

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CÂMPUS ITAJAÍ

TIAGO MORO

**GATEWAY EMBARCADO PARA CONVERSÃO DE INFORMAÇÕES DE
SENSORES RESISTIVOS EM DADOS NMEA 2000: PROVA DE CONCEITO PARA
MODERNIZAÇÃO DE EMBARCAÇÕES**

ITAJAÍ
2026

Tiago Moro

Gateway embarcado para conversão de informações de sensores resistivos em dados NMEA 2000: prova de conceito para modernização de embarcações.

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Roddy Alexander Romero Antayhua, Dr. Eng.

ITAJAÍ
2026

Ficha de Identificação da obra elaborada pelo autor, através do cadastro de ficha de identificação disponível no portal discente do Sistema Integrado de Gestão Acadêmica - SIGAA, do IFSC.

Moro, Tiago

Gateway embarcado para conversão de informações de sensores resistivos em dados NMEA 2000: prova de conceito para modernização de embarcações. / Tiago Moro ; orientador(a): Romero Antayhua, Dr. Eng.. -- Itajaí : 2026.

75 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí. Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Itajaí, 2026.

Inclui referências.

1. Gateway embarcado. 2. NMEA 2000. 3. Sensores resistivos. I. Eng., Romero Antayhua, Dr.. II. Instituto Federal de Santa Catarina, Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica. III. Título.

Tiago Moro

GATEWAY EMBARCADO PARA CONVERSÃO DE INFORMAÇÕES DE
SENSORES RESISTIVOS EM DADOS NMEA 2000: PROVA DE CONCEITO
PARA MODERNIZAÇÃO DE EMBARCAÇÕES

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina,
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia Elétrica

Itajaí, 04 de Agosto de 2026.



Documento assinado digitalmente

RODDY ALEXANDER ROMERO ANTAYHUA

Data: 06/08/2026 16:30:55-0300

CPF: ***.069.960-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Eng. Roddy Alexander Romero Antayhua

Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

GUILHERME RANZOLIN PIAZZETTA

Data: 08/08/2026 20:51:13-0300

CPF: ***.696.069-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Me. Eng. Guilherme Ranzolin Piazzetta

Instituto Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

JOAO PAULO CAMELO CUNHA

Data: 11/08/2026 11:38:10-0300

CPF: ***.351.313-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Me. Eng. João Paulo Camelo Cunha

Instituto Federal de Santa Catarina

Dedicado à minha família.

RESUMO

A crescente digitalização da instrumentação naval exige a integração de sistemas eletrônicos modernos. Contudo, grande parte das embarcações ainda utiliza sensores analógicos resistivos legados para o monitoramento de fluidos e de temperatura. A substituição completa desses componentes físicos e estruturais é dispendiosa e complexa. Para solucionar este problema, o presente trabalho descreve o desenvolvimento e a validação de uma Prova de Conceito (PoC) de um *gateway* embarcado de baixo custo, projetado para atuar como uma interface de tradução entre transdutores resistivos e a rede veicular naval digital padronizada NMEA 2000. A metodologia abrangeu o dimensionamento de *hardware* baseado no microcontrolador ESP32 e em transceptores CAN (SN65HVD230). No escopo do *software*, o *firmware* foi desenvolvido em C++ incorporando um filtro digital de média móvel para mitigar as variações abruptas de leitura causadas pela dinâmica turbulenta do fluido nos tanques (efeito *sloshing*). O sistema foi programado para realizar a autodetecção inteligente de até cinco canais simultâneos, inibindo o envio de pacotes redundantes ao barramento em caso de ausência de sensores. Os ensaios experimentais de bancada comprovaram a estabilidade da camada física e lógica, na qual o protótipo executou perfeitamente os protocolos de autoconfiguração de endereço (*Address Claiming*) e resposta a requisições de identidade (*ISO Request*). A validação final foi consolidada por meio da integração direta do dispositivo com um *Display* Multifuncional (MFD) comercial da Garmin, que reconheceu o equipamento com sucesso na rede e plotou graficamente os dados de nível e temperatura em tempo real com alta estabilidade. Conclui-se que o desenvolvimento alcançou integralmente seu objetivo, viabilizando a modernização tecnológica de embarcações de forma acessível e segura, e provando a viabilidade de integrar componentes legados robustos a redes navais de alta velocidade.

Palavras-chave: *Gateway* embarcado; NMEA 2000; Sensores resistivos.

ABSTRACT

The increasing digitalization of naval instrumentation requires the integration of modern electronic systems. However, a large portion of vessels still relies on legacy resistive analog sensors for fluid and temperature monitoring. Completely replacing these physical and structural components is both costly and complex. To address this issue, the present work describes the development and validation of a Proof of Concept (PoC) for a low-cost embedded gateway, designed to act as a translation interface between resistive transducers and the standardized NMEA 2000 digital naval network. The methodology encompassed hardware sizing based on the ESP32 microcontroller and CAN transceivers (SN65HVD230). Regarding software, the firmware was developed in C++ incorporating a moving average digital filter to mitigate the abrupt reading variations caused by the turbulent dynamics of the fluid inside the tanks (sloshing effect). The system was programmed to perform intelligent auto-detection of up to five simultaneous channels, preventing the transmission of redundant packets to the bus in the absence of connected sensors. Experimental bench tests proved the stability of the physical and logical layers, where the prototype flawlessly executed the address auto-configuration (Address Claiming) and identity request response (ISO Request) protocols. Final validation was achieved through the direct integration of the device with a commercial Garmin Multi-Function Display (MFD), which successfully recognized the equipment on the network and plotted volume and temperature data in real time with high stability. It is concluded that the development fully achieved its objective, enabling the technological modernization of vessels in an accessible and safe manner, and proving the feasibility of integrating robust legacy components into high-speed naval networks.

Keywords: Embedded gateway; NMEA 2000; Resistive sensors.

LISTA DE IMAGENS

Imagem 1 – Exemplo de topologia básica de uma rede NMEA 2000.	20
Imagem 2 – Estrutura do <i>cata frame</i> estendido CAN.	22
Imagem 3 – Pinagem padrão do conector NMEA 2000 (Micro-C Fêmea). . . .	24
Imagem 4 – Sensor de nível resistivo em aço inoxidável com tecnologia <i>reed switch</i>	27
Imagem 5 – Comportamento dinâmico e turbulento da superfície livre do fluido durante o fenômeno de <i>sloshing</i>	28
Imagem 6 – Curva de resistência em função da temperatura para o sensor PT100.	30
Imagem 7 – Circuito divisor de tensão genérico.	31
Imagem 8 – Diagrama de blocos da arquitetura do <i>gateway</i>	34
Imagem 9 – Microcontrolador ATmega328P em placa de desenvolvimento. . .	36
Imagem 10 – Placa de desenvolvimento baseada no STM32F103C8T6.	37
Imagem 11 – Módulo de desenvolvimento ESP32.	38
Imagem 12 – Módulo transceptor CAN baseado no CI SN65HVD230.	41
Imagem 13 – Transceptor CAN isolado ISO1050.	42
Imagem 14 – Esquemático elétrico e de pinagem do <i>gateway</i> NMEA 2000. . . .	46
Imagem 15 – Trecho da função de autodetecção e filtragem para múltiplos canais.	49
Imagem 16 – Montagem experimental da Prova de Conceito para validação da comunicação NMEA 2000.	52
Imagem 17 – Montagem experimental da Prova de Conceito integrada aos sensores analógicos.	53
Imagem 18 – Lista de dispositivos (<i>device list</i>) do MFD Garmin exibindo o <i>gateway</i> homologado na rede.	55
Imagem 19 – Visualização dos níveis de fluido e temperatura no MFD Garmin transmitidos pelo <i>gateway</i>	55
Imagem 20 – Teste simulando efeito <i>sloshing</i>	57
Imagem 21 – Monitoramento do barramento com o sensor de combustível 1 conectado à bancada.	59
Imagem 22 – Interface de diagnóstico exibindo o sensor de combustível 1 em estado desconectado.	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Legenda dos componentes da topologia NMEA 2000.	20
Quadro 2 – Principais PGNs de Gerenciamento e Sensores do Padrão NMEA 2000.	23
Quadro 3 – Especificações técnicas do microcontrolador ATmega328P (Microchip Technology Inc., 2015).	38
Quadro 4 – Especificações técnicas do microcontrolador STM32F103C8T6 (ST-Microelectronics, 2015).	39
Quadro 5 – Especificações técnicas do microcontrolador ESP32 (Espressif Systems, 2024).	39
Quadro 6 – Comparativo de adequação técnica por requisito do projeto.	40
Quadro 7 – Mapa de pinagem e conexões físicas do circuito protótipo.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABYC	<i>American Boat and Yacht Council</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i> (Rede de Área de Controlador)
CANH	<i>CAN High</i> (CAN Alto)
CANL	<i>CAN Low</i> (CAN Baixo)
CI	Circuito Integrado
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> (Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora e Prevenção de Colisões)
DSP	<i>Digital Signal Processing</i> (Processamento Digital de Sinais)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
GND	<i>Ground</i> (Terra)
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> (Entrada/Saída de Propósito Geral)
I/O	<i>Input/Output</i> (Entrada/Saída)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IFSC	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
IP	<i>Ingress Protection</i> (Grau de Proteção)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)

Kb	Kilobit
LoRa	<i>Long Range</i> (Longo Alcance)
MFD	<i>Multi Function Display</i> (Display Multifuncional)
MHz	Megahertz
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i> (Associação Nacional de Eletrônicos Marítimos)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de Temperatura Negativo)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PGN	<i>Parameter Group Number</i> (Número de Grupo de Parâmetros)
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de Temperatura Positivo)
PoC	<i>Proof of Concept</i> (Prova de Conceito)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i> (Detector de Temperatura por Resistência)
RX	<i>Receiver</i> (Receptor)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Periférica Serial)
SoC	<i>System on a Chip</i> (Sistema em um Chip)
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> (Lógica Transistor-Transistor)
TWAI	<i>Two-Wire Automotive Interface</i> (Interface Automotiva de Dois Fios)
TX	<i>Transmitter</i> (Transmissor)
VCC	<i>Volts Direct Current</i> (Tensão de Corrente Contínua)
VHF	<i>Very High Frequency</i> (Frequência Muito Alta)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	14
1.3	OBJETIVO GERAL	15
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5	ESTADO DA ARTE E TRABALHOS RELACIONADOS	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	O PROTOCOLO NMEA 2000 E REDES NAVAIS	19
2.2	PADRÕES DE COMUNICAÇÃO E INTERFACE DE REDE	21
2.2.1	Estrutura de Mensagens (PGNs) e Processo de Arbitragem	21
2.2.2	Especificações da Norma IEC 61162-3	23
2.2.3	Camada Física e Padronização de Conectores	24
2.2.4	Gerenciamento de Rede e Auto-configuração (<i>Address Claiming</i>)	25
2.2.5	Robustez e Conformidade em Ambiente Naval	25
2.3	SENSORES RESISTIVOS E DINÂMICA DE FLUIDOS	25
2.3.1	Princípio de Funcionamento dos Sensores de Nível Legados	26
2.3.2	O Efeito <i>Sloshing</i> em Tanques Navais	27
2.3.3	Sensores Resistivos de Temperatura	29
2.4	MICROCONTROLADORES E TRATAMENTO DIGITAL DE SINAIS	30
2.4.1	Conversão Analógico-Digital (ADC)	31
2.4.2	Filtro Digital de Média Móvel	32
3	METODOLOGIA	34
3.1	ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA	34
3.1.1	Seleção do Microcontrolador	35
3.1.2	Seleção do Transceptor CAN	40
3.2	PROJETO E ESQUEMÁTICO ELÉTRICO	42
3.2.1	Dimensionamento do Divisor de Tensão	43
3.2.2	Proteção de Hardware e Pinagem da Interface CAN	44
3.3	DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE	46

3.3.1	Ambiente de Desenvolvimento e Bibliotecas	46
3.3.2	Lógica de Aquisição e Autodeteção de Sensores	47
3.3.3	Lógica de Programação e Filtragem Digital	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	VALIDAÇÃO DA CAMADA DE COMUNICAÇÃO NMEA 2000	51
4.1.1	Resultados da Troca de Dados e Descoberta de Rede	52
4.2	INTEGRAÇÃO FINAL DO HARDWARE E LEITURA ANALÓGICA MÚLTIPLA	53
4.2.1	Condicionamento dos Sinais e Dimensionamento dos Divisores	54
4.2.2	Resultados da Integração com o MFD Comercial	54
4.2.3	Metodologia dos Experimentos Dinâmicos e Análise do Filtro . .	56
4.2.4	Viabilidade de Testes Dinâmicos e Requisitos de Robustez Industrial	57
4.2.5	Comprovação Prática do Mecanismo de Autodeteção (<i>Plug-and-Play</i>)	58
4.2.6	Ajuste e Mitigação da Não Linearidade do ADC do ESP32	60
4.2.7	Análise Estrutural do Firmware e Limitações de Mapeamento Dinâmico	61
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO FIRMWARE DO GATEWAY NMEA 2000	68

1 INTRODUÇÃO

A crescente digitalização em embarcações de esporte e recreio tem impulsionado uma significativa modernização da frota, onde a integração de sistemas eletrônicos se torna um pilar para a segurança e a eficiência da navegação. Esta integração é crucial, visto que a multiplicidade de sensores e sistemas a bordo geram um volume massivo de dados que precisam ser trocados de forma confiável para garantir a navegação segura, conforme destacado em estudos sobre a aplicação de redes de sensores inteligentes no ambiente naval (GARCÍA *et al.*, 2019).

A troca confiável de dados entre sensores, controladores e interfaces de visualização, como os modernos *Displays Multifuncionais* (MFDs), é fundamental para a tomada de decisão a bordo. Nesse contexto, o protocolo da *National Marine Electronics Association* (NMEA) 2000, formalizado como a norma da *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61162-3, estabeleceu-se como o padrão de fato para a interconexão de dispositivos em embarcações de pequeno e médio porte (International Electrotechnical Commission, 2014).

Fundamentado na robusta tecnologia de barramento *Controller Area Network* (CAN), que garante a integridade dos dados através de mecanismos de verificação de erros e arbitragem de prioridades, essenciais em um ambiente crítico como o naval, o NMEA 2000 viabiliza uma rede unificada onde múltiplos equipamentos podem se comunicar de forma padronizada e confiável.

Este trabalho é formalmente definido como uma Prova de Conceito (PoC), cujo objetivo é validar a viabilidade técnica da abordagem proposta. Pretende-se demonstrar que é possível, com *hardware* de baixo custo e um *firmware* inteligente, criar uma ponte eficaz entre tecnologias legadas e as modernas redes de comunicação naval.

O *gateway* proposto atua estritamente como um dispositivo de tradução entre os sinais dos sensores analógicos legados e a camada de aplicação da rede NMEA 2000. Ele funciona no barramento CAN como um nó inteligente produtor de dados (responsável por amostrar, filtrar e encapsular os dados), e não como um roteador de tráfego entre redes distintas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este projeto assume grande relevância ao atender a uma necessidade latente no mercado náutico: a modernização de embarcações existentes (*retrofit*) de forma acessível e eficiente. Com a crescente digitalização da instrumentação naval, a interoperabilidade entre sistemas legados e as novas interfaces de navegação tornou-se um fator crítico.

Sensores resistivos, como os de nível de tanque, continuam sendo amplamente utilizados devido à sua comprovada robustez, baixo custo e simplicidade de instalação, representando um legado tecnológico valioso.

A justificativa deste trabalho reside em criar uma ponte tecnológica entre esses componentes analógicos confiáveis e os modernos MFDs que operam sobre redes NMEA 2000. Um exemplo prático dessa aplicação no mercado atual são os *chartplotters* da série GPSMAP (modelos 7x3, 9x3, 12x3 e 16x3) da Garmin, que atuam como MFDs plenamente compatíveis com o protocolo NMEA 2000 (Garmin Ltd., 2025).

A solução proposta permitirá que proprietários de embarcações integrem informações vitais de seus sensores antigos aos painéis de controle digitais sem a necessidade de intervenções dispendiosas, como a substituição de tanques ou dos próprios sensores primários.

Ao viabilizar essa integração, o projeto não apenas preserva o investimento em *hardware* existente, mas também promove a segurança e a eficiência da navegação ao centralizar dados operacionais críticos em uma única interface moderna e de fácil visualização. Em síntese, o valor do projeto está em sua capacidade de democratizar o acesso à tecnologia de monitoramento digital, oferecendo uma atualização de baixo impacto e alto valor agregado para uma vasta gama de embarcações de esporte e recreio.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A transição para o digital apresenta um desafio prático e econômico: a vasta quantidade de embarcações existentes ainda utiliza sensores analógicos legados, como medidores de nível de tanque de combustível, água e temperatura, que operam com base em variações de valor resistivo. Estes sensores são incompatíveis com as

redes digitais modernas. A substituição completa desses sistemas, que muitas vezes envolve a troca de tanques e componentes estruturais, representa um custo excessivo para muitos proprietários.

O problema central abordado por este trabalho é, portanto, a necessidade de desenvolver uma solução acessível e eficiente para integrar esses sensores analógicos em redes NMEA 2000.

Uma análise crítica do processo de medição revela que, no contexto desta aplicação, o resultado da medição não é limitado pela resolução do sistema de medição eletrônico. Ao avaliar o mensurando em questão — volumes de 1000 a 2000 litros em tanques de embarcações de recreio —, constata-se que a resolução do conversor analógico-digital (ADC) não representa a componente de incerteza dominante para a obtenção de um resultado adequado ao uso pretendido.

A complexidade inerente à dinâmica dos fluidos em reservatórios móveis manifesta-se através do fenômeno denominado *sloshing*. Este efeito é caracterizado como um movimento oscilatório altamente não linear da superfície livre do líquido, impulsionado por forças externas contínuas ou instantâneas decorrentes da aceleração e da inclinação do veículo (FROSINA *et al.*, 2018). Tais perturbações não apenas induzem cargas inerciais e vibrações estruturais, mas afetam criticamente a confiabilidade dos sensores internos, prejudicando a precisão da medição do nível de combustível e, por conseguinte, o gerenciamento eficaz da autonomia da operação (FROSINA *et al.*, 2018).

Diante dessa instabilidade inerente ao ambiente naval, estabelece-se um requisito fundamental para a solução proposta: o *gateway* deve obrigatoriamente incorporar algoritmos de filtragem digital em seu *firmware*. Essa etapa de processamento torna-se imprescindível para atenuar as flutuações do sinal analógico bruto, garantindo que os dados transmitidos à rede NMEA 2000 reflitam o volume útil de forma estável à dinâmica de movimentação da embarcação.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um *gateway* embarcado microcontrolado para realizar a leitura de sensores resistivos (nível de tanque e temperatura) e converter os dados para o proto-

colo NMEA 2000, possibilitando a visualização das informações em MFDs de embarcações de esporte e recreio.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar o levantamento bibliográfico sobre o protocolo NMEA 2000, com foco na camada física CAN, na estrutura de *Parameter Group Numbers* (PGNs) e no processo de arbitragem, bem como sobre as especificações do microcontrolador, com ênfase na quantidade de canais ADC;
- b) Elaborar um estudo técnico para dimensionamento das portas de Entrada/Saída (I/O), avaliando as limitações dos canais do Conversor Analógico-Digital (ADC) para fundamentar a escolha da variante do microcontrolador e garantir a escalabilidade do *hardware*;
- c) Projetar o circuito eletrônico de interfaceamento, definindo os divisores de tensão necessários para adequar os sinais elétricos dos sensores resistivos (padrão náutico) às especificações de entrada do *hardware*;
- d) Desenvolver o *firmware* em C/C++ para realizar a amostragem dos sinais e implementar algoritmos de filtragem digital, como a média móvel, visando a estabilização das leituras frente à movimentação da embarcação;
- e) Implementar no *firmware* uma lógica de detecção de conectividade (autodiagnóstico), capaz de identificar sensores desconectados ou em curto-circuito através da análise dos limites de tensão do ADC, prevenindo o envio de dados inválidos à rede;
- f) Integrar a pilha de comunicação do protocolo NMEA 2000 ao *firmware* para formatar e transmitir os PGNs correspondentes aos dados de nível e temperatura processados;
- g) Validar a funcionalidade do protótipo em bancada, simulando as variações de resistência de múltiplos sensores ou de diferentes padrões resistivos por meio de potenciômetros e sensores reais, verificando a correta identificação, recepção e visualização dos dados correspondentes em um MFD.

1.5 ESTADO DA ARTE E TRABALHOS RELACIONADOS

A modernização da instrumentação naval e a integração de dados através de microcontroladores têm sido objeto de recentes pesquisas acadêmicas e industriais. A transição de sistemas analógicos e redes legadas para topologias digitais eficientes apresenta múltiplos desafios de engenharia, desde a conversão de protocolos físicos até a garantia de segurança da informação no barramento veicular.

No contexto da transmissão de dados navais e telemetria, Rodrigues (2022) desenvolveu um estudo explorando a aplicação de redes sem fio de longo alcance e baixa potência (LoRa) para a comunicação marítima baseada no padrão NMEA. A pesquisa demonstrou a viabilidade de encapsular as sentenças do protocolo naval para transmissão remota a estações terrestres. Embora o trabalho comprove a flexibilidade dos dados NMEA em plataformas modernas de Internet das Coisas (IoT), a sua abordagem foca-se no monitoramento externo da embarcação, divergindo da necessidade de integração cabeada de alta velocidade em tempo real exigida pelos MFDs.

Focando no diagnóstico interno de redes navais legadas, Valverde (2026) projetou um analisador de rede utilizando especificamente o microcontrolador ESP32. O trabalho consistiu na interceptação e auditoria de tráfego do protocolo NMEA 0183, baseado no padrão elétrico RS-422, redirecionando os dados de navegação em tempo real via Bluetooth para dispositivos móveis. Este estudo é fundamental por validar empiricamente a robustez e a capacidade de processamento do *System on a Chip* (SoC) ESP32 no ambiente marítimo. Contudo, a aplicação limitou-se à leitura passiva de um protocolo serial ponto a ponto obsoleto, não abordando a injeção de dados analógicos nem a complexidade de transdutores físicos.

À medida que o setor naval migra do NMEA 0183 para o NMEA 2000, novos desafios de arquitetura surgem. Quigley e Sumpner (2024) investigaram a infraestrutura do NMEA 2000 sob a ótica da robustez de rede, destacando as vulnerabilidades de protocolos baseados em CAN. Os autores analisaram falhas de segurança no processo de reivindicação de endereço e nos protocolos de transporte, ressaltando a importância de os nós da rede respeitarem estritamente os tempos de resposta e a estrutura dos PGNs para manter a estabilidade do barramento perante anomalias.

A análise do estado da arte evidencia uma lacuna tecnológica prática: enquanto as pesquisas atuais exploram a LoRa, a auditoria de redes seriais legadas (NMEA 0183) e a cibersegurança do barramento CAN, escasseiam soluções de *hardware* embarcado de baixo custo voltadas ao *retrofit* de componentes físicos. O presente trabalho diferencia-se ao preencher exatamente esta lacuna. Ao invés de atuar como um mero roteador ou auditor de pacotes, a PoC aqui proposta utiliza o ESP32 como um nó produtor inteligente de rede, capaz não apenas de operar ativamente as exigências do protocolo NMEA 2000, mas de resolver o problema físico e mecânico da conversão analógica de sensores resistivos e da mitigação do efeito *sloshing* através de processamento digital de sinais.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, este trabalho está estruturado em cinco capítulos principais. Este primeiro capítulo apresentou a contextualização do tema, a justificativa, a definição do problema e os objetivos da pesquisa. O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária, aprofundando os conceitos sobre o protocolo NMEA 2000, a camada física CAN, as características dos sensores resistivos e o tratamento digital de sinais para mitigação do efeito *sloshing*. O Capítulo 3 detalha a metodologia aplicada, descrevendo o dimensionamento do *hardware*, o desenvolvimento do *firmware* e os protocolos de teste. O Capítulo 4 apresenta a análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios de validação em bancada e a estabilidade da leitura na rede. Por fim, o Capítulo 5 reúne as considerações finais e sugere direcionamentos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico e tecnológico necessário para a compreensão e o desenvolvimento do *gateway* proposto. Inicialmente, explora-se a arquitetura e o funcionamento do protocolo NMEA 2000 e da sua camada física baseada no barramento CAN. Em seguida, são abordados os fenômenos físicos inerentes à medição de fluidos em embarcações, como o *sloshing*, e as metodologias de tratamento digital de sinais utilizando microcontroladores para mitigar tais perturbações e garantir a confiabilidade dos dados transmitidos na rede.

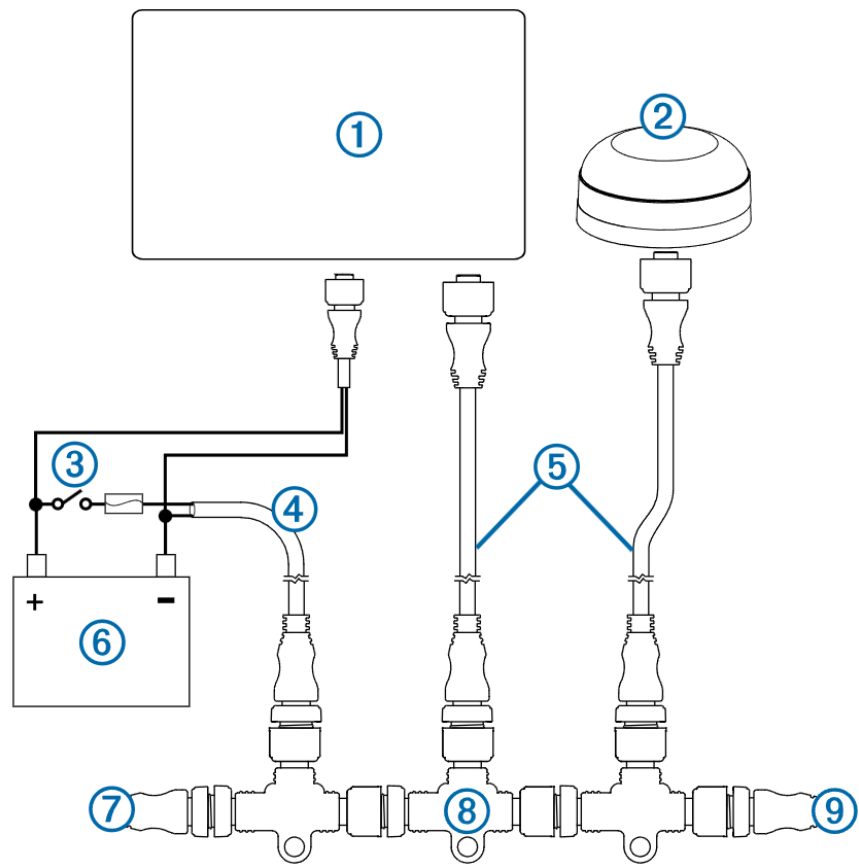
2.1 O PROTOCOLO NMEA 2000 E REDES NAVAIS

Historicamente, a comunicação de dados eletrônicos em embarcações era dominada pelo padrão NMEA 0183. Este padrão legado utilizava uma arquitetura de comunicação serial ponto a ponto (baseada no padrão elétrico RS-422), operando a baixas taxas de transmissão (geralmente 4.8kbps). Embora confiável para instrumentos simples e de baixo tráfego, o NMEA 0183 exigia cabeamentos complexos e interfaces multiplicadoras quando um único sensor precisava enviar dados para múltiplos visualizadores, limitando a escalabilidade do sistema (PAYNE, 2006).

O protocolo NMEA 2000 foi desenvolvido pela *National Marine Electronics Association* (NMEA) para superar essas limitações, estabelecendo uma rede de comunicação multiponto e de alta velocidade. Projetado com o conceito *plug-and-play*, ele permite que diversos sensores, atuadores e MFDs de diferentes fabricantes sejam conectados a um único cabo principal (o *backbone*), compartilhando energia e dados bidirecionalmente a uma taxa de 250 kbps. Essa topologia reduz drasticamente a quantidade de cabos na embarcação, diminuindo o peso, o custo de instalação e os pontos de falha no sistema elétrico naval.

A Imagem 1 ilustra um exemplo prático dessa arquitetura, evidenciando a conexão da fonte de alimentação, os terminadores nas extremidades do *backbone* e a derivação dos equipamentos (nós) por meio de conectores em T (PAYNE, 2006).

Imagem 1 – Exemplo de topologia básica de uma rede NMEA 2000.



Fonte: Adaptado de Garmin Ltd. (2025).

Quadro 1 – Legenda dos componentes da topologia NMEA 2000.

Item	Descrição
1	Dispositivo compatível com NMEA 2000 (ex: MFD)
2	Antena de GPS (ou outro nó produtor de dados)
3	Interruptor em linha ou ignição
4	Cabo de alimentação da NMEA 2000
5	Cabo de rede (derivação) da NMEA 2000
6	Fonte de alimentação de 12 VCC (bateria)
7	Terminador da NMEA 2000
8	Conector em T da NMEA 2000
9	Terminador da NMEA 2000

Fonte: Adaptado de Garmin Ltd. (2025).

2.2 PADRÕES DE COMUNICAÇÃO E INTERFACE DE REDE

A robustez mecânica e elétrica é um requisito inegociável em embarcações, cujos ambientes são caracterizados por altas vibrações, variações extremas de temperatura e intensa interferência eletromagnética gerada por motores, geradores e rádios *Very High Frequency* (VHF) (IEC, 2016; IEC, 2002). Por essa razão, a arquitetura do NMEA 2000 foi construída sobre a consagrada tecnologia de barramento CAN, desenvolvida originalmente pela Robert Bosch GmbH para a indústria automotiva (Robert Bosch GmbH, 1991).

A sinalização no barramento CAN é do tipo diferencial, utilizando dois fios principais para transmissão de dados: CAN High (CAN_H) e CAN Low (CAN_L). Em estado de repouso (bit recessivo), ambos os fios apresentam uma tensão de aproximadamente 2,5 V. Para transmitir um nível lógico dominante (bit dominante), a tensão no CAN_H sobe para cerca de 3,5 V e no CAN_L desce para cerca de 1,5 V. O receptor avalia a diferença de potencial entre as duas linhas. Essa característica diferencial torna a rede altamente imune a ruídos de modo comum, pois qualquer interferência eletromagnética induzida no cabo afeta ambos os fios simultaneamente, sendo cancelada no receptor diferencial (Robert Bosch GmbH, 1991).

2.2.1 Estrutura de Mensagens (PGNs) e Processo de Arbitragem

No barramento CAN, que atua na camada de enlace de dados, as mensagens não são enviadas para endereços de nós específicos, mas sim transmitidas em *broadcast* para toda a rede. Cada mensagem contém um identificador único que descreve o conteúdo dos dados.

O protocolo NMEA 2000 utiliza a especificação estendida do CAN (CAN 2.0B), que estrutura a comunicação através de quadros de dados específicos possuindo um identificador de 29 bits (Robert Bosch GmbH, 1991). Além dos bits de controle e de verificação de erros, cada quadro de dados contém um campo de dados restrito de 0 a 8 bytes. O identificador completo (identificador mais identificador estendido) de 29 bits assume a responsabilidade de definir a prioridade da mensagem, identificar o conteúdo, a origem e o destino do pacote. A estrutura completa desse quadro de dados pode ser observada na Imagem 2.

Quadro 2 – Principais PGNs de Gerenciamento e Sensores do Padrão NMEA 2000.

PGN	Descrição do Parâmetro na Rede
059904	<i>ISO Request</i> (Requisição de Informação ISO)
060928	<i>ISO Address Claim</i> (Reivindicação de Endereço de Rede)
126993	<i>Heartbeat</i> (Sinalização de Presença na Rede)
126996	<i>Product Information</i> (Informações do Produto/Fabricante)
127250	<i>Vessel Heading</i> (Proa da Embarcação)
127489	<i>Engine Parameters, Dynamic</i> (Parâmetros Dinâmicos do Motor)
127505	<i>Fluid Level</i> (Nível de Fluido do Tanque)
127508	<i>Battery Status</i> (Status de Tensão/Corrente da Bateria)
129025	<i>Position, Rapid Update</i> (Posição GPS - Atualização Rápida)
130314	<i>Actual Pressure</i> (Pressão Atual)
130316	<i>Temperature, Extended Range</i> (Temperatura - Faixa Estendida)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em NMEA (2024).

O controle de tráfego na rede utiliza uma técnica de acesso múltiplo com detecção de portadora e prevenção de colisões, frequentemente referenciada na literatura do padrão como *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). O processo de arbitragem bit a bit garante que, se dois dispositivos tentarem transmitir simultaneamente, a mensagem com o identificador de maior prioridade (nível lógico dominante mais baixo) assumirá o controle do barramento físico sem corromper os dados.

No protocolo NMEA 2000, este determinismo é crucial para prover suporte a dados de missão crítica. Conforme detalhado pela própria NMEA, os múltiplos níveis de prioridade são refletidos diretamente na atribuição dos identificadores das mensagens, garantindo que alarmes de falha de motor e comandos de direção tenham precedência imediata de tráfego sobre dados menos urgentes, como a leitura do nível da água doce (SPITZER; LUFT; MORSCHHAUSER, 2009).

2.2.2 Especificações da Norma IEC 61162-3

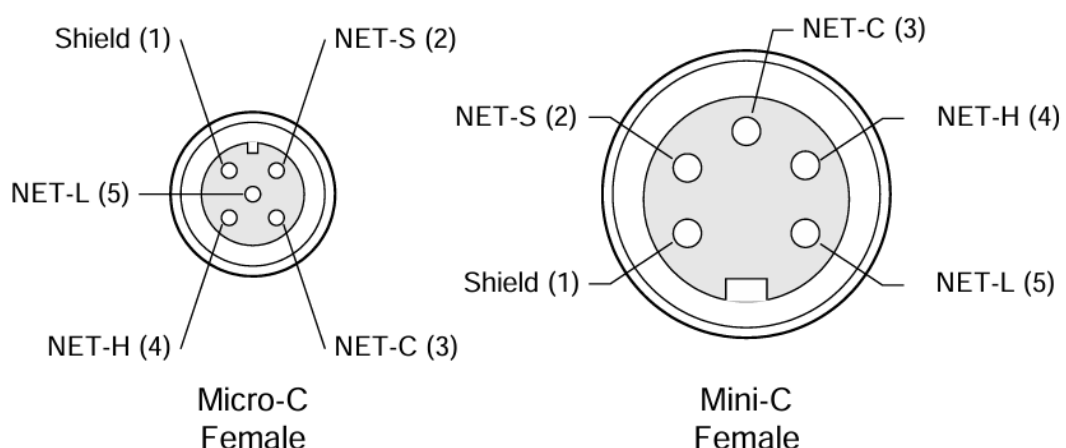
Para garantir a padronização global e a interoperabilidade irrestrita entre fabricantes do setor naval, a tecnologia NMEA 2000 foi formalmente adotada e ratificada pela Comissão Eletrotécnica Internacional sob a norma IEC 61162-3 (International Electrotechnical Commission, 2014). A norma IEC 61162-3 (2014) especifica não apenas o formato das mensagens, mas exigências físicas rigorosas. Ela define o pa-

drão de cabeamento, exigindo conectores impermeáveis (tipos Micro-C ou Mini-C com classificação IP67 ou superior) e a utilização de resistores de terminação de $120\ \Omega$ em cada extremidade do *backbone* para evitar reflexão de sinal em altas frequências. Além disso, a norma estrutura a distribuição de energia diretamente no barramento (12 VCC), permitindo que nós de baixo consumo, como o *gateway* de sensores resistivos proposto neste trabalho, sejam alimentados diretamente pelo cabo da rede, eliminando a necessidade de fontes de alimentação locais.

2.2.3 Camada Física e Padronização de Conectores

O padrão físico do protocolo NMEA 2000 define rigorosamente o cabeamento e as interfaces de conexão para garantir a interoperabilidade e a robustez mecânica no ambiente naval hostil. A topologia física utiliza cabos que transportam tanto os sinais diferenciais de comunicação (CAN High e CAN Low) quanto a alimentação elétrica e a blindagem. Para a interligação dos nós à rede principal (*backbone*), empregam-se conectores padronizados, sendo o modelo Micro-C de 5 pinos o mais comum para as conexões de ramificação dos instrumentos. A Imagem 3 ilustra a disposição padrão dos terminais e suas respectivas funções, conforme estabelecido pela documentação oficial do protocolo (SPITZER; LUFT; MORSCHHAUSER, 2009).

Imagem 3 – Pinagem padrão do conector NMEA 2000 (Micro-C Fêmea).



Fonte: Adaptado de NMEA (SPITZER; LUFT; MORSCHHAUSER, 2009).

2.2.4 Gerenciamento de Rede e Auto-configuração (*Address Claiming*)

Diferente de protocolos industriais onde os endereços são fixos, o NMEA 2000 implementa um sistema de gerenciamento de rede baseado na norma da *International Organization for Standardization* (ISO) 11783-5, que permite a funcionalidade *plug-and-play*. Quando um dispositivo é conectado ao barramento, ele inicia o processo de *Address Claiming* (reivindicação de endereço) (SPITZER; LUFT; MORSCHEHAUSER, 2009). Nesse processo, o dispositivo envia uma mensagem de rede (PGN 060928) contendo um nome único de 64 bits que inclui o código do fabricante e o número de série. Caso ocorra um conflito com outro dispositivo já presente, o protocolo resolve automaticamente a disputa de endereços sem intervenção do usuário, garantindo que o equipamento seja identificado corretamente por qualquer MFD da embarcação (SPITZER; LUFT; MORSCHEHAUSER, 2009).

2.2.5 Robustez e Conformidade em Ambiente Naval

A escolha da camada física do NMEA 2000 foi fundamentada em padrões de alta confiabilidade utilizados em maquinário pesado e agrícola, especificamente as normas ISO 11783-3 e da *Society of Automotive Engineers* (SAE) J1939. Essa herança técnica garante que o sistema suporte as condições severas do ambiente marinho (SPITZER; LUFT; MORSCHEHAUSER, 2009). Além do protocolo de dados, os padrões da NMEA destacam a conformidade com a norma IEC 60945, que estabelece requisitos rigorosos de imunidade a interferências eletromagnéticas, resistência à vibração e proteção contra corrosão salina. Tais requisitos técnicos justificam a importância do isolamento galvânico na interface CAN e o uso de componentes eletrônicos de grau industrial, visando a longevidade do *hardware* sob condições de umidade e calor extremo comuns em casas de máquinas (IEC, 2002).

2.3 SENSORES RESISTIVOS E DINÂMICA DE FLUIDOS

A instrumentação analógica em embarcações baseia-se fortemente em sensores resistivos, valorizados pela sua construção robusta, que assegura uma longa vida útil mesmo quando submetidos a condições extremas e ambientes expostos ao clima marinho. Estes sensores são frequentemente projetados com tubos de medição fabri-

cados em aço inoxidável 304, o que os torna ideais para o monitoramento de fluidos variados, como água e combustível (Continental Corporation, 2022). Para contornar os desafios hidrodinâmicos do meio, o projeto mecânico destes instrumentos é estruturado especificamente para minimizar as variações e tremores nos marcadores de painel causados pela agitação do fluido dentro do tanque.

2.3.1 Princípio de Funcionamento dos Sensores de Nível Legados

Os sensores de nível magnéticos com montagem vertical representam um dos padrões dominantes na indústria, operando primariamente através da tecnologia de interruptores de lâmina magnéticos (*reed switches*). A construção física típica envolve um flutuador que percorre uma haste cilíndrica selada. O acoplamento físico aos reservatórios das embarcações é estabelecido através de flanges de montagem anticorrosão, adotando convencionalmente o padrão SAE de 5 furos acompanhado de junta de vedação. Essa arquitetura assegura um grau de proteção *Ingress Protection* (IP) 67 contra o ingresso de partículas e líquidos (Continental Corporation, 2022).

Imagem 4 – Sensor de nível resistivo em aço inoxidável com tecnologia *reed switch*.



Fonte: Adaptado de Continental Corporation
(Continental Corporation, 2022).

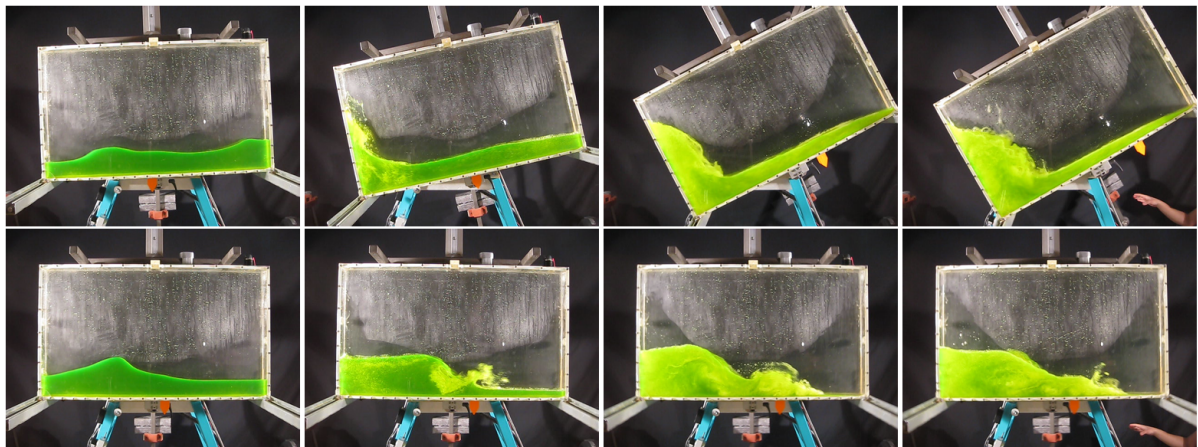
Independentemente do comprimento da haste de medição, que tipicamente varia de 150 mm a 900 mm, a grandeza elétrica de saída é uma resistência elétrica concebida para ser diretamente compatível com medidores de diversos fabricantes (Continental Corporation, 2022). No mercado naval e industrial, predominam escalas resistivas padronizadas, sendo amplamente adotado o perfil onde o tanque vazio apresenta 240 ohms e o tanque cheio 33 ohms. O circuito de conversão e leitura do *gateway* eletrônico deve ser ajustado para interpretar com exatidão a curva de resistência específica do modelo instalado e realizar a correta transposição para o percentual de volume útil.

2.3.2 O Efeito *Sloshing* em Tanques Navais

A principal limitação para a exatidão de medição no monitoramento contínuo de fluidos em embarcações não é atribuída à resolução do sensor, mas sim à variabilidade intrínseca do mensurando sob condições dinâmicas de operação. O desloca-

mento da embarcação sobre as ondas atua como uma forte grandeza de influência, gerando um acoplamento mecânico e interação entre o movimento de oscilação do casco e o fluido interno (BOUSCASSE *et al.*, 2014). As forças de excitação causadas pelas ondas induzem uma elevada instabilidade espacial e temporal na superfície livre do líquido dentro do reservatório, introduzindo componentes de erro dinâmico expressivos devido ao fenômeno hidrodinâmico não linear conhecido como *sloshing* (LEE *et al.*, 2007). A Imagem 5 ilustra o comportamento turbulento e a quebra de ondas na superfície do fluido, fatores que dificultam a determinação de um valor medido representativo devido às flutuações desencadeadas por esse acoplamento.

Imagem 5 – Comportamento dinâmico e turbulento da superfície livre do fluido durante o fenômeno de *sloshing*.



Fonte: Bouscasse et al. Bouscasse *et al.* (2014).

As cargas inerciais geradas por esse fenômeno produzem forças e momentos adicionais que atuam sobre as paredes do tanque e, conseqüentemente, sobre a haste do sensor. Isso provoca variações drásticas e instantâneas na altura da coluna de líquido medida pelo flutuador. Se o sinal de resistência do sensor for amostrado e enviado diretamente para a rede, o instrumento apresentará uma leitura altamente errática, com oscilações que podem variar de 20% a 80% da capacidade em questão de segundos (LEE *et al.*, 2007). Para que qualquer MFD apresente um dado útil e confiável para a gestão da autonomia da embarcação, o sinal elétrico ruidoso gerado pela instabilidade mecânica do sensor deve ser obrigatoriamente condicionado. É neste ponto que a transição de um sistema puramente analógico para uma arquitetura microcontrolada se torna tecnicamente indispensável, permitindo a aplicação de

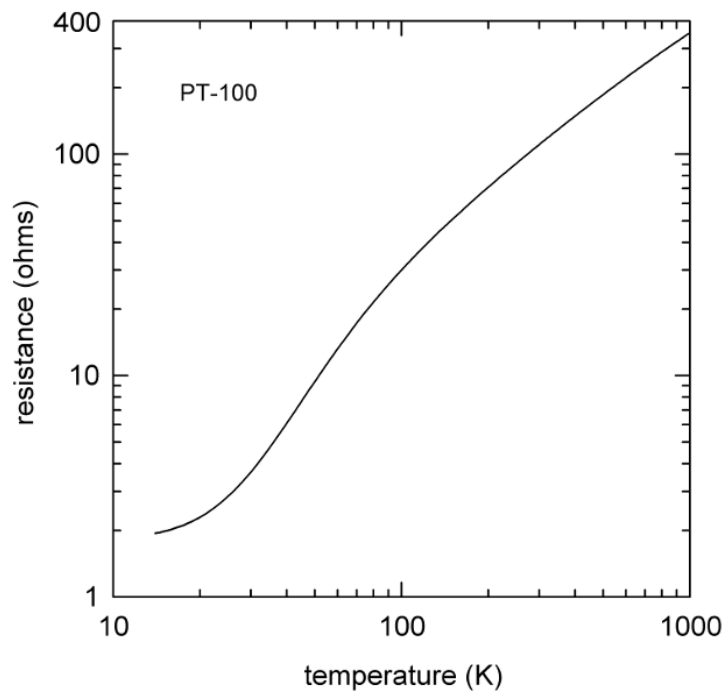
técnicas de Processamento Digital de Sinais.

2.3.3 Sensores Resistivos de Temperatura

No monitoramento de sistemas propulsores e compartimentos de embarcações, a medição de temperatura é um parâmetro crítico para a segurança da navegação e para a integridade dos equipamentos elétricos. De acordo com as diretrizes da norma E-11 do *American Boat and Yacht Council* (ABYC), a temperatura ambiente máxima admissível no interior das praças de máquinas (*engine rooms*) é fixada em 50 °C (American Boat and Yacht Council (ABYC), 2021). Para garantir a conformidade operacional e prevenir falhas térmicas catastróficas, a indústria naval emprega largamente sensores baseados na variação de resistência elétrica em função do calor. Nesta categoria, destacam-se duas tecnologias principais que operam de forma passiva: os termistores e os Termoresistores como por exemplo o PT100.

Os termistores, comumente do tipo *Negative Temperature Coefficient* (NTC), são fabricados a partir de materiais semicondutores. Sua principal característica é a alta sensibilidade térmica, apresentando uma queda acentuada e não linear de resistência elétrica conforme a temperatura ambiente aumenta (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Por outro lado, os sensores do tipo RTD são elaborados com metais puros, sendo o PT100 o padrão industrial mais difundido e robusto. A nomenclatura PT100 indica que o elemento sensor é composto de platina (Pt) e apresenta uma resistência nominal de calibração de exatamente 100 ohms a 0 °C (Lake Shore Cryotronics, 2026). Diferentemente dos termistores, o PT100 possui uma curva de resposta quase linear e um *Positive Temperature Coefficient* (PTC), indicando que sua resistência elétrica aumenta proporcionalmente ao aquecimento (Lake Shore Cryotronics, 2026) como indicado na Imagem 6. A estabilidade físico-química da platina garante leituras de altíssima repetibilidade ao longo dos anos, uma exigência inerente ao regime contínuo da operação naval.

Imagem 6 – Curva de resistência em função da temperatura para o sensor PT100.



Fonte: Lake Shore Cryotronics (Lake Shore Cryotronics, 2026).

Independentemente da tecnologia (NTC ou RTD), a interface de aquisição de dados desses sensores com o conversor analógico-digital (ADC) baseia-se no princípio fundamental do divisor de tensão. Ao inserir os sensores em série com um resistor de referência de valor conhecido (*pull-up* ou *pull-down*), a variação resistiva térmica modula o nível de tensão no pino de leitura do microcontrolador. Esta mesma topologia de circuito elétrico é o que viabiliza a implementação de algoritmos de diagnóstico de falhas no *gateway*. Como o divisor de tensão opera em limites conhecidos, o *software* pode ser projetado para interpretar níveis de tensão extremos no conversor analógico-digital (ADC) indicando anomalias no barramento físico, como a ausência de conexão do sensor (identificada como circuito aberto) ou eventuais curto-circuitos, permitindo que o sistema atue de forma inteligente e adaptativa.

2.4 MICROCONTROLADORES E TRATAMENTO DIGITAL DE SINAIS

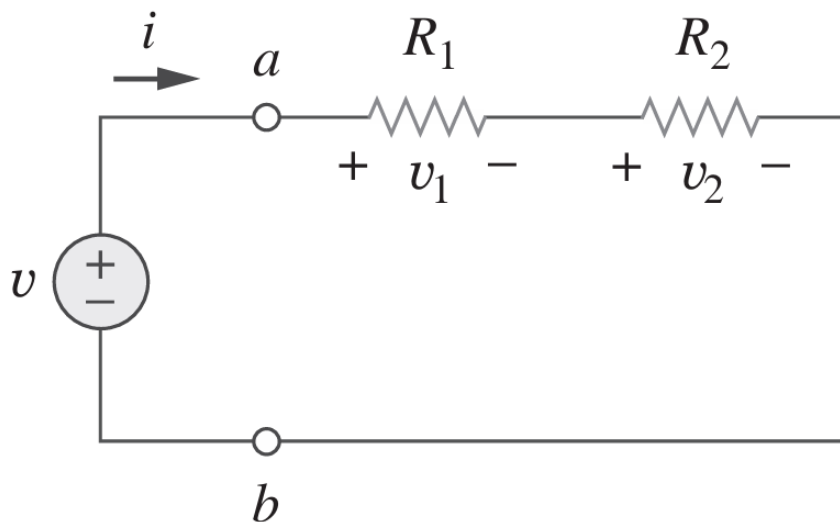
A modernização da instrumentação naval exige a conversão de grandezas físicas analógicas em pacotes de dados digitais padronizados. Este processo é realizado

por microcontroladores equipados com aquisição de dados e algoritmos de processamento que garantem a estabilidade da informação.

2.4.1 Conversão Analógico-Digital (ADC)

O primeiro estágio do tratamento de sinal consiste na conversão da variação de resistência do sensor em um valor digital. Como o microcontrolador não mede resistência elétrica diretamente, utiliza-se um circuito divisor de tensão. Segundo Alexander e Sadiku (2013), o princípio do divisor de tensão estabelece que a tensão sobre um resistor em um circuito série é diretamente proporcional ao valor da sua resistência. A Imagem 7 ilustra o modelo clássico de um circuito divisor de tensão com dois resistores, onde uma tensão de entrada (v) é dividida entre R_1 e R_2 .

Imagem 7 – Circuito divisor de tensão genérico.



Fonte: Adaptado de Alexander e Sadiku (2013, p. 29).

A equação que descreve a tensão resultante v_2 sobre o resistor R_2 é demonstrada pela Equação 1:

$$v_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v \quad (1)$$

No escopo deste projeto, a cadeia de medição é configurada integrando ao circuito um transdutor de medição resistivo — o sensor de nível (flutuador). Dessa

forma, a variação do mensurando é convertida em um sinal de medição analógico, na forma de uma tensão elétrica proporcional (v_2), devidamente condicionada para situar-se dentro da faixa nominal de operação do *hardware*. O conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador realiza a amostragem desse sinal, quantizando-o em valores discretos. A resolução do ADC é fundamental para mitigar a incerteza devido à quantização no sistema de medição; no caso do microcontrolador ESP32, o dispositivo possui uma resolução de 12 bits, o que divide o intervalo de medição da tensão em 2^{12} (4096) indicações distinguíveis (Espressif Systems, 2024). No contexto náutico, essa especificação metrológica confere ao sistema um limiar de discriminação adequado para detectar as pequenas variações no nível de combustível, preparando a indicação bruta para o subsequente processamento e tratamento matemático na etapa de filtragem lógica.

2.4.2 Filtro Digital de Média Móvel

Para mitigar o comportamento errático do sensor causado pelo efeito *sloshing*, é necessário aplicar uma técnica de suavização de sinais. Segundo Smith (1997), o filtro de média móvel é uma das ferramentas de Processamento Digital de Sinais (DSP) mais comuns e eficazes para a redução de ruídos aleatórios, operando de forma excepcional no domínio do tempo. No contexto deste trabalho, ele atua como um filtro passa-baixas ideal para atenuar as flutuações indesejadas e manter a leitura do nível do tanque estável.

Matematicamente, a média móvel simples operando em um sistema causal (calculada em tempo real) é definida pela Equação 2 (SMITH, 1997):

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k] \quad (2)$$

Onde:

- $y[n]$ é o valor do sinal de saída (filtrado) no instante atual;
- $x[n - k]$ representa as amostras do sinal de entrada (bruto) armazenadas;
- M é o número de pontos ou o tamanho da janela do filtro.

Ao implementar este filtro no *firmware*, o microcontrolador armazena um histórico de leituras do ADC em um *buffer* circular. A cada nova conversão, o valor mais antigo armazenado na memória é descartado para dar lugar à amostra recente, e a equação é recalculada. O resultado é um atraso proposital na resposta de variação, que filtra os picos instantâneos gerados pelo balanço da embarcação e transmite ao barramento NMEA 2000 um volume fidedigno e visualmente estável para o usuário.

3 METODOLOGIA

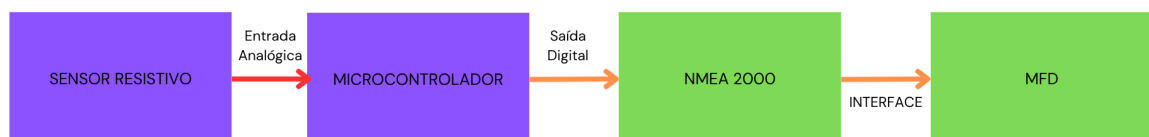
Este capítulo descreve os materiais, as ferramentas e os procedimentos técnicos adotados para o desenvolvimento do *gateway* NMEA 2000. A pesquisa classifica-se como aplicada e de natureza metodológica com caráter experimental, uma vez que culmina no projeto, construção e validação de uma Prova de Conceito (PoC) baseada em microcontrolador.

A metodologia está dividida na definição da arquitetura, no projeto de *hardware*, no desenvolvimento da lógica de *firmware* e no protocolo de testes elaborado para validar a integração do dispositivo com o barramento de dados.

3.1 ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA

O sistema proposto atua como um tradutor intermediário entre o domínio analógico dos sensores legados e a rede digital da embarcação. A arquitetura foi concebida de forma modular, visando a estabilidade da leitura e a compatibilidade elétrica com as normas navais. A Imagem 8 ilustra a arquitetura geral do sistema e o fluxo de dados desde o sensor físico até o barramento.

Imagem 8 – Diagrama de blocos da arquitetura do *gateway*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O fluxo de dados no *gateway* percorre três estágios principais de conversão:

1. **Condicionamento de Sinal:** A variação resistiva do sensor de nível (flutuador) é convertida em um sinal de tensão através de um circuito divisor de tensão, limitando a amplitude do sinal à faixa de operação segura das portas de entrada do microcontrolador.
2. **Processamento e Filtragem Digital:** O microcontrolador realiza a conversão analógico-digital (ADC) desta tensão. Em seguida, o *firmware* aplica o filtro de

média móvel para atenuar o ruído gerado pelo efeito *sloshing* e mapeia o valor estabilizado para um percentual de volume (0% a 100%).

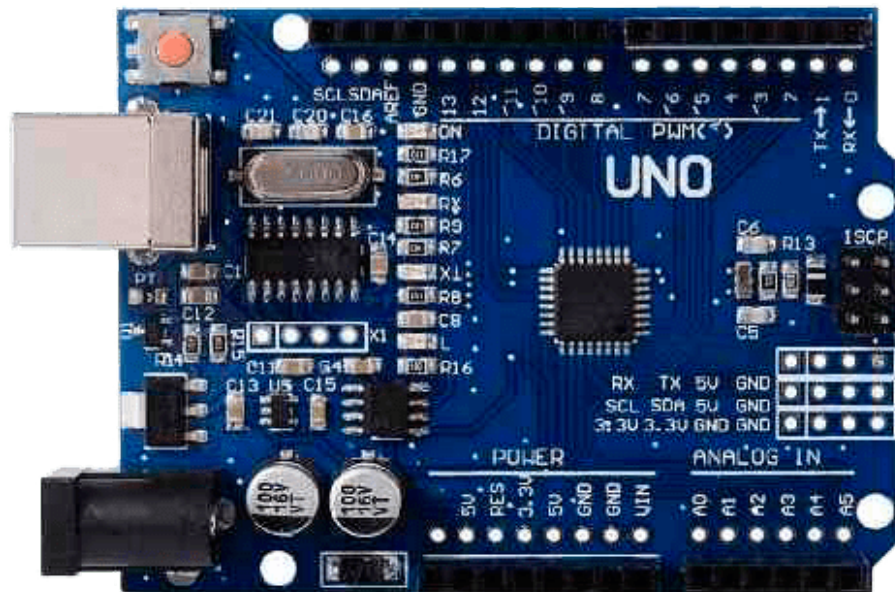
3. **Interface de Comunicação (CAN):** O dado processado é encapsulado em uma mensagem padronizada do protocolo NMEA 2000, especificamente o PGN 127505 (*Fluid Level*), e enviado ao controlador CAN interno. Um transceptor CAN de *hardware* assume a função de converter os níveis lógicos do microcontrolador para os sinais elétricos diferenciais (CANH e CANL) exigidos pelo barramento físico da embarcação.

3.1.1 Seleção do Microcontrolador

A aplicação demanda um microcontrolador capaz de realizar leituras analógicas precisas, executar o algoritmo de filtragem digital continuamente e gerenciar a pilha do protocolo NMEA 2000 simultaneamente. Três arquiteturas de microcontroladores comumente utilizadas em prototipagem eletrônica foram avaliadas. As especificações individuais de cada componente, extraídas diretamente de seus respectivos manuais técnicos oficiais (Microchip Technology Inc., 2015; STMicroelectronics, 2015; Espressif Systems, 2024), estão detalhadas nos Quadros 3, 4 e 5.

- **ATmega328P (Família Arduino Uno):** Com arquitetura de 8 bits e ADC de 10 bits (disponibilizando de 6 a 8 canais de leitura, dependendo do encapsulamento), é a opção de entrada mais popular na academia. No entanto, não possui um controlador CAN nativo, exigindo um módulo externo (como o MCP2515 via interface SPI), o que aumenta a complexidade do circuito e introduz latência. Além disso, a memória RAM limitada apresenta gargalos severos para lidar com os *buffers* de mensagens exigidos pela biblioteca do protocolo.

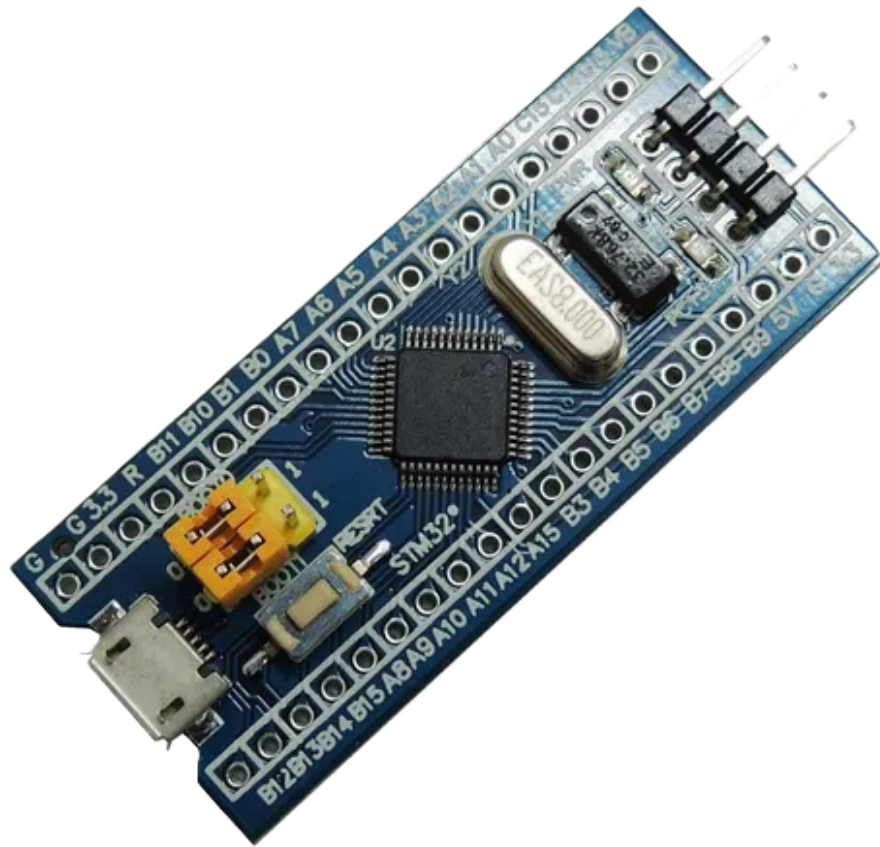
Imagem 9 – Microcontrolador ATmega328P em placa de desenvolvimento.



Fonte: Microchip Technology Inc. (2015).

- **Família STM32 (ex: STM32F103C8T6):** Baseada em arquitetura *Advanced RISC Machine* (ARM) Cortex-M3 de 32 bits, oferece excelente poder computacional, conversor ADC nativo de 12 bits com 10 canais disponíveis e um controlador CAN de *hardware* integrado. Contudo, a curva de aprendizado e a configuração do *toolchain* de desenvolvimento são mais complexas, prolongando o tempo de desenvolvimento para uma PoC inicial.

Imagem 10 – Placa de desenvolvimento baseada no STM32F103C8T6.



Fonte: STMicroelectronics (2015).

- **ESP32 (Espressif Systems):** Um *System on a Chip* (SoC) dual-core de 32 bits que conta com dois conversores ADC de 12 bits, totalizando até 18 canais de leitura multiplexados (Espressif Systems, 2024), e um controlador CAN 2.0B nativo, denominado pela fabricante como *Two-Wire Automotive Interface* (TWAI).

Imagem 11 – Módulo de desenvolvimento ESP32.



Fonte: Espressif Systems (2024).

Quadro 3 – Especificações técnicas do microcontrolador ATmega328P (Microchip Technology Inc., 2015).

Característica	Especificação
Arquitetura	8 bits (AVR)
Clock (Velocidade)	16 MHz
Memória RAM	2 KB
Memória Flash	32 KB
Resolução do ADC	10 bits
Canais ADC	6 a 8 canais
Controlador CAN	Necessita módulo externo (SPI)
Tensão Lógica	5 V

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro 4 – Especificações técnicas do microcontrolador STM32F103C8T6 (STMicroelectronics, 2015).

Característica	Especificação
Arquitetura	32 bits (ARM Cortex-M3)
Clock (Velocidade)	72 MHz
Memória RAM	20 KB
Memória Flash	64 KB
Resolução do ADC	12 bits
Canais ADC	10 canais
Controlador CAN	Integrado (Hardware)
Tensão Lógica	3,3 V

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quadro 5 – Especificações técnicas do microcontrolador ESP32 (Espressif Systems, 2024).

Característica	Especificação
Arquitetura	32 bits (Xtensa Dual-Core)
Clock (Velocidade)	Até 240 MHz
Memória RAM	520 KB
Memória Flash	4 MB (Típico)
Resolução do ADC	12 bits
Canais ADC	Até 18 canais
Controlador CAN	Integrado (TWAI)
Tensão Lógica	3,3 V

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para consolidar a análise e definir a escolha final, o Quadro 6 destaca qual dos microcontroladores apresenta a melhor adequação ou recurso nativo para cada característica fundamental exigida pelo projeto do *gateway*.

Quadro 6 – Comparativo de adequação técnica por requisito do projeto.

Requisito do Projeto	ATmega328P	STM32	ESP32
Maior Poder de Processamento			X
Maior Capacidade de Memória			X
Quantidade de bits do Conversor (ADC)		X	X
Maior Quantidade de Canais ADC			X
Controlador CAN Integrado		X	X
Facilidade de Prototipagem (PoC)	X		X

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

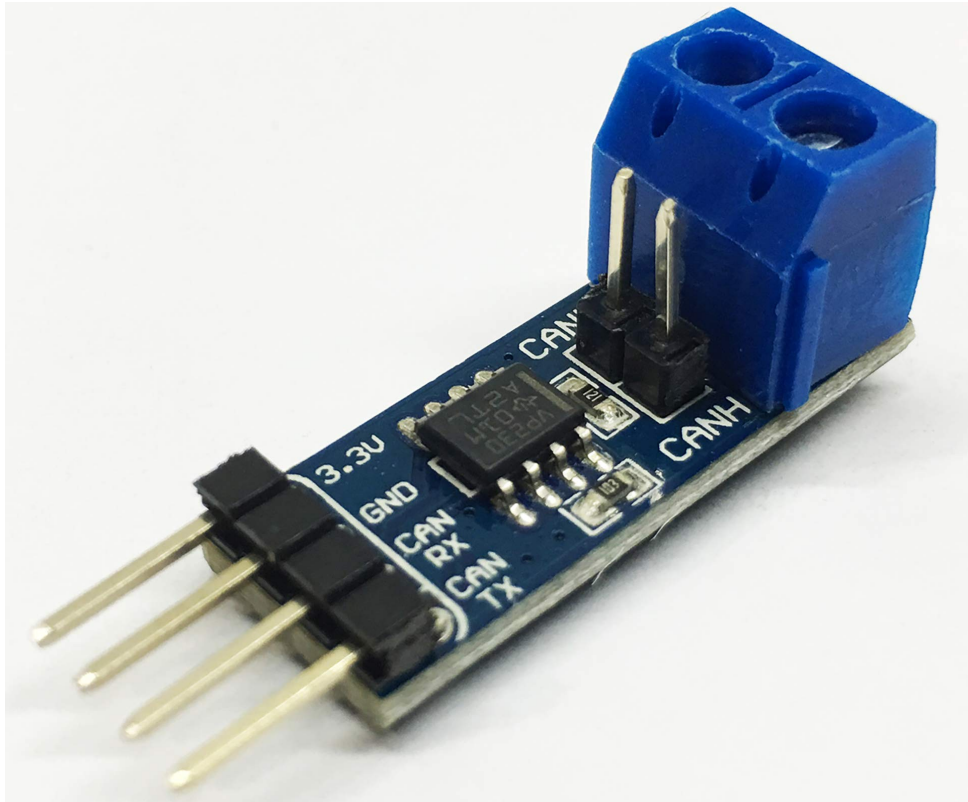
Para a construção e validação experimental deste trabalho, o ESP32 foi o dispositivo selecionado. Como evidenciado no comparativo, ele reúne o maior poder computacional e uma vasta quantidade de memória, eliminando o risco de estrangulamento (*bottleneck*) no processamento de *buffers* da biblioteca NMEA 2000. Além disso, a disponibilidade de 18 canais ADC viabiliza a escalabilidade futura do sistema para o monitoramento simultâneo de múltiplos reservatórios. O controlador CAN embutido no próprio silício minimiza a contagem de componentes externos, enquanto a farta documentação comunitária mantém a facilidade de desenvolvimento necessária para uma Prova de Conceito.

3.1.2 Seleção do Transceptor CAN

Embora o microcontrolador selecionado possua o controlador lógico da rede (responsável pela montagem dos *frames* e verificação de erros), os seus pinos de saída operam em níveis lógicos TTL de 3,3 V. O barramento NMEA 2000, por sua vez, exige sinais diferenciais (*CAN High* e *CAN Low*) robustos. Logo, um Circuito Integrado (CI) transceptor é estritamente necessário para atuar como a interface física. Foram avaliadas duas opções de mercado:

- **SN65HVD230 (Texas Instruments) (Texas Instruments, 2018):** Um transceptor alimentado diretamente em 3,3 V, ideal para conexão direta com os pinos lógicos do ESP32 sem a necessidade de conversores de nível lógico adicionais. É um componente de baixo custo e comercializado em módulos de fácil encaixe em matrizes de contato (*protoboards*). A sua principal limitação para o ambiente naval é a ausência de isolamento galvânico.

Imagem 12 – Módulo transceptor CAN baseado no CI SN65HVD230.



Fonte: Texas Instruments (2018)

- **ISO1050 (Texas Instruments) (Texas Instruments, 2020):** Um transceptor CAN com barreira de isolamento galvânico. É a escolha tecnicamente adequada para cumprir integralmente os requisitos de imunidade a ruídos e proteção contra laços de terra, conforme preconizado pela norma naval IEC 60945 (IEC, 2002).

Imagem 13 – Transceptor CAN isolado ISO1050.



Fonte: Texas Instruments (2020)

Considerando que o escopo deste trabalho consiste na validação lógica e na prova de funcionamento da comunicação em um ambiente de bancada, optou-se pela utilização do módulo baseado no CI SN65HVD230. Essa escolha permite a comprovação prática da leitura e envio de dados para o *display* mantendo o custo e a complexidade de montagem do protótipo extremamente baixos. A adoção de um componente isolado fica delineada como uma exigência técnica para uma futura evolução comercial do circuito impresso.

3.2 PROJETO E ESQUEMÁTICO ELÉTRICO

O estágio de aquisição de dados é responsável por traduzir a grandeza física do reservatório em uma grandeza elétrica interpretável pelo microcontrolador. O projeto elétrico do *gateway* deve garantir que a tensão aplicada ao pino do conversor

analógico-digital (ADC) do ESP32 respeite os limites operacionais do componente, que suporta um nível lógico máximo de 3,3 V (Espressif Systems, 2024).

3.2.1 Dimensionamento do Divisor de Tensão

A interface com o flutuador resistivo foi concebida utilizando um circuito divisor de tensão modificado. O sensor de nível no interior do tanque atua como o resistor ligado ao terra (R_2) do circuito, enquanto um resistor fixo de *pull-up* (R_1) é conectado internamente entre o pino do ADC e a alimentação estabilizada de 3,3 V.

A definição do valor de R_1 exige a análise dos padrões resistivos de mercado descritos na fundamentação teórica. O sistema deve ser capaz de ler tanto o padrão Americano (240 Ω vazio a 33 Ω cheio) quanto o padrão Europeu (10 Ω vazio a 180 Ω cheio). O valor comercial de $R_1 = 220 \Omega$ foi escolhido para o projeto, pois garante uma margem de segurança e proporciona uma amplitude de variação de tensão (*voltage swing*) ideal para a resolução do ADC do ESP32. Aplicando a equação do divisor de tensão (ALEXANDER; SADIKU, 2013, p. 39) para o padrão Americano, onde a tensão de entrada é de 3,3 V e $R_1 = 220 \Omega$, as tensões resultantes (V_{adc}) nos extremos do tanque são:

- **Tanque Vazio (240 Ω):** $V_{adc} = 3,3 \cdot \frac{240}{220+240} \approx 1,72 \text{ V}$
- **Tanque Cheio (33 Ω):** $V_{adc} = 3,3 \cdot \frac{33}{220+33} \approx 0,43 \text{ V}$

Para o padrão Europeu, o comportamento analógico inverso é esperado:

- **Tanque Vazio (10 Ω):** $V_{adc} = 3,3 \cdot \frac{10}{220+10} \approx 0,14 \text{ V}$
- **Tanque Cheio (180 Ω):** $V_{adc} = 3,3 \cdot \frac{180}{220+180} \approx 1,48 \text{ V}$

Estes cálculos evidenciam que a tensão lida pelo pino do microcontrolador fluirá em uma janela segura (entre 0,14 V e 1,72 V). Além de assegurar a tensão adequada, é imprescindível garantir que a corrente elétrica exigida pelo circuito divisor não exceda a capacidade de fornecimento de corrente do *hardware*. Segundo o manual do fabricante, a corrente máxima de saída (*source current*) suportada por um pino GPIO do ESP32 é de 40 mA (Espressif Systems, 2024). A corrente total (I) do circuito série é calculada pela Lei de Ohm (ALEXANDER; SADIKU, 2013), conforme a

Equação 3:

$$I = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

O cenário mais crítico, que resulta na maior drenagem de corrente, ocorre quando a resistência atinge o seu valor mínimo. Dentre os modelos avaliados, o caso extremo é o padrão Europeu com o tanque vazio ($R_2 = 10 \, \Omega$). Calculando a corrente máxima para esta condição:

$$I_{max} = \frac{3,3}{220 + 10} = \frac{3,3}{230} \approx 0,01435 \, A = 14,35 \, mA \quad (4)$$

Os resultados comprovam que, mesmo na condição de menor resistência do flutuador, o circuito drenará no máximo 14,35 mA. Esse valor consome apenas cerca de 35% do limite máximo (40 mA) estipulado pela Espressif, garantindo que o *gateway* operará com robusta folga térmica e elétrica, imunizando o microcontrolador contra danos físicos por sobrecarga.

3.2.2 Proteção de Hardware e Pinagem da Interface CAN

Além do circuito de medição, o esquemático elétrico do protótipo integra o módulo transceptor SN65HVD230 (Texas Instruments, 2018). Para garantir o funcionamento estável do sistema e evitar conflitos internos de *hardware*, a atribuição dos pinos (*pinout*) do ESP32 foi cuidadosamente definida.

Para a leitura da variação de tensão do divisor resistivo, selecionou-se o pino *General Purpose Input/Output* (GPIO) 34. Este pino é nativamente exclusivo para entrada (*input-only*) e pertence ao canal 6 do conversor ADC1 do microcontrolador. A escolha do ADC1 é uma prática recomendada de projeto, pois ele mantém a integridade da leitura analógica independentemente da ativação futura de periféricos de rádio frequência (Wi-Fi ou Bluetooth).

Para a comunicação com o transceptor CAN, os pinos de transmissão e recepção lógicas do controlador TWAI do ESP32 foram roteados para os pinos GPIO 5 (*Transmitter* - TX) e GPIO 4 (*Receiver* - RX). O Quadro 7 detalha o mapa de conexões físicas internas do *gateway*.

Quadro 7 – Mapa de pinagem e conexões físicas do circuito protótipo.

Pino ESP32	Destino Físico	Função
3V3	Divisor (R_1) e SN65HVD230 (VCC)	Alimentação (3,3 V)
GND	Boia (R_2) e SN65HVD230 (GND)	Referência (Terra)
GPIO 34	Saída do Divisor de Tensão	Leitura Analógica
GPIO 5	Módulo SN65HVD230 (TXD)	Transmissão CAN
GPIO 4	Módulo SN65HVD230 (RXD)	Recepção CAN

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Para a integração física do circuito isolado com o barramento da embarcação, o projeto adota a interface de conexão do protocolo naval, implementada através de um terminal externo do tipo Micro-C de 5 pinos. A fiação de saída do circuito foi roteada respeitando a padronização oficial de pinagem detalhada na fundamentação teórica deste trabalho.

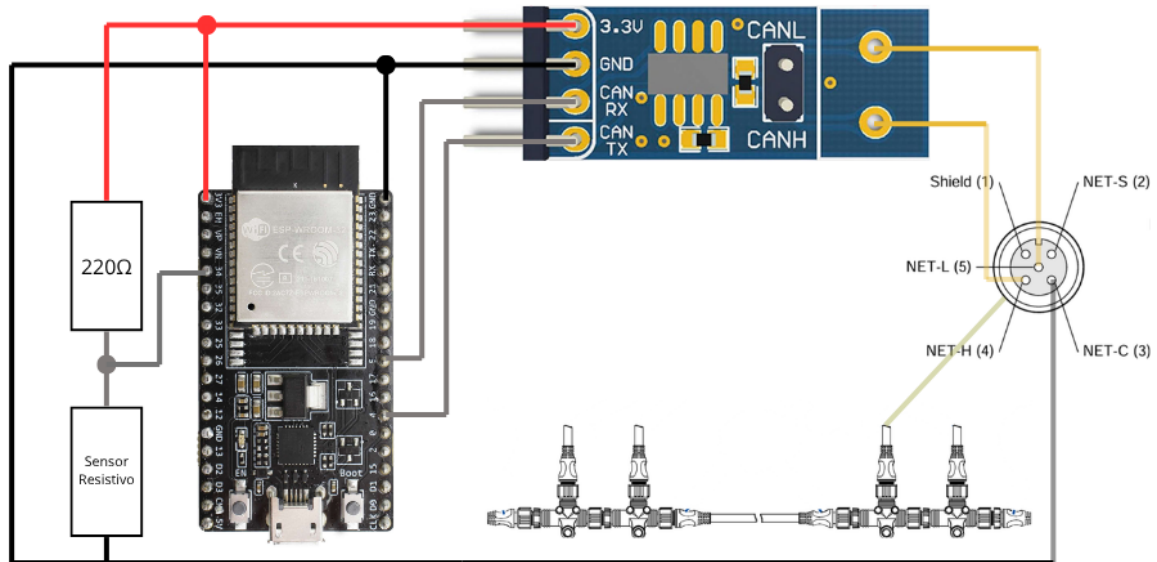
Desta forma, os sinais diferenciais oriundos do transceptor SN65HVD230 foram acoplados diretamente aos terminais correspondentes a CAN High e CAN Low do conector, enquanto as malhas de aterramento e isolamento galvânico foram devidamente respeitadas, garantindo que o *gateway* opere como um dispositivo do tipo *plug-and-play*, eletricamente e mecanicamente compatível com qualquer MFD comercial.

Nesta configuração, as saídas diferenciais do transceptor SN65HVD230 (CANH e CANL) são conectadas fisicamente aos pinos NET-H (pino 4) e NET-L (pino 5) do conector NMEA 2000, respectivamente. O pino NET-C (pino 3) deve compartilhar a mesma referência de terra (GND) do circuito eletrônico do *gateway* para equalizar os potenciais. O pino NET-S (pino 2) carrega a alimentação de 12 V nativa do barramento, a qual pode ser utilizada em futuras iterações da placa de circuito impresso para alimentar o próprio ESP32 através de um regulador de tensão abaixador (*buck converter*). O pino de blindagem (*Shield*, pino 1) permanece conectado à malha metálica do cabo para garantir a imunidade contra ruídos eletromagnéticos no ambiente naval.

A Imagem 14 apresenta o diagrama elétrico completo da solução, integrando as medições analógicas, os módulos lógicos e a saída para o conector do barramento.

O circuito foi projetado para montagem inicial em matriz de contatos (*proto-board*), visando facilitar os testes durante a validação da Prova de Conceito.

Imagem 14 – Esquemático elétrico e de pinagem do *gateway* NMEA 2000.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

3.3 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

O *firmware* embarcado no microcontrolador atua como o núcleo operacional do *gateway*, sendo responsável por orquestrar a aquisição analógica, o processamento matemático, a formatação dos dados para o padrão da rede NMEA 2000 e por fim a transmissão desses dados a rede.

3.3.1 Ambiente de Desenvolvimento e Bibliotecas

A programação do ESP32 foi realizada na linguagem C++, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do Arduino. A escolha por essa plataforma justifica-se pela vasta disponibilidade de bibliotecas consolidadas para controle de periféricos de rede e pela facilidade de compilação do código para a arquitetura do microcontrolador.

Para a implementação da pilha de comunicação (*stack*) do protocolo naval, a arquitetura de *software* foi dividida em duas camadas, utilizando o conjunto de bibliotecas de código aberto desenvolvidas por Timo Lappalainen. A primeira camada é

composta pela biblioteca principal NMEA2000 (LAPPALAINEN, 2026a), que atua de forma independente de *hardware*. Ela é a responsável por toda a lógica de encapsulamento, gerenciamento de mensagens multipacote (*Fast Packet*) e formatação das estruturas de dados exigidas pelas normas da NMEA.

A segunda camada atua como uma interface de adaptação (*hardware wrapper*). Como a biblioteca principal é agnóstica em relação ao microcontrolador, utilizou-se a extensão complementar NMEA2000_esp32 (LAPPALAINEN, 2026b). A função exclusiva desta extensão é traduzir as requisições lógicas da biblioteca principal em comandos de baixo nível compreensíveis pelo controlador TWAI nativo do ESP32, permitindo o acionamento físico dos pinos de transmissão e recepção conectados ao transceptor SN65HVD230.

3.3.2 Lógica de Aquisição e Autodetecção de Sensores

Para viabilizar a escalabilidade do *gateway* e permitir o monitoramento simultâneo de múltiplos compartimentos e reservatórios, o *firmware* foi estruturado para realizar a varredura sequencial dos canais do conversor analógico-digital (ADC) do ESP32. O microcontrolador executa a leitura em bloco, iterando sobre um vetor de pinos predefinidos no código. Para cada canal ativo, o sinal bruto capturado passa imediatamente pela rotina do filtro de média móvel, atenuando as oscilações mecânicas do fluido antes de qualquer conversão matemática.

Um dos requisitos fundamentais implementados no algoritmo foi a capacidade de autodetecção de transdutores, conferindo ao protótipo uma característica *plug-and-play*. Como os sensores resistivos (boias de combustível e termômetros PT100) são condicionados em circuitos do tipo divisor de tensão, a ausência de um sensor (circuito aberto) ou um rompimento no cabeamento faz com que a tensão no pino do microcontrolador seja ancorada no limite máximo ou mínimo da referência, dependendo do arranjo do resistor de *pull-up* ou *pull-down*.

No *software*, essa característica elétrica é tratada através de janelas de validação. O conversor ADC de 12 bits do ESP32 retorna valores inteiros entre 0 e 4095. O algoritmo estabelece limites operacionais de tolerância (por exemplo, ignorando leituras estáticas inferiores a 50 ou superiores a 4000). Se a leitura estabilizada de um canal permanecer fora dessa janela de validação por um tempo predeterminado, o

sistema identifica aquele nó como desconectado ou em estado de falha.

Essa inteligência embarcada otimiza drasticamente o tráfego de dados na rede CAN da embarcação. Ao identificar que um canal de temperatura ou de nível não possui um sensor fisicamente acoplado, o *gateway* suspende automaticamente a montagem e a transmissão em *broadcast* do respectivo PGN no barramento NMEA 2000. Isso evita o congestionamento da rede com pacotes de dados nulos ou erráticos, garantindo que os MFDs processem apenas informações úteis e ativas.

3.3.3 Lógica de Programação e Filtragem Digital

A arquitetura do *firmware* foi concebida para operar de forma contínua e não bloqueante. O laço principal de execução (*loop*) evita rigorosamente a utilização de funções de atraso (*delay*), baseando-se no monitoramento do relógio interno do microcontrolador (através da função *millis*). Essa abordagem garante que a biblioteca NMEA 2000 possa processar a pilha de rede de forma ininterrupta, despachando os dados em intervalos regulares sem perder pacotes oriundos de outros dispositivos no barramento.

Com a premissa de escalabilidade para múltiplos reservatórios e termômetros (como o PT100), o processo de aquisição foi reestruturado para varrer um vetor de pinos ADC. O tratamento de dados opera em quatro etapas lógicas sequenciais, cujo núcleo de processamento pode ser observado na Imagem 15.

1. Varredura e Autodetecção: O conversor analógico-digital (ADC) itera sobre os pinos configurados. Antes de qualquer cálculo, o sistema verifica se o valor bruto lido (0 a 4095) encontra-se dentro de uma janela de operação válida (excluindo os extremos de circuito aberto ou curto-circuito). Se o valor indicar que não há sensor físico conectado àquele terminal, o *gateway* sinaliza o canal como inativo, poupando processamento.
2. *Filtragem Digital Independente*: Para os canais detectados como ativos, o algoritmo aplica um filtro de média móvel para mitigar as flutuações severas causadas pelo *sloshing* do combustível. O sistema utiliza matrizes para gerenciar *buffers* circulares individuais para cada canal. A cada ciclo, a amostra mais antiga do ca-

nal respectivo é substituída pela nova leitura, calculando-se a média aritmética do conjunto.

3. Mapeamento Dinâmico: O valor estabilizado na saída do filtro é submetido a uma interpolação matemática (*map*). Dependendo da configuração do canal, os limites resistivos brutos são convertidos em escala percentual (0% a 100% para nível) ou em graus Celsius (para os sensores PT100). Uma função de restrição (*constrain*) assegura que desvios mecânicos não resultem em dados negativos ou anômalos.

Imagem 15 – Trecho da função de autotecção e filtragem para múltiplos canais.

```

1 double processarCanalFiltrado(int canalIndex, int pinoADC) {
2     int leituraBruta = analogRead(pinoADC);
3
4     // 1. Logica de Autodeteccao (Circuito aberto ou curto)
5     if (leituraBruta < ADC_MIN_VALIDO || leituraBruta > ADC_MAX_VALIDO)
6     {
7         statusSensor[canalIndex] = DESCONECTADO;
8         return 0.0; // Ignora o ruido de portas vazias
9     }
10    statusSensor[canalIndex] = CONECTADO;
11
12    // 2. Filtro de Media Movel Circular
13    totalLeituras[canalIndex] -= leituras[canalIndex][indice[canalIndex]];
14    leituras[canalIndex][indice[canalIndex]] = leituraBruta;
15    totalLeituras[canalIndex] += leituras[canalIndex][indice[canalIndex]];
16
17    indice[canalIndex]++;
18    if (indice[canalIndex] >= TAMANHO_FILTRO) {
19        indice[canalIndex] = 0;
20    }
21
22    int mediaAdc = totalLeituras[canalIndex] / TAMANHO_FILTRO;
23
24    // Retorna a media estabilizada para a funcao de mapeamento
25    return (double)mediaAdc;
26 }
```

4. Encapsulamento dos dados e Transmissão Seletiva: A etapa final verifica o vetor de *status* de cada canal. Se o sensor estiver ativo, o dado calculado é encapsulado na estrutura PGN apropriada — como o PGN 127505 (*Fluid Level*) para os tanques ou o PGN 130312 (*Temperature*) para a praça de máquinas. A estrutura é submetida ao controlador TWAI do ESP32 para despacho. Canais inativos são ignorados na transmissão, evitando o envio de pacotes lixo (*garbage data*) para a rede da embarcação.

O código-fonte completo do *firmware*, contendo todas as declarações de variáveis (incluindo as matrizes de leitura), importação de bibliotecas e rotinas de configuração (*setup*), encontra-se integralmente transcrito no Apêndice A deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

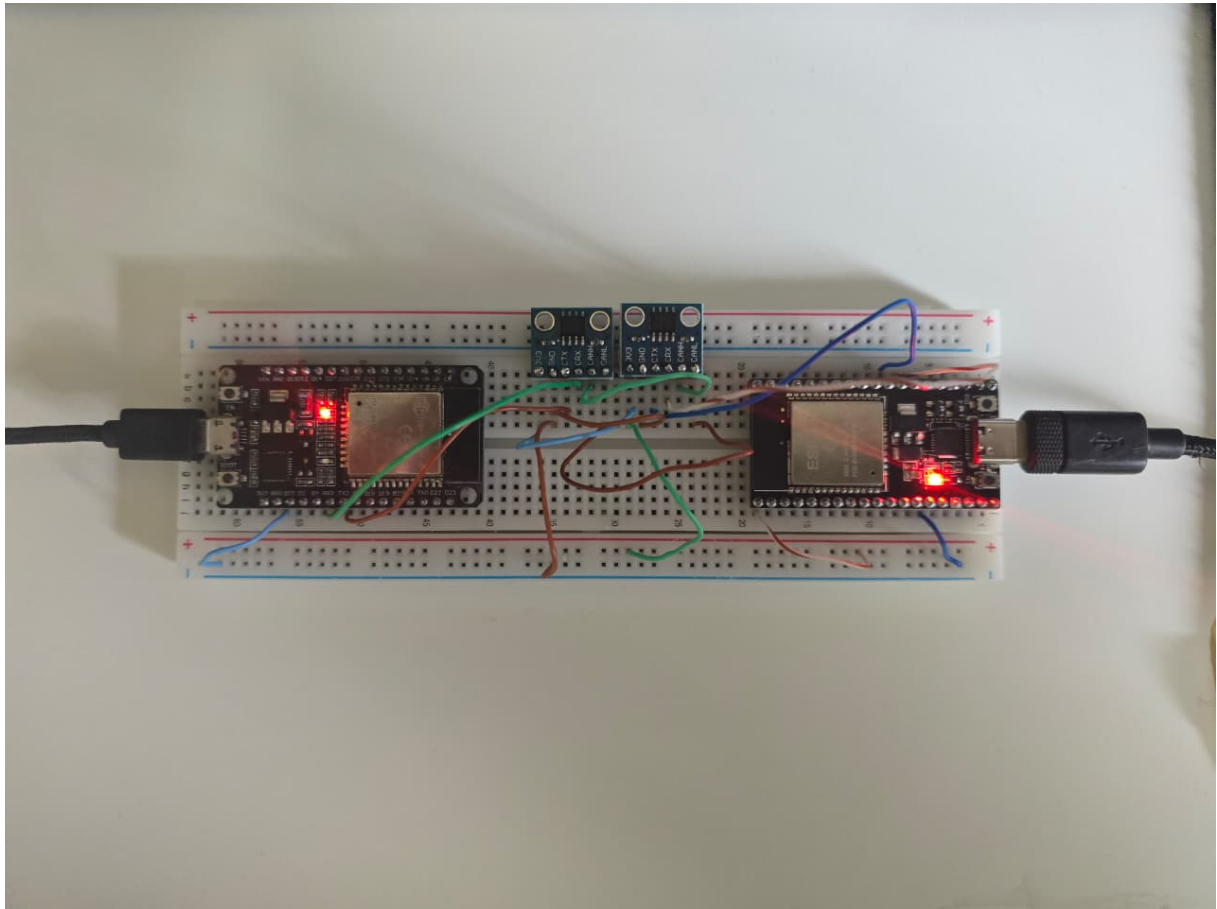
4.1 VALIDAÇÃO DA CAMADA DE COMUNICAÇÃO NMEA 2000

Antes de integrar o condicionamento de sinais analógicos, fez-se necessário validar a robustez da rede CAN e a conformidade lógica do protocolo NMEA 2000. Para isso, estruturou-se uma bancada de testes física composta por dois microcontroladores ESP32, atuando em papéis distintos no barramento:

- **Nó Transmissor (Simulador do Gateway):** Configurado para reivindicar um endereço na rede e publicar, a cada 5 segundos, valores simulados de nível de tanque utilizando o PGN 127505 (*Fluid Level*). O dispositivo foi parametrizado para responder a requisições de identificação com o nome de fabricante “Nautronix Gateway”.
- **Nó Receptor (Simulador de MFD):** Programado para monitorar passivamente o barramento. Ao detectar o PGN de combustível oriundo de um dispositivo não mapeado, este nó foi instruído a enviar ativamente um *ISO Request* (PGN 59904) exigindo as informações do produto (PGN 126996).

A integração elétrica entre os nós foi realizada através de módulos transceptores SN65HVD230. O barramento diferencial (CANH e CANL) foi devidamente terminado com resistores de $120\ \Omega$ nas extremidades e os aterramentos foram equipotencializados, em estrita conformidade com as exigências da camada física do protocolo abordadas na fundamentação teórica. A Imagem 16 ilustra a montagem experimental da PoC estruturada para esta validação.

Imagem 16 – Montagem experimental da Prova de Conceito para validação da comunicação NMEA 2000.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.1 Resultados da Troca de Dados e Descoberta de Rede

Ao energizar a bancada de ensaios simultaneamente, observou-se a correta inicialização do protocolo de autoconfiguração. Ambos os nós transmitiram com sucesso o PGN 60928 (*ISO Address Claim*), negociando e assumindo endereços distintos sem ocorrência de conflitos ou acionamento do estado de segurança do controlador (*Bus-Off*).

No escopo da transmissão de dados, o nó receptor identificou o pacote de nível de fluido e executou a rotina de interrogação com êxito. O nó transmissor, ao receber o *ISO Request*, respondeu na mesma fração de segundo com o seu PGN de identificação de produto (PGN 126996).

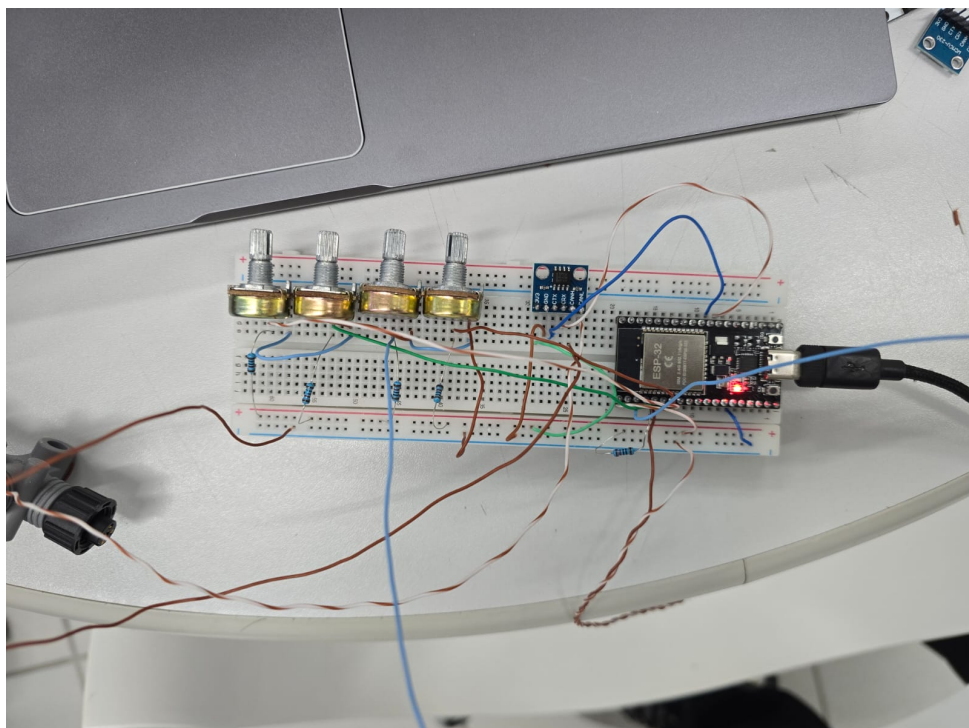
A confirmação de leitura (*ACK*) cruzada entre as placas atestou que a topologia eletrônica e a configuração de temporização da biblioteca de software estão homolo-

gadas para o ambiente naval. Com a infraestrutura de dados devidamente validada em rede de bancada, o sistema encontra-se apto para a etapa subsequente: a substituição da geração de dados aleatórios pelas leituras físicas oriundas do circuito condicionador de sinais e a validação em um MFD comercial.

4.2 INTEGRAÇÃO FINAL DO HARDWARE E LEITURA ANALÓGICA MÚLTIPLA

Ultrapassada a fase de validação da comunicação de rede, a arquitetura do protótipo foi expandida para a sua topologia definitiva. O objetivo desta etapa consistiu em substituir os dados simulados via *software* pela aquisição real e simultânea de cinco grandezas físicas essenciais para a navegação: dois tanques de combustível, um tanque de água doce, um tanque de águas cinzas e a temperatura da praça de máquinas. A Imagem 17 ilustra a montagem física completa do protótipo integrado aos divisores de tensão e aos sensores na bancada de ensaios.

Imagem 17 – Montagem experimental da Prova de Conceito integrada aos sensores analógicos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.2.1 Condicionamento dos Sinais e Dimensionamento dos Divisores

Para compatibilizar os diferentes padrões de transdutores industriais com as portas analógicas do microcontrolador (limitadas a 3,3 V), implementou-se uma matriz de circuitos divisores de tensão em paralelo. O dimensionamento dos resistores de *pull-up* foi calculado individualmente para maximizar a resolução de leitura de cada tipo de sensor:

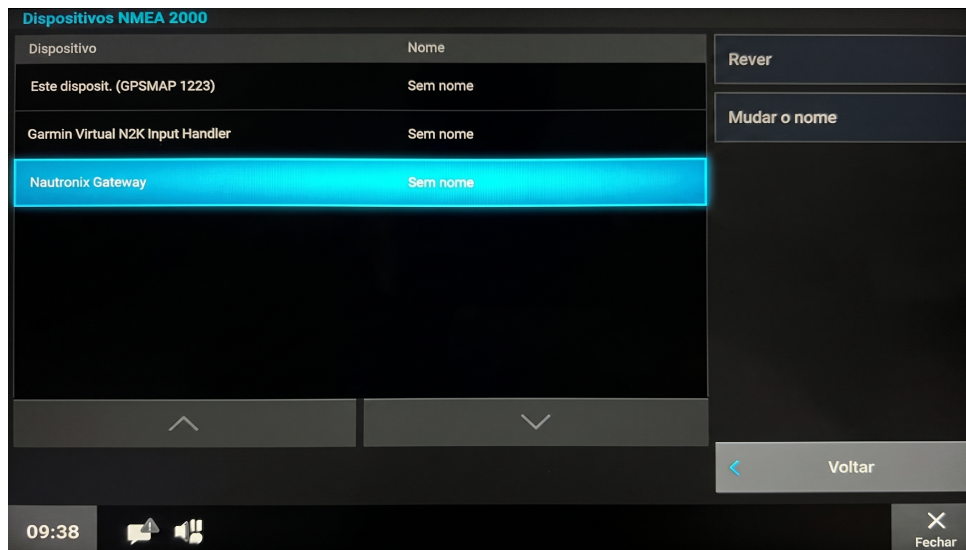
- **Canal de Combustível 1 (Padrão Europeu):** Utilizou-se uma boia tubular linear com variação resistiva de 10 a 180 Ω . Para este canal, acoplou-se um resistor de *pull-up* de 220 Ω , garantindo que a tensão de saída oscilasse numa janela segura e com resolução adequada para o ADC do microcontrolador.
- **Canais Auxiliares (Simuladores):** Para a simulação em bancada do segundo tanque de combustível, dos reservatórios de água e do termômetro da praça de máquinas, adotaram-se quatro potenciômetros de 50 k Ω atuando como reóstatos. Estes foram polarizados com resistores de *pull-up* de 10 k Ω , assegurando um limite máximo de tensão de 2,75 V na porta analógica.

4.2.2 Resultados da Integração com o MFD Comercial

A prova empírica do sistema foi realizada conectando o protótipo diretamente ao barramento NMEA 2000 de um MFD da marca Garmin. Durante o ensaio, a rotina de autodetecção do *firmware* operou conforme planejado. O microcontrolador identificou corretamente a presença ou ausência de continuidade elétrica em cada um dos cinco terminais do ADC. Os sensores que apresentavam circuito aberto foram classificados como inativos, suprimindo inteligentemente a montagem e a emissão dos respectivos PGNs.

Para os canais ativos, o MFD da Garmin reconheceu instantaneamente as instâncias configuradas. Além da correta plotagem das grandezas em tempo real, ao acessar o menu de gerenciamento de rede e inspecionar a lista oficial de instrumentos ativos (*device list*) do MFD, verificou-se que o dispositivo foi catalogado com sucesso sob a identificação de “Nautronix Gateway”. Esse registro, ilustrado na Imagem 18, comprova o pleno funcionamento do PGN 126996 (*Product Information*) obtido por meio da rotina de interrogação ativa estruturada no barramento.

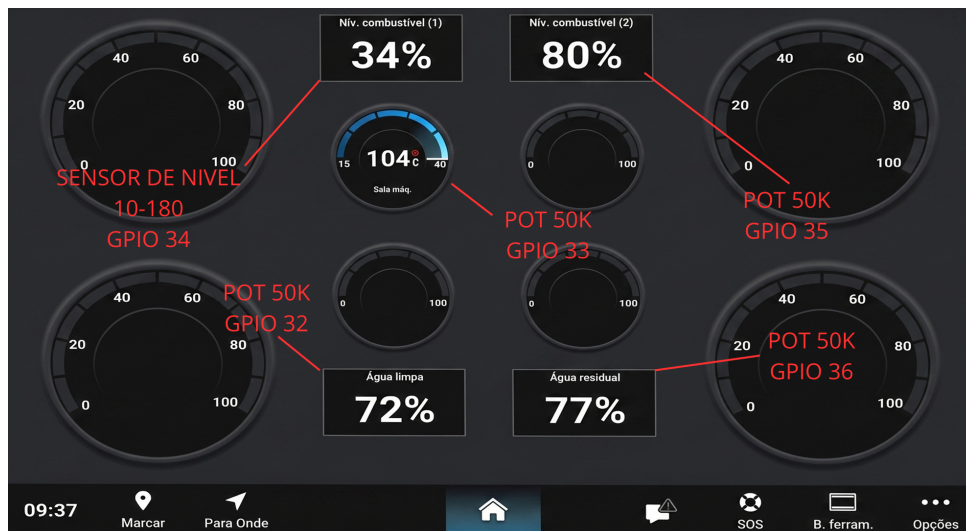
Imagem 18 – Lista de dispositivos (*device list*) do MFD Garmin exibindo o gateway homologado na rede.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A interface gráfica dos mostradores exibindo os dados dinâmicos de nível e temperatura provenientes do protótipo é apresentada na Imagem 19.

Imagem 19 – Visualização dos níveis de fluido e temperatura no MFD Garmin transmitidos pelo gateway.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ao atuar fisicamente sobre o cursor do sensor de nível linear e sobre os eixos dos potenciômetros, os mostradores digitais no ecrã refletiram a variação de volume e temperatura. A aplicação da matriz de média móvel provou a sua eficácia perante

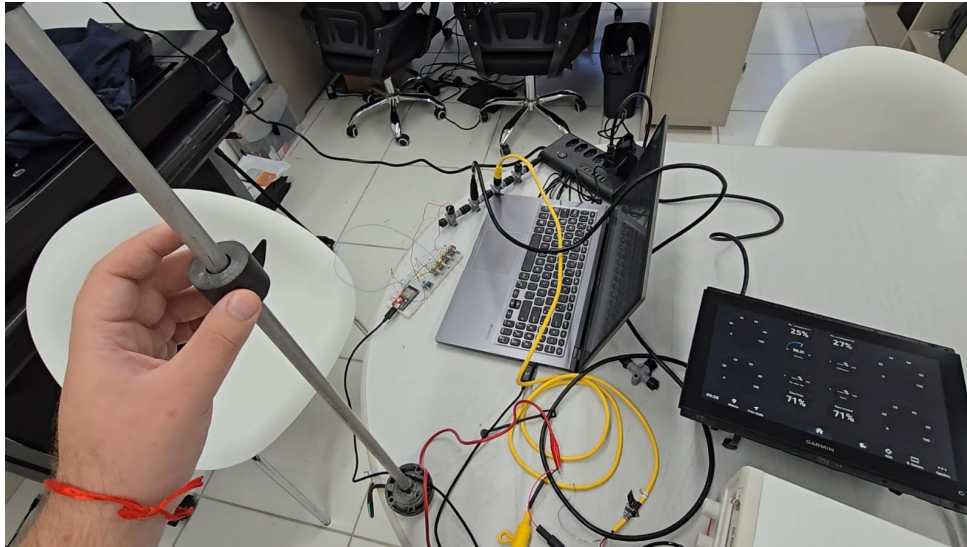
as flutuações rápidas impostas manualmente nos sensores: os ponteiros virtuais no painel da Garmin deslocaram-se de forma suave e contínua, reproduzindo com fidelidade o comportamento amortecido exigido para mitigar o efeito *sloshing* inerente à navegação marítima.

O sucesso desta integração conclui a validação do desenvolvimento proposto. O equipamento desenvolvido comprovou a viabilidade técnica de converter, filtrar e injetar dados de sistemas analógicos legados numa rede veicular naval, utilizando *hardware* microcontrolado.

4.2.3 Metodologia dos Experimentos Dinâmicos e Análise do Filtro

Para avaliar o desempenho prático do algoritmo de controle e filtragem, os ensaios em bancada foram estruturados em duas simulações distintas. Na primeira simulação, realizou-se a atuação manual e suave sobre os eixos dos potenciômetros auxiliares, alterando gradativamente os valores ôhmicos com o objetivo de emular o consumo linear de combustível ou o preenchimento cadenciado dos reservatórios de água. Sob essa condição de variação lenta, o *gateway* processou os sinais sem apresentar latências perceptíveis, atualizando os mostradores virtuais na tela do MFD Garmin de forma contínua, reproduzindo com fidelidade a transição esperada em regime de navegação estável.

Na segunda simulação, o foco consistiu em reproduzir de forma analógica as perturbações severas induzidas pelo efeito *sloshing*. Para tanto, utilizou-se o sensor de nível linear real com haste de aço inoxidável de 60 cm de comprimento. O experimento consistiu em forçar uma oscilação mecânica rápida e contínua do corpo flutuador dentro de uma janela restrita de aproximadamente 10 cm, escolhida de forma aleatória ao longo do curso da haste demonstrado pela Imagem 20.

Imagem 20 – Teste simulando efeito *sloshing*

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Caso o sinal bruto do ADC fosse injetado diretamente no barramento sem tratamento, o deslocamento mecânico de 10 cm em uma haste de 60 cm deveria entregar a tela uma oscilação brusca e instantânea variando aproximadamente 16% do volume total. Contudo, ao inspecionar a interface gráfica do MFD Garmin durante o regime de agitação rápida, verificou-se que o indicador digital registrou uma oscilação amortecida de apenas 1% a 2%. Esse resultado quantitativo comprova a eficácia matemática da matriz de média móvel circular com janela de $M = 20$ amostras, demonstrando a sua capacidade de atuar como um filtro passa-baixas estável perante transientes mecânicos de alta frequência.

4.2.4 Viabilidade de Testes Dinâmicos e Requisitos de Robustez Industrial

Embora a janela de estabilização de 1 segundo tenha apresentado êxito absoluto na validação em bancada, a homologação do algoritmo em um cenário de testes dinâmicos *in loco* impõe restrições severas que delimitam o escopo desta Prova de Conceito. Os equipamentos e a infraestrutura de suporte utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela empresa Sedna Group, cujo portfólio de fabricação foca-se estritamente em embarcações novas de alto desempenho com cascos de planeio rápido.

Essas embarcações operam tipicamente em velocidades de cruzeiro de 30 nós, atingindo velocidades máximas de até 60 nós. O regime dinâmico nesses patamares

de velocidade submete qualquer estrutura a acelerações gravitacionais elevadas, vibrações contínuas de alta frequência e impactos mecânicos severos contra as cristas das ondas. Diante dessas características operacionais hostis, a execução de ensaios práticos em navegação utilizando o protótipo em estado de PoC torna-se tecnicamente inviável e insegura, dada a fragilidade inerente às conexões temporárias de uma matriz de contatos.

Para que o *gateway* possa ser testado e validado em ambiente real sob a dinâmica de planeio do estaleiro, o *hardware* precisa evoluir para um produto consolidado e com grau de robustez industrial. Esse equipamento definitivo deve incorporar obrigatoriamente os seguintes requisitos:

- **Conexões Físicas Permanentes:** Substituição completa da *proto-board* por uma Placa de Circuito Impresso (PCB) dedicada, possuindo conexões totalmente soldadas entre os pinos do microcontrolador, os resistores de *pull-up* e as linhas de sinal dos sensores, imunizando o circuito contra mau contato induzido por vibração;
- **Alimentação Direta Integrada:** Eliminação de fontes externas ou cabos USB de alimentação, projetando um regulador chaveado interno para extrair a energia de operação diretamente dos 12 VCC nativos presentes no pino NET-S do barramento NMEA 2000;

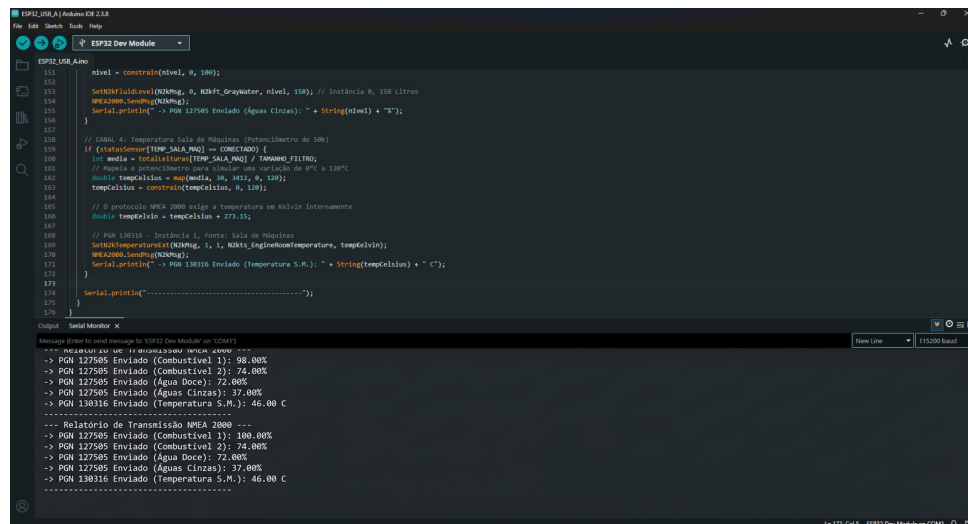
Desta forma, sem descaracterizar a natureza deste trabalho como uma validação inicial de engenharia, a estrutura simplificada desenvolvida cumpriu com rigor o seu papel de demonstrar a viabilidade lógica do sistema. Os limites dinâmicos observados justificam o isolamento dos testes ao ambiente controlado de bancada, mapeando com precisão os requisitos de *hardware* necessários para a futura transformação da PoC em um produto comercializável para o setor náutico *premium*.

4.2.5 Comprovação Prática do Mecanismo de Autodeteção (*Plug-and-Play*)

O comportamento dinâmico previsto teoricamente para a lógica de autodiagnóstico foi integralmente verificado e validado durante os ensaios práticos em bancada. O circuito divisor de tensão, polarizado com resistores de *pull-up* fixos ligados à

linha de 3,3 V, permitiu que o *firmware* interpretasse a integridade do barramento físico através de limites de saturação elétrica. A condição de funcionamento regular do sistema, com o primeiro tanque de combustível devidamente acoplado e transmitindo dados ativos, é apresentada na Imagem 21.

Imagem 21 – Monitoramento do barramento com o sensor de combustível 1 conectado à bancada.



```

151 nivel = constrain(nivel, 0, 100);
152
153 SetAnalogReadPin(ADC1渠, 0, 3604, GrayWater, nivel, 100); // Instância 0, 100 litros
154 WFS2000_SendMsg(WFSMsg);
155 Serial.println(" -> PON 127505 Enviado (Águas Cinzas): " + String(nivel) + "%");
156
157
158 // CANAL 4: Temperatura Sala de Máquinas (Potenciômetro de 50k)
159 if (statusSensor[TEMP_SALA_MQ] == CONECTADO) {
160   float media = calculateAvg(TEMP_SALA_MQ) / TAMANO_FILTRO;
161   // Modela o potenciômetro para simular uma variação de 0°C a 120°C
162   double tempCelcius = map(media, 0, 5000, 0, 120);
163   tempCelcius = constrain(tempCelcius, 0, 120);
164
165   // O protocolo NMEA 2000 exige a temperatura em Kelvin internamente
166   double tempKelvin = tempCelcius + 273.15;
167
168   // PON 130316 - Instância 1, Fonte: Sala de Máquinas
169   SetAnalogReadPin(ADC1渠, 1, 3604, EngineRoomTemperature, tempKelvin);
170   WFS2000_SendMsg(WFSMsg);
171   Serial.println(" -> PON 130316 Enviado (Temperatura S.M.): " + String(tempCelcius) + " C");
172 }
173
174 Serial.println("-----");
175
176 }
  
```

```

=====
-> PON 127505 Enviado (Combustível 1): 98.00%
-> PON 127505 Enviado (Combustível 2): 74.00%
-> PON 127505 Enviado (Água Doce): 72.00%
-> PON 127505 Enviado (Águas Cinzas): 37.00%
-> PON 130316 Enviado (Temperatura S.M.): 46.00 C
=====
--- Relatório de Transmissão NMEA 2000 ---
-> PON 127505 Enviado (Combustível 1): 100.00%
-> PON 127505 Enviado (Combustível 2): 74.00%
-> PON 127505 Enviado (Água Doce): 72.00%
-> PON 127505 Enviado (Águas Cinzas): 37.00%
-> PON 130316 Enviado (Temperatura S.M.): 46.00 C
=====
  
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No momento em que qualquer um dos quatro potenciômetros simuladores ou a boia linear de 10-180 Ω eram fisicamente desconectados da matriz de contatos, a ausência de um caminho resistivo para o aterramento (circuito aberto) forçava o pino do ADC a ler a tensão integral da fonte de alimentação através do resistor de *pull-up*. Consequentemente, o valor digitalizado atingia imediatamente o patamar de saturação superior (4095). O disparo desse estado de salvaguarda na interface de monitoramento é ilustrado na Imagem 22.

Imagem 22 – Interface de diagnóstico exibindo o sensor de combustível 1 em estado desconectado.

```

151 nivel = constrain(nivel, 0, 100);
152
153 SetN2KFluidLevel(N2KMsg, 0, N2Kft_GrayWater, nivel, 150); // Instância 0, 150 litros
154 NMEA2000.SendMsg(N2KMsg);
155 Serial.println(" -> PGN 127505 Enviado (Águas Cinzas): " + String(nivel) + "%");
156 }
157
158 // CANAL 4: Temperatura Sala de Máquinas (Potenciômetro de 50k)
159 if (statusSensor[TEMP_SALA_MQ] == CONECTADO) {
160   int media = totalLeituras[TEMP_SALA_MQ] / TAVANHO_FILTER;
161   // Mapela o potenciômetro para simular uma variação de 0°C a 120°C
162   double tempCelsius = map(media, 30, 3412, 0, 120);
163   tempCelsius = constrain(tempCelsius, 0, 120);
164
165   // O protocolo NMEA 2000 exige a temperatura em Kelvin internamente
166   double tempKelvin = tempCelsius + 273.15;
167
168   // PGN 130316 - Instância 1, Fonte: Sala de Máquinas
169   SetN2KTemperatureExt(N2KMsg, 1, 1, N2Kts_EngineRoomTemperature, tempKelvin);
170   NMEA2000.SendMsg(N2KMsg);
171   Serial.println(" -> PGN 130316 Enviado (Temperatura S.M.): " + String(tempCelsius) + " °C");
172 }
173
174 Serial.println("-----");
175 }
176 }

```

Output Serial Monitor X

```

Message (Enter to send message to 'ESP32 Dev Module' on 'COM1')
New Line 115200 baud
-> PGN 127505 Enviado (Combustível 2): 74.00%
-> PGN 127505 Enviado (Água Doce): 72.00%
-> PGN 127505 Enviado (Águas Cinzas): 37.00%
-> PGN 130316 Enviado (Temperatura S.M.): 46.00 C
-----
--- Relatório de Transmissão NMEA 2000 ---
-> PGN 127505 Enviado (Combustível 2): 74.00%
-> PGN 127505 Enviado (Água Doce): 72.00%
-> PGN 127505 Enviado (Águas Cinzas): 37.00%
-> PGN 130316 Enviado (Temperatura S.M.): 45.00 C
-----

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O algoritmo identificou instantaneamente essa leitura como anômala por estar acima dos limites operacionais máximos preestabelecidos ($ADC > 2500$ para a boia e $ADC > 3800$ para os potenciômetros). A máquina de estados alterou o *status* do canal para DESCONECTADO no mesmo ciclo de amostragem, suspendendo de forma imediata o envio do respectivo PGN para o barramento CAN. O mesmo comportamento de salvaguarda foi observado ao simular um curto-circuito para o terra ($ADC < 30$). Ao restabelecer a conexão física do sensor, o sistema retomou a transmissão automaticamente sem a necessidade de reiniciar o microcontrolador, homologando o funcionamento da inteligência preditiva de rede.

4.2.6 Ajuste e Mitigação da Não Linearidade do ADC do ESP32

Um dos desafios técnicos superados na implementação do protótipo consistiu no ajuste do ADC nativo do ESP32. É amplamente documentado na literatura que o ADC desse microcontrolador apresenta uma resposta não linear nas extremidades da sua curva de transferência (fenômeno conhecido como curvatura em S), manifestando zonas mortas próximas a 0 V e acima de 2,6 V quando configurado com atenuação de 11 dB.

Para mitigar essa limitação e assegurar a exatidão de medição sem a necessidade de algoritmos complexos de regressão polinomial, adotou-se um procedimento de ajuste do sistema de medição restrito ao intervalo linear do transdutor. Durante os ensaios, registraram-se as indicações brutas fornecidas pelo ADC sob as condições de operação estipuladas para os sensores:

- Para o Canal de Combustível 1 (boia linear), os extremos práticos medidos foram de 178 para o tanque vazio ($10\ \Omega$ / 0,14 V) e 1843 para o tanque cheio ($180\ \Omega$ / 1,48 V);
- Para os canais auxiliares baseados nos potenciômetros de 50 k Ω , a janela operacional estendeu-se de 30 (tensão próxima ao terra) a 3412 (correspondente ao limite de 2,75 V imposto pelo divisor).

Essas coordenadas experimentais foram inseridas diretamente como os limites de entrada na função `map()` do *software*. Ao restringir a leitura a essa faixa e aplicar a função `constrain()` para podar quaisquer transientes fora dessa janela, garantiu-se que o algoritmo realizasse uma interpolação linear altamente precisa. Esse ajuste personalizada eliminou o erro de leitura induzido pela não linearidade do chip, assegurando que o erro residual transmitido nas mensagens NMEA 2000 fosse irrelevante para o monitoramento operacional dos tanques e da temperatura.

4.2.7 Análise Estrutural do Firmware e Limitações de Mapeamento Dinâmico

Embora o algoritmo desenvolvido tenha demonstrado alta estabilidade e confiabilidade na execução das rotinas de filtragem e autodetecção em bancada, uma análise crítica da arquitetura de *software* revela uma limitação estrutural importante no que tange à flexibilidade de configuração pelo usuário final. Na presente PoC, o acoplamento entre as portas físicas de entrada do microcontrolador e a lógica de processamento da rede NMEA 2000 é estático, determinado rigidamente em tempo de compilação.

Essa rigidez estrutural decorre diretamente da forma como os vetores e os identificadores foram declarados no código-fonte. O mapeamento dos pinos do ADC é feito por meio de uma matriz constante (`PINOS_ADC`), declarada na linha 19 do Apêndice A, cujos índices estão atrelados de forma fixa a uma estrutura de enumeração

(enum `Canais`) disposta na linha 22 do Apêndice A. Como consequência, o pino físico GPIO 34 estará obrigatoriamente associado ao canal de combustível 1, o GPIO 35 ao combustível 2, e assim sucessivamente. No laço principal de execução (*loop*), o encapsulamento dos dados também ocorre de forma engessada, onde cada índice do vetor chama a função de envio `SetN2kFluidLevel` na linha 119, 130, 142 e 152 do Apêndice A, utilizando parâmetros rígidos de codificação (como `N2kft_Fuel` ou `N2kft_GrayWater`) com instâncias predefinidas de rede.

Essa configuração impede que um usuário ou um técnico instalador realize o mapeamento direto ou a reconfiguração das portas em campo. Caso haja a necessidade de alterar o sensor de água doce da porta física GPIO 32 para a porta GPIO 36, ou transformar o canal de águas cinzas em um terceiro tanque de combustível, a alteração não pode ser feita por meio de chaves físicas ou de comandos externos; exige-se, obrigatoriamente, a modificação manual do código-fonte e a regravação completa do *firmware* no ESP32.

Para superar essa limitação e evoluir o protótipo para um produto comercial *plug-and-play* aplicável em larga escala por estaleiros, a estrutura do *software* deve ser reformulada para suportar alocação dinâmica utilizando por exemplo uma interface de configuração via web.

Essa discussão reforça que, embora a estrutura atual cumpra com rigor o papel de validação lógica exigido para uma PoC, a flexibilização do mapeamento de canais constitui um requisito de engenharia indispensável para a transição do sistema de bancada para um módulo comercializável e adaptável a diferentes projetos de embarcações.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente modernização dos sistemas de navegação em embarcações de esporte e recreio tem evidenciado a necessidade de interoperabilidade entre equipamentos legados e os modernos painéis digitais. Diante deste cenário, este trabalho propôs o desenvolvimento de uma PoC de um *gateway* embarcado microcontrolado, capaz de atuar como um tradutor inteligente entre transdutores analógicos resistivos e a rede digital padronizada NMEA 2000.

A metodologia adotada comprovou a viabilidade técnica e econômica da solução. A escolha do microcontrolador ESP32 revelou-se correta, provendo o poder computacional necessário para gerir múltiplos canais de ADC de forma simultânea, sem comprometer a estabilidade do controlador CAN integrado no silício.

Os ensaios em bancada demonstraram que os desafios inerentes à medição de fluidos no ambiente naval foram superados com sucesso. A implementação do filtro digital de média móvel provou ser uma estratégia de *software* fundamental para mitigar o ruído elétrico e as oscilações mecânicas causadas pelo efeito *sloshing*. O equipamento conseguiu entregar à rede uma leitura amortecida e fidedigna do volume de combustível e das reservas de água, garantindo a visualização de dados estáveis para o utilizador final.

Adicionalmente, o desenvolvimento do *firmware* incorporou características cruciais de sistemas *plug-and-play*. O *gateway* não apenas geriu com sucesso a Address Claiming para evitar conflitos na rede, como também apresentou rotinas de autodeteção de sensores. Ao reconhecer circuitos abertos ou curto-circuitos operacionais, o dispositivo otimizou a largura de banda do barramento NMEA 2000, inibindo o envio de mensagens relativas a terminais inativos.

A validação final, culminada na integração direta do dispositivo batizado de “Nautronix Gateway” com um MFD da marca Garmin, corrobora o pleno atendimento ao objetivo geral desta pesquisa. O protótipo foi reconhecido oficialmente pelo ecrã comercial, plotando gráficos fluidos e contínuos em tempo real. Conclui-se, portanto, que a ponte tecnológica entre componentes resistivos robustos e redes navais de alta velocidade é plenamente exequível, preservando o investimento em infraestrutura existente e centralizando as informações vitais da embarcação com alto grau de

fiabilidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando que o presente trabalho atingiu os objetivos estipulados para uma Prova de Conceito funcional, visando a sua aplicação comercial e a instalação definitiva em estaleiros. Desta forma, sugerem-se as seguintes frentes para trabalhos futuros:

- **Desenvolvimento de Placa de Circuito Impresso (PCB) Isolada:** Migrar a montagem atual de matriz de contatos (*protoboard*) para um projeto de PCB dedicada de grau industrial e a utilização de um SoC Expressif ao invés da placa ESP32 de desenvolvimento ou similar.
- **Alimentação Direta pelo Barramento (Parasite Power):** Projetar um circuito regulador de tensão do tipo *step-down* (ex: conversor *Buck*) para que o microcontrolador possa ser alimentado diretamente pelos 12 VCC fornecidos pelo pino NET-S do próprio cabo de rede NMEA 2000.
- **Calibração Sem Fios de Tanques Não Lineares:** Explorar as capacidades nativas de rádio frequência (Wi-Fi/Bluetooth) do ESP32 para embarcar um servidor *web* local no *gateway* e integrar novos sensores sem a necessidade de reprogramação no microcontrolador.
- **Certificação Oficial NMEA 2000:** Submeter a arquitetura de *hardware* e *software* desenvolvida à National Marine Electronics Association para a obtenção do certificado de conformidade técnica.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

American Boat and Yacht Council (ABYC). **E-11: AC and DC Electrical Systems on Boats**. Annapolis, MD, 2021. Norma técnica.

BOUSCASSE, B. *et al.* Mechanical energy dissipation induced by sloshing and wave breaking in a fully coupled angular motion system. part ii: Experimental investigation. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251232377>. Acesso em: 22 abr. 2026.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

Continental Corporation. **VDO Reed Switch Fuel Senders**. [S.l.], 2022. Catálogo Técnico. Disponível em: <https://vdo-instruments.com>. Acesso em: 29 mar. 2026.

Espressif Systems. **ESP32 Technical Reference Manual**. [S.l.], 2024. Version 5.1. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf. Acesso em: 19 fev. 2026.

FROSINA, E. *et al.* Experimental and numerical analysis of sloshing in a fuel tank. **Energies**, v. 11, n. 3, p. 669, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/669>.

GARCÍA, E. *et al.* Marine nmea 2000 smart sensors for ship batteries supervision and predictive fault diagnosis. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 20, p. 4480, out 2019.

Garmin Ltd. **GPSMAP 7x3/9x3/12x3/16x3: Instruções de Instalação**. [S.l.], 2025. Manual do usuário.

IEC. **IEC 60945: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – General requirements**. Genebra, Suíça, 2002. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/883394368/EVS-En-60945-2003-Maritime-Navigation-Radiocommunication>. Acesso em: 21 abr. 2026.

IEC. **IEC 60092-504: Electrical installations in ships – Part 504: Automation, control and instrumentation**. Genebra, Suíça, 2016. Disponível em: https://downloads.regulations.gov/USCG-2014-0063-0006/attachment_11.pdf. Acesso em: 21 abr. 2026.

International Electrotechnical Commission. **IEC 61162-3: Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 3: Serial data instrument network**. 1.2. ed. Geneva, 2014.

KRILE, S.; KEZIĆ, D.; DIMC, F. Nmea communication standard for shipboard data architecture. **Naše more**, Sveučilište u Dubrovniku, v. 60, n. 3-4, p. 68–81, 2013. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/nmea-communication-standard-for-shipboard-data-architecture-2nlzyrjuqs.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2026.

Lake Shore Cryotronics. **PT-100 Platinum RTDs**. [S.l.], 2026. Disponível em: <https://irtfweb.ifa.hawaii.edu/~iqup/domeenv/PDF/pt100plat.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2026.

LAPPALAINEN, T. **NMEA2000: NMEA2000 library for Arduino**. 2026. Disponível em: <https://github.com/ttlappalainen/NMEA2000>. Acesso em: 28 mar. 2026.

LAPPALAINEN, T. **NMEA2000_esp32: NMEA2000 ESP32 CAN driver**. 2026. Disponível em: https://github.com/ttlappalainen/NMEA2000_esp32. Acesso em: 28 mar. 2026.

LEE, S. J. *et al.* The effects of tank sloshing on lng vessel responses. *In*: ASME. **Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2007)**. San Diego, California, USA, 2007.

Microchip Technology Inc. **ATmega328P: Automotive Microcontrollers Datasheet**. [S.l.], 2015. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 28 mar. 2026.

National Marine Electronics Association. **NMEA 2000® Standard for Serial-Data Networking of Marine Electronic Devices: PGN List**. [S.l.], 2024. Version 3.002. Disponível em: <https://web.nmea.org/External/WCPages/WCWebContent/webcontentpage.aspx?ContentID=189>. Acesso em: 19 fev. 2026.

PAYNE, J. C. **Understanding Boat Wiring**. Dobbs Ferry, NY: Sheridan House, Inc., 2006.

QUIGLEY, C.; SUMPNER, P. Making marine applications based on nmea 2000 robust to cyberattacks. *In*: CAN IN AUTOMATION. **International CAN Conference (ICC)**. [S.l.], 2024.

Robert Bosch GmbH. **CAN Specification Version 2.0**. Stuttgart, Germany: [s.n.], 1991. Especificação técnica do protocolo CAN. Disponível em: <http://esd.cs.ucr.edu/webres/can20.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2026.

RODRIGUES, J. P. d. C. **LoRa Networks for sea communications using the NMEA Standard**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — NOVA University Lisbon, Lisboa, Portugal, 2022.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. San Diego, California: California Technical Publishing, 1997.

SPITZER, S.; LUFT, L.; MORSCHHAUSER, D. Nmea 2000® past, present and future. *In*: NATIONAL MARINE ELECTRONICS ASSOCIATION (NMEA). **RTCM 2009 Annual Assembly Meeting and Conference**. St. Pete Beach, Florida, 2009.

STMicroelectronics. **STM32F103c8: Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU**. [S.l.], 2015. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

Texas Instruments. **SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers**. [S.l.], 2018. Datasheet. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

Texas Instruments. **ISO1050 Isolated CAN Transceiver**. [S.l.], 2020. Datasheet. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1050.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

VALVERDE, F. C. P. Degree Final Project, **NMEA RS-422 Network Audit Using an ESP32 with Real-Time Bluetooth Forwarding to Mobile Devices**. Barcelona, Espanha: [s.n.], 2026.

APÊNDICE A – CÓDIGO-FONTE DO FIRMWARE DO GATEWAY NMEA 2000

O código a seguir apresenta a implementação completa do *firmware* gravado no microcontrolador ESP32 para a realização da Prova de Conceito. O desenvolvimento foi realizado na linguagem C++ utilizando a plataforma Arduino IDE, integrando a leitura analógica filtrada à biblioteca de comunicação NMEA 2000.

```

26  /*
27      =====
28      GATEWAY EMBARCADO NAUTRONIX
29      =====
30  */
31
32  #define ESP32_CAN_TX_PIN GPIO_NUM_17
33  #define ESP32_CAN_RX_PIN GPIO_NUM_16
34
35  #include <Arduino.h>
36  #include <NMEA2000_CAN.h>
37  #include <N2kMessages.h>
38
39  const int TAMANHO_FILTRO = 20;
40  const int NUM_CANAIS = 5;
41
42  // ADC
43  const int PINOS_ADC[NUM_CANAIS] = {34, 35, 32, 36, 33};
44
45  // SENSORES NO ADC
46  enum Canais { COMB_1, COMB_2, AGUA, NEGRAS, TEMP_SALA_MAQ };
47  enum StatusSensor { DESCONECTADO, CONECTADO };
48
49  StatusSensor statusSensor[NUM_CANAIS];
50
51  // MATRIZ FILTRO

```

```

52 int leituras[NUM_CANAIS][TAMANHO_FILTRO];
53 int indice[NUM_CANAIS];
54 long totalLeituras[NUM_CANAIS];
55
56 // LIMITES PARA AUTOVALIDACAO DE SENSOR
57 const int ADC_MIN_VALIDO = 30;          // Abaixo disso: Curto-circuito
      ou erro
58 const int ADC_MAX_VALIDO_BOIA = 2500;  // Limite para boia de 180 ohms
      + 220 ohms
59 const int ADC_MAX_VALIDO_POT = 3800;    // Limite para pot de 50k ohms
      + 10k ohms
60
61 // TEMPORIZADOR
62 unsigned long tempoUltimoEnvio = 0;
63 unsigned long tempoUltimaLeitura = 0;
64 const unsigned long INTERVALO_ENVIO_MS = 2000;
65
66 const unsigned long MensagensTransmitidas[] PROGMEM = {127505L, 130316
      L, 0};
67
68 // Funcao de Processamento e Filtragem Digital
69 double processarCanalFiltrado(int canalIndex, int pinoADC) {
70     int leituraBruta = analogRead(pinoADC);
71     int limiteMaximo = (canalIndex == COMB_1) ? ADC_MAX_VALIDO_BOIA :
      ADC_MAX_VALIDO_POT;
72
73     //Logica de Autodeteccao (Circuito aberto ou curto)
74     if (leituraBruta < ADC_MIN_VALIDO || leituraBruta > limiteMaximo) {
75         statusSensor[canalIndex] = DESCONECTADO;
76         return 0.0;
77     }
78     statusSensor[canalIndex] = CONECTADO;

```

```

79
80 //Filtro de Media Movei Circular
81 totalLeituras[canalIndex] = totalLeituras[canalIndex] - leituras[
    canalIndex][indice[canalIndex]];
82 leituras[canalIndex][indice[canalIndex]] = leituraBruta;
83 totalLeituras[canalIndex] = totalLeituras[canalIndex] + leituras[
    canalIndex][indice[canalIndex]];
84
85 indice[canalIndex] = (indice[canalIndex] + 1) % TAMANHO_FILTRO;
86 int mediaAdc = totalLeituras[canalIndex] / TAMANHO_FILTRO;
87
88 return (double)mediaAdc;
89 }
90
91 void setup() {
92     Serial.begin(115200);
93
94     // Atraso de 2 segundos para estabilizacao eletrica do SN65HVD230 e
    prevencao de Bus-Off
95     delay(2000);
96     Serial.println("\n[SISTEMA] Inicializando Gateway Comercial
    Nautronix...");
97
98     analogReadResolution(12); // Resolucao nativa de 12 bits do ESP32 (0
    a 4095)
99
100    // Inicializa matrizes do filtro com zero
101    for (int c = 0; c < NUM_CANAIS; c++) {
102        indice[c] = 0;
103        totalLeituras[c] = 0;
104        statusSensor[c] = DESCONECTADO;
105        for (int i = 0; i < TAMANHO_FILTRO; i++) {

```

```

106     leituras[c][i] = 0;
107 }
108 }
109
110 // Configuracao e Identificacao NMEA 2000
111 NMEA2000.SetProductInformation("1001", 100, "Nautronix Gateway", "
    1.0.0", "1.0.0");
112 NMEA2000.SetDeviceInformation(112233, 132, 25, 2046); // Classe 25 (
    Sensor)
113
114 NMEA2000.SetMode(tNMEA2000::N2km_ListenAndNode, 33);
115 NMEA2000.ExtendTransmitMessages(MensagensTransmitidas);
116 NMEA2000.Open();
117
118 Serial.println("[SISTEMA] Comunicacao ativa no barramento.");
119 }
120
121 void loop() {
122     NMEA2000.ParseMessages();
123
124     // Executa amostragem e filtragem a cada 50ms (Independente do envio
        de rede)
125     if (millis() - tempoUltimaLeitura >= 50) {
126         tempoUltimaLeitura = millis();
127         for (int c = 0; c < NUM_CANAIS; c++) {
128             processarCanalFiltrado(c, PINOS_ADC[c]);
129         }
130     }
131
132     // Despacha as informacoes formatadas para o barramento a cada 2
        segundos
133     if (millis() - tempoUltimoEnvio >= INTERVALO_ENVIO_MS) {

```

```

134     tempoUltimoEnvio = millis();
135     tN2kMsg N2kMsg;
136
137     Serial.println("\n--- Relatorio de Transmissao NMEA 2000 ---");
138
139     // CANAL 0: Combustivel 1 (Boia Europeia 10-180 Ohms)
140     if (statusSensor[COMB_1] == CONECTADO) {
141         int media = totalLeituras[COMB_1] / TAMANHO_FILTRO;
142         double nivel = map(media, 178, 1843, 0, 100); // 178=Vazio,
143         1843=Cheio
144         nivel = constrain(nivel, 0, 100);
145
146         SetN2kFluidLevel(N2kMsg, 0, N2kft_Fuel, nivel, 400); //
147         Instancia 0, 400 Litros
148         NMEA2000.SendMsg(N2kMsg);
149         Serial.println(" -> PGN 127505 Enviado (Combustivel 1): " +
150         String(nivel) + "%");
151     }
152
153     // CANAL 1: Combustivel 2 (Potenciometro de 50k)
154     if (statusSensor[COMB_2] == CONECTADO) {
155         int media = totalLeituras[COMB_2] / TAMANHO_FILTRO;
156         double nivel = map(media, 30, 3412, 0, 100);
157         nivel = constrain(nivel, 0, 100);
158
159         SetN2kFluidLevel(N2kMsg, 1, N2kft_Fuel, nivel, 300); //
160         Instancia 1, 300 Litros
161         NMEA2000.SendMsg(N2kMsg);
162         Serial.println(" -> PGN 127505 Enviado (Combustivel 2): " +
163         String(nivel) + "%");
164     }

```

```

161 // CANAL 2: Agua Doce (Potenciometro de 50k)
162 if (statusSensor[AGUA] == CONECTADO) {
163     int media = totalLeituras[AGUA] / TAMANHO_FILTRO;
164     double nivel = map(media, 30, 3412, 0, 100);
165     nivel = constrain(nivel, 0, 100);
166
167     SetN2kFluidLevel(N2kMsg, 0, N2kft_Water, nivel, 200); //
168     Instancia 0, 200 Litros
169     NMEA2000.SendMsg(N2kMsg);
170     Serial.println(" -> PGN 127505 Enviado (Agua Doce): " + String(
171     nivel) + "%");
172 }
173
174 // CANAL 3: Aguas Negras/Cinza (Potenciometro de 50k)
175 if (statusSensor[NEGRAS] == CONECTADO) {
176     int media = totalLeituras[NEGRAS] / TAMANHO_FILTRO;
177     double nivel = map(media, 30, 3412, 0, 100);
178     nivel = constrain(nivel, 0, 100);
179
180     SetN2kFluidLevel(N2kMsg, 0, N2kft_GrayWater, nivel, 150); //
181     Instancia 0, 150 Litros
182     NMEA2000.SendMsg(N2kMsg);
183     Serial.println(" -> PGN 127505 Enviado (Aguas Cinzas): " +
184     String(nivel) + "%");
185 }
186
187 // CANAL 4: Temperatura Sala de Maquinas (Potenciometro de 50k)
188 if (statusSensor[TEMP_SALA_MAQ] == CONECTADO) {
189     int media = totalLeituras[TEMP_SALA_MAQ] / TAMANHO_FILTRO;
190     // Mapeia o potenciometro para simular uma variacao de 0 graus C
191     a 120 graus C
192     double tempCelsius = map(media, 30, 3412, 0, 120);

```

```
188     tempCelsius = constrain(tempCelsius, 0, 120);
189
190     // 0 protocolo NMEA 2000 exige a temperatura em Kelvin
internamente
191     double tempKelvin = tempCelsius + 273.15;
192
193     // PGN 130316 - Instancia 1, Fonte: Sala de Maquinas
194     SetN2kTemperatureExt(N2kMsg, 1, 1, N2kts_EngineRoomTemperature,
tempKelvin);
195     NMEA2000.SendMsg(N2kMsg);
196     Serial.println(" -> PGN 130316 Enviado (Temperatura S.M.): " +
String(tempCelsius) + " C");
197 }
198
199     Serial.println("-----");
200 }
201 }
```