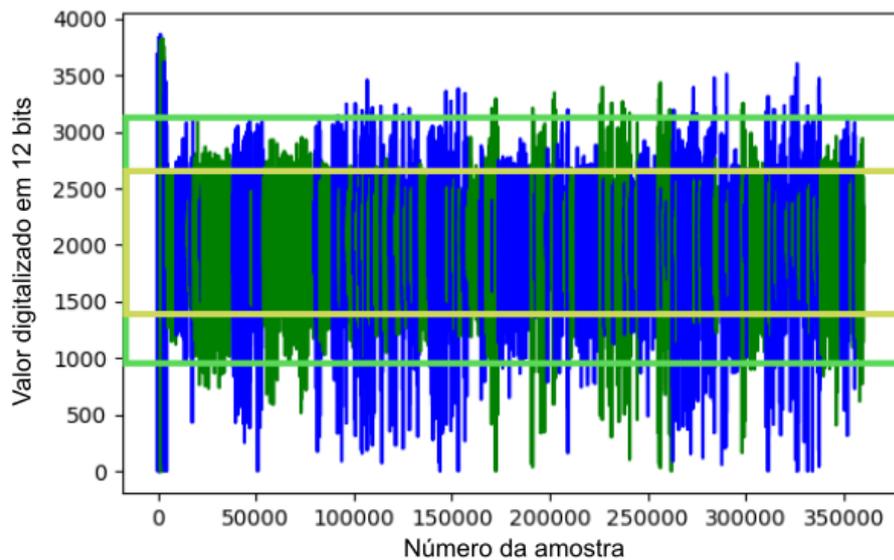


Figura 4.33: Sinal da paisagem acústica digitalizada com o método de ganho automático

Com os *bits* correspondentes ao método e aos passos do potenciômetro gravados para cada amostra no arquivo do sinal acústico coletado, foi possível identificar e reconstruir o estado do sinal na saída do hidrofone. Então, o algoritmo de detecção de *chirp* linear foi modificado para simular o envio desse sinal, substituindo a função de geração de sinal sintético.

Após algumas calibrações nos limiares dos parâmetros de colinearidade, inclinação e potência relativa sobre o sinal, alguns dos *chirps* lineares emitidos foram identificados.

Nesse estágio, já haviam sido implementadas a gravação da detecção de *chirp* linear no banco de dados e a função de escuta para notificar os usuários. A **Figura 4.34** apresenta as notificações recebidas no *smartphone* durante a reprodução do experimento de forma simulada.

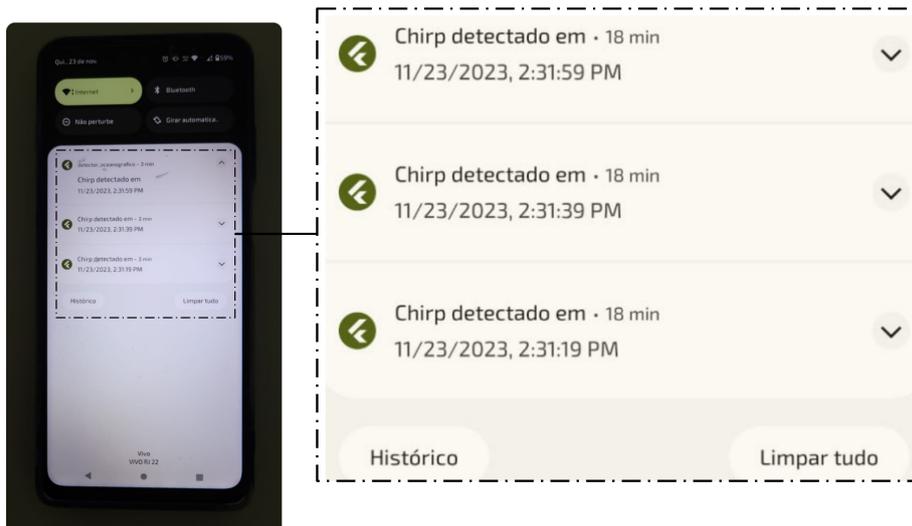


Figura 4.34: Notificação de detecção de *chirp* linear em *smartphone*

4.4.9 Avaliação em TRL / STRL 4

O produto do *hardware* foi integrado com componentes de custo reduzido e o ODAS se limitou a uma taxa de amostragem de 12 ksp/s, mas que permitiu realizar operações bem-sucedidas para aquisição de sinais analógicos da ordem de até 1 kHz, como planejado.

Foram realizados testes e experimentos completos em ambiente controlado, integrando as funcionalidades do Módulo Científico e Módulo de Interação. O ODAS foi validado em ambiente de laboratório.

O *firmware* foi reestruturado em arquivos segregados de forma organizada e ganhou funcionalidade remota com interpretação de comandos.

O Módulo de Interação também funcionou de forma integrada com o ODAS, da execução de comandos até o ODAS e do dado coletado até a notificação ao usuário.

4.5 Resumo das atividades realizadas

As Tabelas 4.10 e 4.11 sintetizam as atividades realizadas por nível de maturidade alcançado no desenvolvimento do ODAS.

Tabela 4.10: Atividades realizadas para o *hardware*

| TRL 1 | TRL 2 | TRL 3 | TRL 4 |
|-------------------------------------|--|---|--|
| Pesquisa de Mercado | Conceito e desempenhos esperados | Seleção de equipamentos para testes com <i>protoboard</i> | Integração dos componentes com PCI padrão |
| Revisão teórica sobre ODAS (Cap. 2) | Funcionamento esperado e seleção de componentes | Teste de desempenho do ADC | Calibração dos <i>trimpots</i> do componente de amplificação |
| Ideias iniciais para o ODAS | Diagrama simplificado do Módulo Científico | Implementação do Sistema de Energia com saídas reguladas em + 5 V e - 5 V | Testes de coleta de sinais analógicos sintéticos e sinais de hidrofone |
| | Publicação de artigo com apresentação do conceito e do funcionamento | Montagens para testes de componentes, incluindo Sistema de Comunicação | Validação em ambiente laboratorial |
| | | Integração com o CTD e GPS simulado | |

Tabela 4.11: Atividades realizadas para o *firmware*

| STRL 1 | STRL 2 | STRL 3 | STRL 4 |
|-------------------------------------|---|--|--|
| Pesquisa de Mercado | Identificação dos tipos de sinais para coleta | Teste e seleção de linguagem (C++) | Implementação da função de interpretação de comandos |
| Revisão teórica sobre ODAS (Cap. 2) | Algoritmo para amplificação automatizada | Implementação de funções específicas para: <ul style="list-style-type: none"> • SETUP (cartão SD, RTC e pinos de entrada) • Testes de desempenho do ODAS • Transmissão de dados | Reestruturação do código para vários arquivos |
| Ideias iniciais para o ODAS | Diagrama lógico geral | Implementação da função de leitura do CTD e do GPS | Implementação da função de leitura do hidrofone |
| | Publicação de artigo com o algoritmo | | |

Capítulo 5

Discussão

5.1 O método de classificação

Uma das principais discussões deste trabalho foi a contribuição da experiência adquirida no desenvolvimento do ODAS para a definição do método de adaptação da escala TRL, apresentado no capítulo 3. No decorrer do projeto, novas perspectivas sobre as descrições dos níveis alcançados das escalas foram identificadas, resultando em ajustes refinados no capítulo 3 de forma iterativa.

As observações detalhadas das atividades foram fundamentais para construir os mapas de progressão tecnológica apresentados no início do capítulo 3, os quais contribuíram fortemente na definição dos critérios de avaliação TRL e STRL adaptados ao contexto. Por outro lado, a falta de experiência no desenvolvimento em níveis mais avançados resultou na ausência de ajustes iterativos nos critérios de classificação para esses níveis.

Na escala adaptada STRL, observou-se que, nos níveis não alcançados, há uma integração mais estreita entre o *hardware* e o *firmware*, levando à definição de critérios que abrangem ambas as tecnologias. Com maior experiência no desenvolvimento de *firmwares* em estados mais avançados, seria possível refinar esses critérios e estabelecer uma separação mais clara entre eles.

O avanço tecnológico em termos de funcionalidade esperada foi avaliado de forma bem semelhante para o *hardware* e o *firmware*, já que o funcionamento do ODAS depende diretamente da integração dessas duas tecnologias. Diante disso, foi observado que os níveis de classificação STRL apresentaram uma alta correlação com os níveis TRL ao longo do projeto.

Essa observação, a princípio, justificaria uma avaliação conjunta (apenas TRL do ODAS), mas a portabilidade do *firmware* permite reutilizá-lo em novos desenvolvimentos de *hardware*. Em um novo projeto de ODAS, cujo *hardware* está em um nível de baixa maturidade, um *firmware* maduro pode ser adaptado e aplicado,

o que vai acelerar o processo de desenvolvimento. Isso motivou a segregação em classificação TRL e STRL.

Além das definições dos critérios de cada nível, foi implementado o “TRLômetro” - uma interface *web* interativa com o questionário desses critérios.

Uma crítica ao método é que o mapeamento dos níveis nas escalas, em cada aspecto, não foi totalmente objetivo, devido às descrições genéricas de cada nível TRL ou STRL, que podem levar a interpretações distintas. Ainda assim, o método proposto minimiza essa subjetividade ao especificar tais descrições, resultando em uma ferramenta com potencial para padronizar a avaliação de projetos semelhantes.

5.1.1 Expansão da classificação STRL

A avaliação STRL foi definida neste trabalho exclusivamente para o *firmware* do ODAS. Os *softwares* desenvolvidos para o Módulo de Interação (SPA-E e o SCM) possuem finalidades distintas, oferecendo interfaces para interação com o usuário e apresentando menor correlação com o avanço tecnológico do *hardware* do ODAS.

Em razão disso, para adaptar a escala STRL para esses *softwares*, os níveis, descrições do produto e critérios de classificação precisariam ser adaptados.

5.2 O desenvolvimento e a avaliação TRL / STRL do ODAS

O desenvolvimento do ODAS, apresentado no capítulo 4, também teve como objetivo acadêmico explorar técnicas de implementação, adaptar um método específico de avaliação de maturidade com base na escala TRL original e aplicá-lo. Nesse contexto, a pesquisa de mercado realizada no início do projeto (TRL 1) foi limitada à identificação de necessidades gerais de monitoramento, sem a realização de comparativos detalhados entre as ideias iniciais do dispositivo e as tecnologias disponíveis no mercado.

No nível TRL / STRL 3, foram realizados testes de desempenho da digitalização de sinais analógicos aplicados à leitura de hidrofones, com resultados de SNR apresentados considerando um sinal teórico de 1 kHz. O SNR foi calculado em duas condições: utilizando uma fonte de energia limpa, composta por baterias e reguladores de tensão, e uma fonte ruidosa, com o ODAS alimentado pela máquina da Central de Processamento. A comparação evidenciou a importância de projetar um sistema de energia eficiente para garantir maior qualidade no processamento dos sinais.

É importante destacar que os *schedulers* para a leitura do CTD e do GPS simulado foram programados ainda no nível de maturidade TRL / STRL 3, enquanto o

scheduler para o hidrofone foi implementado apenas no nível TRL / STRL 4. Isso ocorreu porque, no caso do hidrofone, foi necessário realizar a integração completa dos componentes de *hardware*, ajustar mecanicamente os *trimpots* dos amplificadores e calibrar os valores dos limiares utilizados no algoritmo de ganho automatizado.

Apesar das publicações de observações em revistas científicas serem critérios de classificação dos níveis 1 e 2 da escala TRL, as atividades de experimentação, incluindo os testes básicos, as pequenas montagens e a integração discutida a nível TRL 4, contribuíram para uma melhor apresentação desses trabalhos. Através das apresentações, o produto em seu estágio atual ganhou mais visibilidade, que é um fator positivo para atrair interessados em investir na continuidade do projeto.

Em relação aos desempenhos alcançados, foi realizada a aquisição de dados de um instrumento comercial CTD, com sucesso na interpretação das *strings*, e a aquisição de sinais acústicos por um hidrofone com uma taxa de amostragem de 12 ksps e resolução de digitalização de 12 bits, o que permitiu uma boa representação de sinais de baixa frequência.

Especificamente às operações de leitura do hidrofone, a abordagem do uso de dois métodos para a amplificação controlada de forma programável permitiu operar o ODAS na coleta de sinais que podem apresentar grandes amplitudes e faixas dinâmicas, sem a necessidade de alterações no *hardware*.

No estágio final alcançado (TRL / STRL 4), identificou-se uma necessidade de obter financiamento externo à academia, o que confirma a discussão no capítulo 2 sobre o "Vale da Morte". Os custos financeiros do desenvolvimento foram relativamente baixos, uma vez que a maioria dos recursos utilizados consistiu em equipamentos e componentes já disponíveis na instituição. Para avançar nas escalas, seria necessário realizar testes em ambientes relevantes, o que exige a integração do módulo científico a uma plataforma marítima, implicando uma evolução significativa do *hardware*. A aplicação dessa métrica adaptada ao contexto proporcionou uma estrutura para comunicar um valor de maturidade do projeto, que pode ser utilizado na busca por investimentos.

Os desenvolvimentos realizados para o Módulo de Interação, principalmente o SCM (versões *web* e *mobile*) e as implementações de escuta de eventos no banco de dados e notificação aos usuários, foram considerados altamente portáteis, permitindo suas aplicações em outros dispositivos ODAS. Uma vez que a adaptação para diferentes *firmwares* não exige muitos esforços.

5.2.1 Avanços para os próximos níveis de maturidade

A hidrodinâmica do meio para definir a forçante principal sobre o sistema, os princípios físicos de resistência de materiais para estudar a garantia da integração es-

trutural, os materiais e técnicas de vedação, entre outros, devem ser estudados e aplicados para avançar com a integração do *hardware* a uma plataforma, que é uma atividade do projeto crítica para que o ODAS se torne um primeiro protótipo (TRL 5).

Essas ações podem incluir algumas atividades:

- **Seleção de materiais e técnicas de vedação**

1. Realizar análises de tensões e deformações em modelos teóricos com as propriedades dos materiais potenciais para o invólucro e com as propriedades do oceano, como pressão hidrostática, e do ar, como vento;
2. Considerar para a vedação: *O-rings*, vedantes elastoméricos e composições adesivas especializadas, etc.;
3. Revestimentos contra corrosão, entre outros.

- **Gestão térmica** - verificar e garantir o funcionamento dos componentes eletrônicos do dispositivo sujeitos às variações de temperatura;
- **Cálculos de equilíbrio e estabilidade** - avaliar a sua geometria, distribuição de massa e comportamento dinâmico.

As novas atividades para continuidade do projeto devem possibilitar a realização de testes em ambiente que simule a condição operacional.

5.2.2 Aplicabilidade do método de classificação em diferentes metodologias de projeto

A metodologia de projeto tradicional linear (*cascata* ou *waterfall*) organiza o desenvolvimento em etapas bem definidas, desde a iniciação até o encerramento, sem processo iterativo, com entregáveis claros para cada fase. Essa estratégia se correlaciona de forma natural com a escala TRL, que também segue uma progressão sequencial e estruturada.

Por outro lado, durante o desenvolvimento do ODAS, foi necessário revisitar etapas anteriores para ajustar parâmetros do projeto, o que evidenciou que o amadurecimento da tecnologia não seguiu uma trajetória estritamente linear. Esse comportamento se assemelha a uma metodologia de projeto ágil, caracterizada por processos iterativos e incrementais.

Por exemplo, os limiares de alteração de passo para o algoritmo de amplificação automática, inicialmente definidos no TRL 2, foram corrigidos quando o projeto já estava em um nível mais avançado. Apesar desse ajuste, o progresso do projeto não foi comprometido, e o ODAS continuou evoluindo para níveis mais maduros.

Portanto, o método de classificação apresentado demonstrou aplicabilidade tanto a abordagens lineares quanto a metodologias de projeto ágeis.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento e a avaliação da maturidade tecnológica de um Sistema de Aquisição de Dados Oceanográficos (ODAS), de custo reduzido, estabelecendo critérios específicos para sua classificação nas escalas TRL (*Technology Readiness Level*) e STRL (*Software Technology Readiness Level*). O projeto seguiu uma abordagem estruturada, desde a concepção inicial até a validação laboratorial (TRL / STRL 4), permitindo um acompanhamento detalhado das etapas de evolução tecnológica do sistema.

O primeiro passo envolveu uma ampla revisão bibliográfica sobre sistemas ODAS e métodos de classificação tecnológica. Essa análise permitiu compreender os desafios do desenvolvimento e identificar a necessidade de uma adaptação da escala TRL para considerar as particularidades desses sistemas, incluindo seu *firmware* embarcado, resultando também em uma adaptação da escala STRL. O estudo comparativo das metodologias existentes foi fundamental para estabelecer um modelo de avaliação mais adequado ao contexto dos ODAS.

Vale destacar que na revisão da literatura realizada, não foram encontradas aplicações da escala TRL ou STRL na classificação da maturidade de *firmwares* de ODAS, de forma segregada do *hardware*. Diante dessa lacuna, este trabalho contribuiu ao propor critérios adaptados que levam em consideração as particularidades do desenvolvimento, validação e operação de *firmwares* para sistemas de aquisição de dados oceanográficos.

Os estudos sobre o histórico e as aplicações da escala TRL forneceram uma base sólida para entender os conceitos fundamentais dos níveis TRL. Esse conhecimento prévio foi essencial para, de forma interativa e iterativa, definir etapas de desenvolvimento do ODAS e critérios para classificação em cada nível das escalas TRL / STRL.

Na etapa de desenvolvimento, foram realizados estudos sobre os componentes essenciais do ODAS, incluindo sensores de medição oceanográfica, módulos de processamento e transmissão de dados. A integração de um hidrofone e um instrumento

CTD (Condutividade, Temperatura e Profundidade) possibilitou a aquisição de dados relevantes que podem caracterizar o ambiente marinho. A experiência com o GPS simulado foi importante para lidar futuramente com o posicionamento das diferentes plataformas possíveis para instalação do ODAS, como veículos autônomos.

O processo de condicionamento de sinais e digitalização foi detalhado, destacando o uso de filtros para minimizar ruídos e melhorar a relação sinal-ruído (SNR). A implementação de amplificação automatizada garantiu maior flexibilidade na captação de sinais acústicos submarinos, permitindo um ajuste dinâmico de ganho e melhor aproveitamento das informações coletadas. Apesar da taxa de amostragem alcançada (12 ksp/s) atender a apenas algumas aplicações, foi definido um método de ganho automático que pode ser replicado para *hardwares* mais robustos, destinados à aquisição de sinais em bandas mais altas de frequência.

A integração de tecnologias para comunicação e armazenamento foi explorada, permitindo a transmissão remota dos dados adquiridos para uma Central de Processamento. O desenvolvimento do Software de Processamento e Armazenamento Externo (SPA-E) e do Software de Controle e Monitoramento (SCM) possibilitou a implementação de uma interface interativa para visualização e gerenciamento das informações coletadas. A integração do SPA-E e do SCM a um banco de dados em nuvem e às tecnologias de notificação em tempo real em dispositivos móveis, fortalece a aplicação do conceito de IoT no contexto das pesquisas oceanográficas. Essa abordagem conecta sensores inteligentes, servidores e dispositivos automatizados, criando uma infraestrutura eficiente para a aquisição, processamento e disponibilização de dados em tempo real, proporcionando maior flexibilidade e acessibilidade aos dados.

Ao longo do desenvolvimento, observou-se que a progressão tecnológica não seguiu uma trajetória linear, sendo necessária a revisão iterativa de parâmetros e estratégias de implementação. Esse comportamento reforçou a aplicabilidade do método de classificação TRL/STRL em abordagens ágeis de desenvolvimento tecnológico, garantindo flexibilidade e adaptação às exigências do projeto.

A experiência no trabalho demonstrou que o desenvolvimento alcançado chegou ao limite da participação exclusiva da academia, sendo necessário buscar novas fontes de recursos para avançar com o projeto. Os experimentos realizados com dados de campo foram facilitados pelo posicionamento geográfico do IEAPM e pelo uso dos seus recursos disponíveis, o que demonstrou a importância da participação de atores externos à academia para a continuidade no desenvolvimento de novas tecnologias.

O método adaptado mostrou-se eficaz na classificação e estruturação do avanço tecnológico, fornecendo um *framework* para orientar o desenvolvimento e comunicar o *status* da tecnologia de forma clara a possíveis financiadores e colaboradores.

De modo geral, os desafios e indecisões que surgiram durante a pesquisa contri-

buíram significativamente para o desenvolvimento de habilidades técnicas e científicas na área de engenharia oceânica.

6.1 Recomendações

Foram identificadas lacunas na definição de critérios para níveis mais elevados das escalas TRL e STRL, sugerindo a necessidade de refinamento contínuo baseado em novos desenvolvimentos e validações. Por exemplo, a continuidade no desenvolvimento do ODAS irá permitir tornar mais claros os critérios de classificação para os níveis acima de TRL / STRL 4, através da realização de testes em ambientes relevantes ou de operação. Alguns passos desses avanços incluem:

- Implementação de tecnologia sem fio para o sistema de transmissão de dados;
- Projeto e fabricação de uma placa personalizada para o módulo científico;
- Instalação ou projeto da plataforma;
- Estruturação das coleções do banco de dados; e
- Evolução do SPAE e do SCM.

A escala STRL poderá ser adaptada para avaliar os *softwares* do Módulo de Interação. Embora ainda não tenham sido classificados nessa escala, em níveis de maturidade mais elevados, a estrutura das *threads* de recebimento, processamento e gravação de dados do SPAE pode ser otimizada, visando um melhor aproveitamento dos recursos de máquina.

A forma de definir a criticidade dos critérios para cada nível TRL / STRL no “TRLômetro” poderá ser explorada, já que foram limitados a itens recomendados ou críticos. Além disso, novas discussões podem ser implementadas para avaliação de riscos associados ao não cumprimento dos itens recomendados.

O uso do ODAS em coleta de sinais, com padrões bem definidos, pode incluir técnicas de inteligência artificial para otimizar o algoritmo de amplificação automatizada, a fim de minimizar perdas de informação sobre o sinal. Por exemplo, enquanto o SPAE recebe os dados, eles podem ser tratados e classificados, possibilitando a predição do comportamento do sinal. Com isso, comandos automáticos específicos para alteração de método e passo poderiam ser transmitidos para o ODAS.

As operações futuras do dispositivo deverão contribuir para diferentes aplicações, tais como caracterização de alvos marinhos ou antropogênicos, monitoramento de áreas de acesso restrito, caracterização de massas de água, monitoramento de mudanças climáticas, entre outras.

Por fim, vale destacar que os pesquisadores do IEAPM têm desenvolvido diferentes dispositivos voltados à coleta de dados, como temperatura da água, nível do

mar, condutividade elétrica e paisagem acústica submarina. Planeja-se integrar esses sistemas em um único ODAS no futuro e realizar novas aplicações do método de avaliação TRL / STRL apresentado neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ADAFRUIT INDUSTRIES, 2024a. “Adafruit Feather M0 Adalogger”. a. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-adalogger/overview>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- ADAFRUIT INDUSTRIES, 2024b. “Installing Mu Editor for CircuitPython Development”. b. Disponível em: <<https://learn.adafruit.com/welcome-to-circuitpython/installing-mu-editor>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- ALIANI, S., LUSHER, A., GALGANI, F., et al., 2023, “Reproducible pipelines and readiness levels in plastic monitoring”, *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 4, n. 5, pp. 290–291.
- ALSHMEEL, G. H. A., AL-DOORI, A. S. B., AHMED, S. R., et al., 2024, “Self-Sustaining Buoy System: Harnessing Water Wave Energy for Smart, Wireless Sensing and Data Transmission”. In: *Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference*, pp. 349–356.
- ALTUNOK, T., CAKMAK, T., 2010, “A technology readiness levels (TRLs) calculator software for systems engineering and technology management tool”, *Advances in Engineering Software*, v. 41, n. 5, pp. 769–778. ISSN: 0965-9978. doi: 10.1016/j.advengsoft.2009.12.018.
- ANALOG DEVICES, I., 2009, *AD620: Low Drift, Low Power Instrumentation Amplifier Data Sheet*. Analog Devices, Inc., Norwood, MA, USA. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- ANEEL, 2024, *Guia de avaliação da maturidade tecnológica da ANEEL*. Brasília. Disponível em: <<https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/239764>>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- ARMSTRONG, J. R., 2010, “Applying Technical Readiness Levels to Software: New Thoughts and Examples”. In: *INCOSE International Symposium*, v. 20, pp. 838–845. Wiley Online Library.

- AU, W. W., HASTINGS, M. C., 2008, *Principles of marine bioacoustics*, v. 510. Springer.
- BABIĆ, A., OREČ, M., MIŠKOVIĆ, N., 2021, “Developing the concept of multi-functional smart buoys”. In: *OCEANS 2021: San Diego–Porto*, pp. 1–6. IEEE.
- BAHARI, N. A. A. B. S., AHMED, A. N., CHONG, K. L., et al., 2023, “Predicting sea level rise using artificial intelligence: a review”, *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 30, n. 7, pp. 4045–4062.
- BAKSHI, U. A., BAKSHI, L. A. V., 2020, *Electrical Measurements*. Technical Publications.
- BARROSO, V., XAVIER, F., FERREIRA, C., 2023, “Applications of machine learning to identify and characterize the sounds produced by fish”, *ICES Journal of Marine Science*, v. 80, n. 7, pp. 1854–1867.
- BATISTA, D., GRANTHOM COSTA, L., COUTINHO, R., 2020, *Biodiversidade Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação*. Arraial do Cabo, RJ. ISBN: 978-65-81772-000.
- BIRCHILL, A. J., BEATON, A. D., HULL, T., et al., 2021, “Exploring Ocean Biogeochemistry Using a Lab-on-Chip Phosphate Analyser on an Underwater Glider”, *Frontiers in Marine Science*, v. 8. ISSN: 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2021.698102.
- BITTLE, M., DUNCAN, A., 2013, “A review of current marine mammal detection and classification algorithms for use in automated passive acoustic monitoring”. In: *Proceedings of Acoustics*, v. 2013, pp. 1–8. Australian Acoustical Society Victor Harbor, SA.
- BJØRNØ, L., 2017, “Sonar systems”. In: *Applied underwater acoustics*, Elsevier, pp. 587–742, Amsterdam.
- BLANC, P., DUCASTEL, B., CAZIN, J., et al., 2017, “First-time implementation of innovative in situ biotechnology on an offshore platform in Arabian Gulf for continuous water quality monitoring and early leak detection”. In: *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, p. D011S023R001. SPE.
- BOGOVIN, V., VIDISHCHEVA, E., 2021, “A model for commercializing the outcomes of innovation/research activity in universities”. In: *SHS Web of Conferences*, v. 101, p. 02023. EDP Sciences.

- BRAGA, H. O., PARDAL, M. Â., FERNANDES, J. M., et al., 2020, “Target species of artisanal fisheries and their conservation status in two fishing villages in the Atlantic: Peniche (Portugal) and Arraial do Cabo (Brazil)”, *Ethnoscience-Brazilian Journal of Ethnobiology and Ethnoecology*, v. 5, n. 1.
- BRASSEUR, L., TAMBURRI, M., PLUEDDEMANN, A., 2010, “Sensor needs and readiness levels for ocean observing: An example from the Ocean Observatories Initiative (OOI)”, *Proceedings of OceanObs’ 09: Sustained Ocean Observations and Information for Society*, v. 2, pp. 21–25.
- CALDEIRA, A. W. S., 2023, “Uma proposta de telefone submarino nacional”, *O Periscópio*, v. 74, n. 74, pp. 48–48.
- CAUCHY, P., HEYWOOD, K. J., MERCHANT, N. D., et al., 2023, “Gliders for passive acoustic monitoring of the oceanic environment”, *Frontiers in Remote Sensing*, v. 4, pp. 1106533.
- CHAI, F., JOHNSON, K. S., CLAUSTRE, H., et al., 2020, “Monitoring ocean biogeochemistry with autonomous platforms”, *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, n. 6, pp. 315–326.
- CHEN, S., ZHANG, J., LIU, S., et al., 2023a, “Structure design and implementation of a high stability semi-submersible optical buoy for marine environment observation”, *Ocean Engineering*, v. 290, pp. 116217. ISSN: 0029-8018. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.116217.
- CHEN, S., ZHANG, J., LIU, S., et al., 2023b, “Structure design and implementation of a high stability semi-submersible optical buoy for marine environment observation”, *Ocean Engineering*, v. 290, pp. 116217.
- CIANCA, A., BARRERA, C., DE SOUSA, J. B., et al., 2023, *ASV-Network Structure and Roadmap*. Deliverable D3.5, EuroSea. Disponível em: <<https://oceanrep.geomar.de/id/eprint/59165/>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- COSTA, M., 2024. “Technology Readiness Level (TRL): como determinar a maturidade de uma tecnologia”. Disponível em: <<https://ist2.sesisenai.org.br/technology-readiness-level-trl-como-determinar-a-maturidade-de-uma-tecnologia/>>. Acesso em: 26 out. 2024.
- COSTA, S. G. V. A. D. O., 2019. “Proposição da política nacional de ciência, tecnologia e inovação para oceanos – instrumento para estímulo à P&D

- dos recursos marinhos”. Disponível em: <<https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/3898>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- CROSS, A., JABIN, I., LASTER, M., et al., 2023, “2022 NOAA Research and Development Database Annual Operating Report”, doi: 10.25923/bph7-5g91.
- D’AGOSTINI, A., CAMPOS, R. M., SOARES, C. G., 2024, “Assessments of multiple metocean forecasts in the North Atlantic Ocean”, *Ocean Engineering*, v. 312, pp. 119199.
- DATAINTELO, 2023. “Ocean Observation Instruments Market Report: Trends, Growth, and Forecast 2023-2032”. Disponível em: <<https://dataintel.com/report/ocean-observation-instruments-market>>. "Acesso em: 01 nov. 2024".
- DE DEUS, M. S., CATUNDA, S. Y. C., SOARES, A. W. A., et al., 2022, “A review on variable and programmable gain amplifiers and applications”, *Journal of Integrated Circuits and Systems*, v. 17, n. 1, pp. 1–12.
- DEPARTMENT OF DEFENSE, 2005, *Technology Readiness Assessment (TRA) Deskbook*. Washington, D.C., Defense for Science and Technology.
- EMBRAPII, 2020, *Manual de Operação 09/2020*. Disponível em: <https://embrapii.org.br/wp-content/images/2021/07/Manual_EMBRAPII_UE_ver_sao-6.0-de-20.10.20.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2023.
- FAN, S., BOSE, N., LIANG, Z., 2024, “Polar AUV Challenges and Applications: A Review”, *Drones*, v. 8, n. 8, pp. 413.
- FENG LYU, C. C., WU, Z., 2024, “A deep-sea in-situ chemical laboratory for cabled seafloor observatories”, *Marine Georesources & Geotechnology*, v. 0, n. 0, pp. 1–12. doi: 10.1080/1064119X.2024.2315296.
- FERREIRA, A. L. L., RIBEIRO, N. M., 2024, “Nível de Prontidão de Tecnologia de Software: uma reflexão sobre diferentes escalas”, *Cadernos de Prospecção*, v. 17, n. 2, pp. 437–454.
- FRANK, C., SINK, C., MYNATT, L., et al., 1996, “Surviving the “valley of death”: A comparative analysis”, *The Journal of Technology Transfer*, v. 21, pp. 61–69.

- FRANZ, G., GARCIA, C. A. E., PEREIRA, J., et al., 2021, “Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives”, *Frontiers in Marine Science*, v. 8. ISSN: 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2021.681619.
- FURG, 2023. “Instituto de Oceanografia lidera Rede Nacional de Observação e Monitoramento Oceânico”. Disponível em: <<https://www.furg.br/noticias/noticias-institucional/instituto-de-oceanografia-lidera-rede-nacional-de-observacao-e-monitoramento-oceanico>>. Acesso em: 24 ago. 2024.
- FURG, 2024. “Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta)”. Disponível em: <<https://simcosta.furg.br/home>>. Acesso em: 13 out. 2024.
- GAO, 1999, *Best Practices: Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes*. Relatório Técnico NSIAD-99-162, U.S. Government Accountability Office (GAO). Disponível em: <<https://www.gao.gov/products/nsiad-99-162>>. Acesso em: 2 set. 2024.
- GENTILI, A., BIONDI, A., CAFFAZ, A., et al., 2023, “Comparison of Passive Acoustic Monitoring sensors for Direction of Arrival estimation of underwater acoustic sources”. In: *2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea)*, pp. 534–539. IEEE.
- GITHUB, INC., 2024. “GitHub: Where the world builds software”. Disponível em: <<https://github.com>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024a. “cloud_firestore | Flutter Package”. https://pub.dev/packages/cloud_firestore, a. Acesso em: 23 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024b, *Firebase Extensions Hub*, b. Disponível em: <<https://extensions.dev/extensions>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024c. “Firebase Cloud Messaging”. c. Disponível em: <<https://firebase.google.com/docs/cloud-messaging?hl=pt-br>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024a. “Firebase - Build apps that scale”. a. Disponível em: <<https://firebase.google.com/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024b. “Flutter - Build apps for any screen”. b. Disponível em: <<https://flutter.dev/>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

- GOOGLE, 2024a. “Google Cloud Platform”. a. Disponível em: <<https://cloud.google.com/?hl=pt>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024b. “Google Cloud Pub/Sub”. b. Disponível em: <<https://cloud.google.com/pubsub?hl=pt>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- GOOGLE, 2024c. “Firestore Client Library for Python — Python Client for Google Cloud Firestore Documentation”. <https://cloud.google.com/python/docs/reference/firestore/latest>, c. Acesso em: 23 nov. 2024.
- HAQ, E. S., SUWARDIYANTO, D., AYATULLAH, M. D., et al., 2019, “The Coastal Early Warning System Based on Buoy Sensor Measurement”. In: *2019 2nd International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, pp. 39–43. doi: 10.1109/IC2IE47452.2019.8940821.
- HÉDER, M., 2017, “From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation”, *THE INNOVATION JOURNAL*, v. 22, n. 2, pp. 1–23. Disponível em: <<https://eprints.sztaki.hu/9204/>>.
- HELAL, K. M., FRAGASSO, J., MORO, L., 2024, “Effectiveness of ocean gliders in monitoring ocean acoustics and anthropogenic noise from ships: A systematic review”, *Ocean Engineering*, v. 295, pp. 116993.
- HENSEN, J. L., LOONEN, R., ARCHONTIKI, M., et al., 2015, “Using Building Simulation for Moving Innovations across the ‘Valley of Death.’”, *REHVA Journal*, v. 52, n. 3, pp. 58–62.
- HILDEBRAND, J. A., 2009, “Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean”, *Mar Ecol Prog Ser*, v. 395, pp. 5–20.
- HOLLINGSHEAD, A., 2022. “Readiness Levels with Q&A”. Unifying Innovations in Forecasting Capabilities Workshop. Disponível em: <<https://epic.noaa.gov/wp-content/uploads/2022/07/Hollingshead-Readiness-Levels.pdf>>. Accessed: 2024-12-02.
- HONG, L., WANG, X., ZHANG, D.-S., 2024, “CFD-based hydrodynamic performance investigation of autonomous underwater vehicles: A survey”, *Ocean Engineering*, v. 305, pp. 117911.
- IEAPM, 2024a. “IEAPM Inicia Projeto de Proteção Acústica de Mamíferos Marinhos”. a. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ieapm/content/ieapm-inicia-projeto-de-prote%C3%A7%C3%A3o-ac%C3%Bastica-de-mam%C3%AAdferos-marinhos>>. Acesso em: 10 set. 2024.

- IEAPM, 2024b. “Missão do IEAPM”. b. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ieapm/missao>>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- ISO, 2013. “Space systems – Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment”. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/56064.html>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- JIANG, S., GUO, Z., ZHAO, H., et al., 2024, “OPO-CVI: design and implementation of an ocean profiling observation system for wave-powered vertical profiler following an ISO standard”, *Frontiers in Marine Science*, v. 11, pp. 1324523.
- JUNIOR, I. B., 2018, “Aula inaugural dos cursos de altos estudos militares da Escola de Guerra Naval do ano de 2018”, *Revista da Escola de Guerra Naval*, v. 24, n. 1.
- KIM, E. B., FRASIER, K. E., MCKENNA, M. F., et al., 2023, “SoundScape learning: An automatic method for separating fish chorus in marine soundscapes”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 153, n. 3, pp. 1710–1722.
- KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., et al., 2000, *Fundamentals of acoustics*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- KRAUSE, B., 1987, “Bioacoustics, habitat ambience in ecological balance”, *Whole Earth Review*, v. 57, n. 472, pp. 14–18.
- KULLENBERG, G., COMMISSION, I. O., OTHERS, 2021, *Ocean Science and International Cooperation: Historical and Personal Recollections*. Paris, France, UNESCO Publishing. ISBN: 978-92-3-100487-2.
- KWON, L., KANG, J.-G., BAIK, K. D., et al., 2024, “Advancement and applications of PEMFC energy systems for large-class unmanned underwater vehicles: A review”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 79, pp. 277–294.
- LAMPERT, J. A. D. A., COSTA, E., s.d. “SisGAAz: Proteção e Monitoramento das Águas Jurisdicionais Brasileiras”. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/sisgaaz-protacao-e-monitoramento-das-aguas-jurisdicionais-brasileiras>>. Acesso em: 2 set. 2024.
- LANCASTER, O., COSSU, R., BOULAY, S., et al., 2021, “Comparative wave measurements at a wave energy site with a recently developed low-cost wave

- buoy (Spotter), ADCP, and pressure loggers”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 38, n. 5, pp. 1019–1033.
- LIM, H. S., FILISETTI, A., MAROUCHOS, A., et al., 2023, “Applied research directions of autonomous marine systems for environmental monitoring”, *OCEANS 2023-Limerick*, pp. 1–10.
- LIMA, J. A. M., DE PAULA, T. P., SOARES FILHO, W., et al., 2022, “Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS): uma iniciativa brasileira em monitoramento acústico oceânico”, *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 10, n. 2.
- LIMA, J. A. M., SOARES FILHO, W., XAVIER, F. C., et al., 2024, “The Brazilian Santos basin underwater soundscape monitoring project (PMPAS-BS)”, *Frontiers in Marine Science*, v. 11. ISSN: 2296-7745. doi: 10.3389/fmars.2024.1416590. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2024.1416590>>.
- LIN, M., YANG, C., 2020, “Ocean observation technologies: A review”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, v. 33, pp. 1–18.
- LIU, Y., SUN, Y., LI, B., et al., 2024, “Experimental Analysis of Deep-Sea AUV Based on Multi-Sensor Integrated Navigation and Positioning”, *Remote Sensing*, v. 16, n. 1, pp. 199.
- LOPES, M. V., TONELLI, M., CERNICCHIARO, G., 2024, “Upwelling-driven variation of sound speed profile in a Brazilian bay monitored by a coastal acquisition system”, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 96, n. 2, pp. e20230846.
- LYMAN, T. P., ELSMORE, K., GAYLORD, B., et al., 2020, “Open Wave Height Logger: An open source pressure sensor data logger for wave measurement”, *Limnology and Oceanography: Methods*, v. 18, n. 7, pp. 335–345.
- MALALI, P., MARCHAND, K., 2020, “Assessment of currently available ocean wave energy conversion systems using technology readiness levels”, *International Journal of Renewable Energy Technology*, v. 11, n. 2, pp. 126–146.
- MANKINS, J. C., 1995. “Technology Readiness Levels – A White Paper”. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/247705707_Technology_Readiness_Level_-_A_White_Paper>. Acesso em: 03 dez. 2024.

- MANKINS, J. C., 2009, “Technology readiness assessments: A retrospective”, *Acta Astronautica*, v. 65, n. 9-10, pp. 1216–1223.
- MARINHA DO BRASIL, 2022, “Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira: pesquisando o mar rumo ao futuro”, *Revista do Clube Naval*, v. 2, n. 402, pp. 34–38.
- MARINHA DO BRASIL, 2024. “Política de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha”. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dgdntm/no-de/287>>. Acesso em: 26 out. 2024.
- MARTZ, T. R., DALY, K. L., BYRNE, R. H., et al., 2015, “Technology for ocean acidification research: Needs and availability”, *Oceanography*, v. 28, n. 2, pp. 40–47.
- MATSUDA, T., YOKOTA, Y., 2023, “Cooperative Ocean Survey Method by a UAV and an AUV: State Estimation of the AUV Based on the UAV”, *Marine Technology Society Journal*, v. 57, n. 4, pp. 24–33.
- MAXWELL, D. J., METTLACH, T., TAFT, B., et al., 2010, “The 2010 national data buoy center (NDBC) mooring workshop”. In: *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, pp. 1–9. IEEE.
- MEDWIN, H., CLAY, C. S., 1997, *Fundamentals of acoustical oceanography*. San Diego, CA, USA, Academic press.
- MEINDL, A., 1996, *Guide to Moored Buoys and Other Ocean Data Acquisition Systems*, v. No. 8, *DBCP Technical Document*. Geneva, Switzerland, WMO & IOC, Data Buoy Cooperation Panel. doi: 10.25607/OBP-1335. Includes Annexes.
- MELLO-FONSECA, J., CORDEIRO, C. A., FERREIRA, C. E., 2021, “Spatial distribution of sea turtles on South Atlantic subtropical reefs”, *Mar Ecol Prog Ser*, v. 678, pp. 125–138.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2016, *MCP4725 12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM*. Disponível em: <<https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/22039d.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- MICROSOFT, 2024. “GPS Simulator”. Disponível em: <<https://apps.microsoft.com/detail/9p5rqldq3ln4?hl=en-us&gl=us>>. Accessed: 2024-12-02.

- NASA, 2016, *NASA Systems Engineering Handbook*, v. SP-2016-6105 Rev 2, *NASA Special Publication*. Washington, D.C., NASA Headquarters.
- NASA, 2008, *NASA Research and Technology Program and Project Management Requirements*. NASA Procedural Requirements 7120.8, NASA, fev. Appendix J. Technology Readiness Levels (TRLs).
- NOH, H., KWON, S., PARK, Y. S., et al., 2024, “Application of RGB UAV imagery to sea surface suspended sediment concentration monitoring in coastal construction site”, *Applied Ocean Research*, v. 145, pp. 103940. doi: 10.1016/j.apor.2024.103940.
- NORTHROP, R. B., 2014, *Introduction to Instrumentation and Measurements*. 3rd ed. , CRC Press. doi: 10.1201/9781315275239.
- NUNES, R. D. C., 2024, “Technical Progress and Technological Dependence in Developing Economies”, *IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSR-JHSS)*, v. 29, n. 10, Series 1 (October), pp. 07–17.
- OLECHOWSKI, A., EPPINGER, S. D., JOGLEKAR, N., 2015, “Technology readiness levels at 40: A study of state-of-the-art use, challenges, and opportunities”. In: *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, pp. 2084–2094.
- PAULL, L., SAEEDI, S., SETO, M., et al., 2013, “AUV navigation and localization: A review”, *IEEE Journal of oceanic engineering*, v. 39, n. 1, pp. 131–149.
- PEARLMAN, J., BUSHNELL, M., COPPOLA, L., et al., 2019, “Evolving and sustaining ocean best practices and standards for the next decade”, *Frontiers in Marine Science*, v. 6, pp. 277.
- PECHEUX, N., CREUZE, V., COMBY, F., et al., 2023, “Self Calibration of a Sonar–Vision System for Underwater Vehicles: A New Method and a Dataset”, *Sensors*, v. 23, n. 3, pp. 1700.
- PIJANOWSKI, B. C., VILLANUEVA-RIVERA, L. J., DUMYAHN, S. L., et al., 2011, “Soundscape ecology: the science of sound in the landscape”, *BioScience*, v. 61, n. 3, pp. 203–216.
- PITA, I., GOES, M., VOLKOV, D., et al., 2024, “An ARGO and XBT observing system for the Atlantic meridional overturning circulation and meridional heat transport (AXMOC) at 22.5 S”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 129, n. 1, pp. e2023JC020010.

- PLATFORMIO LABS, 2024. “PlatformIO: Open Source Professional Embedded System Development”. Disponível em: <<https://platformio.org>>. Acesso em: 22 nov.2024.
- PRIEN, R. D., 2007, “The future of chemical in situ sensors”, *Marine Chemistry*, v. 107, n. 3, pp. 422–432. ISSN: 0304-4203. doi: 10.1016/j.marchem.2007.01.014.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024. “PySerial - Python Serial Port Library”. Disponível em: <<https://pypi.org/project/pyserial/>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- RABBANI, E. S., ADYTIA, D., HUSRIN, S., 2023, “Tsunami Signal Classification Based on Sea Level Data using Extreme Gradient Boosting Method for Tsunami Early Warning System Modeling”. In: *2023 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA)*, pp. 373–378. doi: 10.1109/ICoDSA58501.2023.10276491.
- RAJ, D., ANGEL PRABHA, P. P., PAI, A. S., et al., 2024, “A Comprehensive Survey on IoT Ocean Observatory Systems”. In: *2024 10th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, pp. 130–135. doi: 10.1109/ICCSP60870.2024.10543461.
- RENESAS, 2019, *X9C103 Datasheet*. Disponível em: <<https://www.renesas.com/us/en/document/dst/x9c102-x9c103-x9c104-x9c503-datasheet?r=502671>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- RODRÍGUEZ, O. C., 2021, *Fundamentos de acústica submarina*. Faro, Portugal, Universidade do Algarve Editora.
- ROLIN, J.-F., 2014, *NEXOS TRL Report - Work Package 3 - Deliverable 3.1*. Report. Disponível em: <<https://archimer.ifremer.fr/doc/00240/35167/>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- ROLLE, F., PENNECCHI, F. R., DURBIANO, F., et al., 2023, “Essential Ocean Variables for Marine Environment Monitoring: Metrological Case Studies”, *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 8, pp. 1605.
- SADIN, S. R., POVINELLI, F. P., ROSEN, R., 1989, “THE NASA TECHNOLOGY PUSH TOWARDS FUTURE SPACE MISSION SYSTEMS”. In: NAPOLITANO, L. (Ed.), *Space and Humanity*, Pergamon, pp. 73–77, Oxford. ISBN: 978-0-08-037877-0. doi: 10.1016/B978-0-08-037877-0.50012-0.

- SALAZAR, G., RUSSI-VIGOYA, M. N., 2021, “Technology Readiness Level as the Foundation of Human Readiness Level”, *Ergonomics in Design*, v. 29, n. 4, pp. 25–29. doi: 10.1177/10648046211020527.
- SANDRA, M., DEVRIESE, L. I., BOOTH, A. M., et al., 2023, “A systematic review of state-of-the-art technologies for monitoring plastic seafloor litter”, *Journal of Ocean Engineering and Science*. ISSN: 2468-0133. doi: 10.1016/j.joes.2023.07.004.
- SAWA, T., AOKI, T., YAMAMOTO, I., et al., 2005, “Performance of the fuel cell underwater vehicle URASHIMA”, *Acoustical science and technology*, v. 26, n. 3, pp. 249–257.
- SENDGRID, 2024. “SendGrid - Email Delivery Service”. Disponível em: <<https://sendgrid.com/en-us>>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- SHEN, Z., WU, W., 2024, “Ocean Bottom Distributed Acoustic Sensing for Oceanic Seismicity Detection and Seismic Ocean Thermometry”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 129, n. 3, pp. e2023JB027799. doi: 10.1029/2023JB027799. e2023JB027799 2023JB027799.
- SILVA, M. V. R. L. D., 2019. “Desenvolvimento de um sistema costeiro baseado em sensores industriais para monitoramento em tempo real do ambiente marinho”. Dissertação de Mestrado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).
- SKÅLVIK, A. M., SAETRE, C., FRØYSA, K.-E., et al., 2023, “Challenges, limitations, and measurement strategies to ensure data quality in deep-sea sensors”, *Frontiers in Marine Science*, v. 10, pp. 1152236.
- SMITH, J., 2005, “An Alternative to Technology Readiness Levels for Non-Developmental Item (NDI) Software”. In: *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 315a–315a. doi: 10.1109/HICSS.2005.77.
- SOREIDE, N., WOODY, C., HOLT, S., 2001, “Overview of ocean based buoys and drifters: present applications and future needs”. In: *MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.01CH37295)*, v. 4, pp. 2470–2472 vol.4. doi: 10.1109/OCEANS.2001.968388.
- SOURCEFORGE, 2024. “com0com - Null-modem emulator”. <https://sourceforge.net/projects/com0com/>. Acesso em: 23 nov. 2024.

- SOUZA, F. R. D. S., 2023, “Sistema de aquisição de dados oceanográficos multi-propósito em tempo real”. In: *XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite*, Cabo frio, RJ. Disponível em: <<https://evento10.com.br/wp-content/uploads/2023/11/Posteres-V2.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- SOUZA, F. R. D. S., DA SILVA, M. V. R. L., PECLY, J. O. G., 2024, “Dispositivo Embarcado para Aquisição de Sinais com Mudança do Método de Amplificação e Controle de Ganho”. In: *Congresso Brasileiro de Automática*, Rio de Janeiro, RJ, Outubro. Disponível em: <https://www.sba.org.br/cba2024/papers/paper_3410.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- STRATOUDAKIS, Y., VIEIRA, M., MARQUES, J. P., et al., 2024, “Long-Term Passive Acoustic Monitoring to Support Adaptive Management in a Sciaenid Fishery (Tagus Estuary, Portugal)”, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, v. 34, n. 1, pp. 491–510.
- TANG, Z. Q., TIAN, T., MOLINO, P. J., et al., 2024, “Recent advances in superhydrophobic materials development for maritime applications”, *Advanced Science*, v. 11, n. 16, pp. 2308152.
- TARDIFF, R., 2023. “11 innovations deepening our understanding of the ocean through data”. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2023/01/davos23-11-innovations-deepening-our-understanding-of-the-ocean-through-data/>>. Acesso em: 16 ago. 2024.
- TEKTRONIX, 2018, *CFG250 Operator’s Manual*. Disponível em: <<https://vintagetek.org/wp-content/uploads/2018/06/070-6738-00-CFG250-Operators-Manual.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- TEKTRONIX, 2024, *TBS1000B and TBS1000B-EDU Series Specifications and Performance Verification*. Disponível em: <<https://download.tek.com/manual/TBS1000B-and-TBS1000B-EDU-Specifications-and-Performance-Verification.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- THOMSON, R. E., EMERY, W. J., 2014, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Second and revised edition ed. Amsterdam, Netherlands, Elsevier. ISBN: 0-444-50756-6.
- TIAN, E., LI, Y., LI, A., 2024, “Design of USV for autonomous recovery of UAV and AUV at sea”. In: *2024 5th International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing (ICMTIM)*, pp. 70–74. IEEE.

- UNESCO, 1972, “Preparatory Conference of Governmental Experts to Formulate a Draft Convention on the Legal Status of ODAS”. Paris, France, January 31–February 11.
- URICK, R. J., 1983, *Principles of Underwater Sound*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill.
- USINAINFO, 2024. “Amplificador de Instrumentação AD620 3V-12V”. <https://www.usinainfo.com.br/amplificadores-de-sinal/amplificador-de-instrumentacao-ad620-3v-12v-5983.html>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- VERFUSS, U. K., ANICETO, A. S., HARRIS, D. V., et al., 2019, “A review of unmanned vehicles for the detection and monitoring of marine fauna”, *Marine pollution bulletin*, v. 140, pp. 17–29.
- VON OPPELN-BRONIKOWSKI, N., DE YOUNG, B., BELZILE, M., et al., 2023, “Best practices for operating underwater gliders in Atlantic Canada”, *Frontiers in Marine Science*, v. 10, pp. 1108326.
- VPA RESEARCH, 2023. “Oceanographic Monitoring System Size Outlook 2023-2030: Analysis, Industry Perspective, Trends, Size, Share, and Company Analysis Report”. Disponível em: <<https://www.marketresearch.com/VPA-Research-v4245/Oceanographic-Monitoring-System-Size-Outlook-32949707/>>. "Acesso em: 01 nov. 2024".
- WALDMANN, C., TAMBURRI, M., PRIEN, R. D., et al., 2010, “Assessment of sensor performance”, *Ocean Science*, v. 6, n. 1, pp. 235–245. doi: 10.5194/os-6-235-2010.
- WANG, C., SONG, X., FU, Q., et al., 2023a, “Design and Optimization of PV Power Supply System for Marine Buoys”, *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 9, pp. 1808.
- WANG, H., CHEN, J., FENG, Z., et al., 2024, “Development of a Mobile Buoy with Controllable Wings: Design, Dynamics Analysis and Experiments”, *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 12, n. 1. ISSN: 2077-1312. doi: 10.3390/jmse12010150.
- WANG, Y., HU, R., CHEN, Y., et al., 2023b, “Adaptive noise cancelling for an AUV-mounted passive inverted USBL array”, *Ocean Engineering*, v. 288, pp. 115998.

- WEBER, J., 2012, “WEC Technology Readiness and Performance Matrix—finding the best research technology development trajectory”. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy, Dublin, Ireland*, v. 17.
- WEINSTEIN, D., NEWCOMB, L., MATLOCK, G., et al., 2020, *NOAA Readiness Levels Workshop: Post-Workshop Report*. Relatório técnico, United States. National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA Line Office Transition Managers Committee (U.S.); NOAA Research Council (U.S.). Disponível em: <<https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/27094>>. Acesso em: 03 dez. 2024.
- WENZ, G. M., 1962, “Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources”, *The journal of the acoustical society of America*, v. 34, n. 12, pp. 1936–1956.
- WHITE, R., MARZANO, M., FESENKO, E., et al., 2022, “Technology development for the early detection of plant pests: a framework for assessing Technology Readiness Levels (TRLs) in environmental science”, *Journal of Plant Diseases and Protection*, v. 129, n. 5, pp. 1249–1261.
- WILCOCK, W. S., STAFFORD, K. M., ANDREW, R. K., et al., 2014, “Sounds in the ocean at 1–100 Hz”, *Annual review of marine science*, v. 6, n. 1, pp. 117–140.
- WÖLFL, A.-C., SNAITH, H., AMIREBRAHIMI, S., et al., 2019, “Seafloor mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry”, *Frontiers in Marine Science*, v. 6, pp. 283.
- WORLD ECONOMIC FORUM, 2023, “11 innovations deepening our understanding of the ocean through data”, *World Economic Forum*. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2023/01/davos23-11-innovations-deepening-our-understanding-of-the-ocean-through-data/>>. Acesso em: 03 set. 2024.
- XIAO, S., ZHANG, M., LIU, C., et al., 2023, “CTD sensors for ocean investigation including state of art and commercially available”, *Sensors*, v. 23, n. 2, pp. 586.
- YAN, Z., LI, Y., 2023, “Data collection optimization of ocean observation network based on AUV path planning and communication”, *Ocean Engineering*, v. 282, pp. 114912. ISSN: 0029-8018. doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114912.

- YUAN, S., LI, Y., BAO, F., et al., 2023, “Marine environmental monitoring with unmanned vehicle platforms: Present applications and future prospects”, *Science of The Total Environment*, v. 858, pp. 159741.
- ZHANG, R., HE, B., WANG, Y., et al., 2024, “Recent advances in path planning for underwater gliders: A comprehensive review”, *Ocean Engineering*, v. 299, pp. 117166.
- ZHANG, S., TIAN, C., ZHOU, F., 2023, “Design and optimization of buoy mooring with single-point cable for seafloor observatories”, *Frontiers in Marine Science*, v. 9, pp. 1048048.
- ZHONG, C., LU, J., KANG, D., et al., 2024, “Design of a multiparameter data acquisition and control system for in situ seabed observation base stations”, *IET Science, Measurement & Technology*, v. 18, n. 1, pp. 33–47. doi: 10.1049/smt2.12169.

Apêndice A

Modelo do amplificador do ODAS desenvolvido

A **Figura A.1** apresenta a placa escolhida com o AD620 e a **Figura A.2** apresenta o seu circuito.

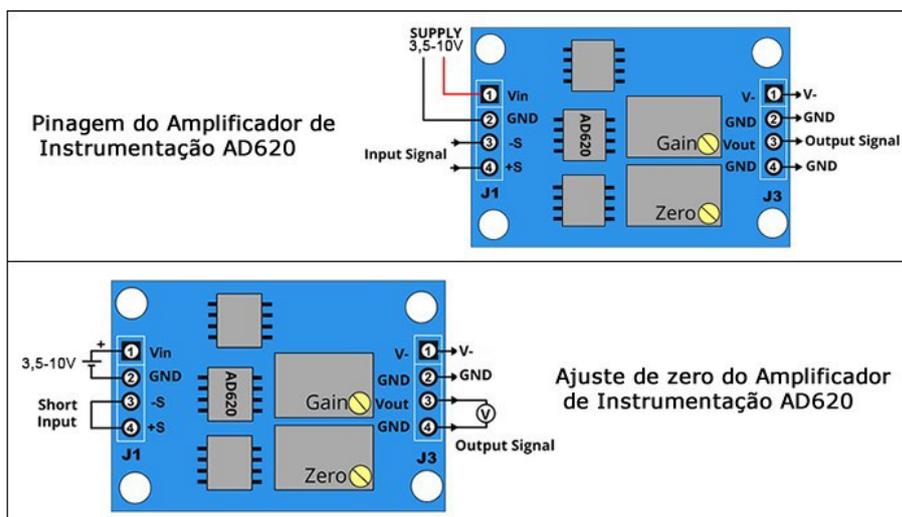


Figura A.1: Placa com o AD620. Fonte: USINAINFO (2024)

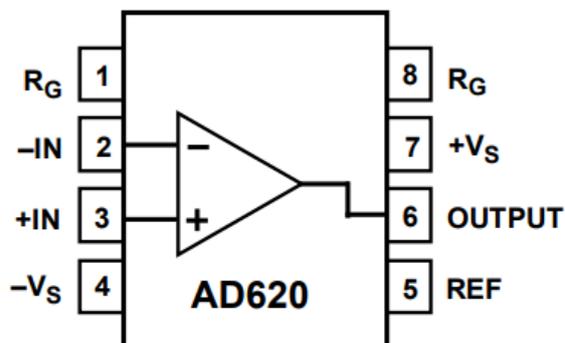


Figura A.2: Pinagem do AD620. Fonte: ANALOG DEVICES (2009)

Onde:

- Pino 1 (R_G): Pino para conectar o resistor de ganho;
- Pino 2 (-IN): Entrada negativa diferencial;
- Pino 3 (+IN): Entrada positiva diferencial;
- Pino 4 ($-V_S$): Alimentação negativa;
- Pino 5 (REF): Pino de referência para ajustar o ponto de operação da saída;
- Pino 6 (OUTPUT): Saída do amplificador;
- Pino 7 ($+V_S$): Alimentação positiva; e
- Pino 8 (R_G): Outro pino para conectar o resistor de ganho