

Monitoramento inteligente da reversora e RPM em motores de embarcações pesqueiras

Intelligent monitoring of reversing gear and engine RPM in fishing vessel engines

Micael Balza¹
Antônio Irineu Filho²
Anderson Henrique Silva Santos³
Mozart Orleans Domingos Rodrigues Maia⁴
Gustavo Fontoura de Souza⁵
Ivanilson França Vieira Júnior⁶
Diego da Silva Pereira⁷

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação experimental de um sistema embarcado de baixo custo para monitoramento do regime de rotação do motor e da posição do comando de aceleração em embarcações de pequeno porte. A proposta baseia-se na aquisição do trem de pulsos gerado por um encoder acoplado ao eixo do motor, utilizado para o cálculo do RPM, e na leitura da posição do manche de aceleração por meio de sensores de efeito Hall, adotados em função de sua robustez e operação sem contato físico, características adequadas ao ambiente marinho. Os sinais dos sensores são processados localmente por um microcontrolador do tipo ESP32, com aplicação de condicionamento de sinal, calibração e organização dos dados. Como estratégia de confiabilidade, o sistema incorpora armazenamento local em memória não volátil e transmissão assíncrona das informações via protocolo MQTT, permitindo operação tolerante a falhas de conectividade. A metodologia foi validada por meio da implementação de um protótipo funcional em ambiente de bancada, no qual foi possível capturar corretamente os sinais de RPM e a posição do comando de aceleração, demonstrando a viabilidade técnica da solução proposta. Os resultados obtidos indicam que o sistema apresenta potencial para aplicações de monitoramento embarcado, contribuindo para a supervisão operacional e a prevenção de acionamentos inadequados da reversora em embarcações.

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: micaelbalza@hotmail.com

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: antonioirineu92@gmail.com

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: anderson.henriq10@gmail.com

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: mozartmaia89@gmail.com

⁵ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: gustavo.fontoura@ifrn.edu.br

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: ivanilson.junior@ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: diego.pereira@ifrn.edu.br

Palavras-chave: Sistemas embarcados; Monitoramento náutico; Sensores de efeito Hall; RPM de motores; MQTT; ESP32.

Abstract

This study presents the development and experimental evaluation of a low-cost embedded system for monitoring engine rotational speed and throttle control position in small vessels. The proposed solution is based on the acquisition of the pulse train generated by an encoder coupled to the engine shaft, used for RPM calculation, and on the reading of the throttle lever position through Hall effect sensors, selected due to their robustness and non-contact operation, characteristics suitable for the marine environment. Sensor signals are locally processed by an ESP32 microcontroller, including signal conditioning, calibration, and data organization procedures. As a reliability strategy, the system incorporates local storage in non-volatile memory and asynchronous data transmission via the MQTT protocol, enabling fault-tolerant operation under connectivity failure conditions. The methodology was validated through the implementation of a functional prototype in a bench-testing environment, in which it was possible to correctly capture RPM signals and throttle control position, demonstrating the technical feasibility of the proposed solution. The obtained results indicate that the system presents strong potential for onboard monitoring applications, contributing to operational supervision and the prevention of improper reverse gear engagement in vessels.

Keywords: Embedded Systems; Nautical Monitoring; Hall Effect Sensors; Engine RPM; MQTT; ESP32.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de sistemas é um elemento fundamental em ambientes industriais e operacionais, pois permite acompanhar o desempenho, a integridade e as condições de funcionamento de equipamentos críticos. No entanto, muitos sistemas ainda operam com níveis limitados de informatização, baseando-se em inspeções manuais, rotinas periódicas ou procedimentos reativos, o que compromete a capacidade de resposta a falhas e anomalias [1,2].

Operações marítimas de pequeno porte, como a pesca costeira e artesanal, frequentemente carecem de uma infraestrutura informacional robusta. Embarcações desse segmento apresentam baixa capacidade tecnológica, limitações de espaço, restrições energéticas e custos operacionais reduzidos, o que inviabiliza a adoção de sistemas tradicionais de monitoramento e rastreamento. Como consequência, grande parte dessas embarcações permanece sem acompanhamento contínuo, com dados operacionais escassos ou inexistentes, dificultando tanto a gestão da atividade quanto a garantia da segurança humana em alto-mar [3,4].

Embarcações pesqueiras de pequeno porte e de caráter artesanal apresentam, em geral, baixos níveis de instrumentação e informatização embarcada, com limitações significativas quanto à automação e ao monitoramento digital contínuo. Em contraste com embarcações equipadas com tecnologias mais avançadas, esses barcos tradicionais frequentemente carecem de sistemas embarcados capazes de realizar aquisição, processamento e transmissão contínua de dados operacionais, o que motiva o desenvolvimento de soluções de monitoramento de baixo custo, baixo consumo energético e reduzida complexidade [5].

Apesar do crescente interesse pela digitalização do setor marítimo, ainda se observa uma lacuna significativa na literatura e nas aplicações práticas quanto à telemetria embarcada em embarcações pesqueiras de pequeno porte. Sistemas de monitoramento sofisticados, como o Vessel Monitoring System, são amplamente empregados em grandes navios comerciais e embarcações com comprimento superior a 12 m. No entanto, essas soluções baseadas em comunicação via satélite apresentam elevados custos de implantação e operação, o que limita sua adoção por operadores de pequena escala. Como consequência, embarcações pesqueiras tradicionais frequentemente permanecem desprovidas de sistemas embarcados capazes de realizar a aquisição, o registro e a transmissão contínua de dados operacionais. Essa limitação compromete a adoção de estratégias de monitoramento, controle e manutenção baseadas em dados, especialmente em contextos de pesca artesanal [6,7].

Além das limitações de rastreamento e telemetria, observa-se uma lacuna específica relacionada à aquisição confiável de dados do sistema propulsivo em embarcações de pequeno e médio porte. Em muitas embarcações costeiras, os perfis operacionais do motor e o comportamento de carga não são medidos de forma sistemática, o que restringe a obtenção de informações essenciais para avaliação de desempenho, consumo e emissões, e dificulta a construção de bases históricas de operação [8].

Em cenários mais tradicionais, a indisponibilidade ou o mau funcionamento de instrumentos embarcados compromete o registro de parâmetros como rotação, temperatura, pressão e horas de operação, fazendo com que o acompanhamento do motor dependa de estimativas empíricas baseadas em sinais áudio-visuais e vibração [9]. Em contraste, embarcações dotadas de controle eletrônico permitem coletar parâmetros diretamente do módulo de controle do motor, por exemplo via protocolos industriais como o J1939, viabilizando diagnóstico e detecção precoce de anomalias a partir de tendências em variáveis operacionais [9].

Além disso, o ambiente marinho impõe condições operacionais severas aos sistemas embarcados, caracterizadas por elevada umidade, atmosfera salina, vibração contínua e variações térmicas, fatores que aceleram processos de degradação e reduzem a confiabilidade de componentes eletrônicos e mecânicos [10]. Estudos voltados à operação em ambientes marinhos extremos demonstram que essas condições podem comprometer diretamente a integridade de dispositivos eletrônicos, exigindo maior robustez estrutural, validação experimental e estratégias de mitigação de falhas [11]. Em paralelo, aplicações reais de monitoramento embarcado evidenciam que soluções baseadas em comunicação contínua via satélite apresentam custos elevados de operação, o que limita a frequência de transmissão de dados e reduz a viabilidade de sistemas complexos em embarcações de pequeno porte [6].

Avanços recentes em sistemas embarcados e em tecnologias de Internet das Coisas (IoT) consolidaram-se como uma alternativa viável para enfrentar essas limitações. Plataformas microcontroladas de baixo custo, integradas a sensores digitais e a protocolos de comunicação leves, possibilitam a aquisição contínua de dados operacionais, o processamento local das informações e a transmissão eficiente dos dados, mesmo sob restrições energéticas e de conectividade. Essas arquiteturas favorecem soluções escaláveis e energeticamente eficientes, ampliando a viabilidade do monitoramento embarcado em cenários nos quais sistemas tradicionais de maior custo e complexidade se tornam inviáveis [12-14].

Esses sistemas possibilitam a redução dos custos operacionais e o aumento da confiabilidade dos sistemas de propulsão marítima por meio do monitoramento contínuo de parâmetros operacionais do motor, como temperatura, vibração, rotação e variáveis termodinâmicas, permitindo a detecção precoce de anomalias e falhas incipientes com impacto direto na segurança da navegação [15,17]. Além disso, a aquisição sistemática de dados operacionais do motor viabiliza a avaliação do estado real dos componentes e favorece a adoção de estratégias de manutenção baseadas na condição, estabelecendo as bases para abordagens de manutenção preditiva apoiadas por técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial [16,17].

Na literatura, são encontradas soluções embarcadas que abordam tanto o rastreamento/telemetria quanto o monitoramento operacional de motores e desempenho. Para segurança e rastreamento contínuo de embarcações pesqueiras em alto-mar, há propostas de baixo custo e consumo com armazenamento local e envio confiável mesmo sob conectividade intermitente, como o sistema embarcado baseado em Raspberry Pi e GPS com mecanismo de transferência lossless e otimizações de transmissão descrito em [3]. No mesmo eixo de telemetria, trabalhos propõem processamento local (edge computing) em VMS para elevar a

frequência de coleta e reduzir o custo de comunicação via satélite ao transmitir em tempo real apenas eventos/anomalias e sincronizar o restante em porto [6], enquanto soluções LPWAN de baixo consumo exploram comunicações de longo alcance em cenários costeiros para rastrear e monitorar embarcações leves com dados de posição e parâmetros operacionais [12].

Em paralelo, para monitoramento do motor e do desempenho energético/ambiental, estudos apresentam arquiteturas simplificadas com conjunto mínimo de sensores (GPS, RPM e vazão de combustível) para estimar potência, consumo e emissões em embarcações pequenas e médias [8], bem como plataformas de monitoramento remoto de motores diesel com aquisição contínua via ECU e barramento CAN (J1939), transmissão segura para terra e apoio a diagnóstico e manutenção baseada em condição [9].

Diante desse contexto, este trabalho propõe uma metodologia de monitoramento embarcado orientada à aquisição contínua de parâmetros operacionais do sistema propulsivo, com ênfase na posição do comando de reversão e na velocidade de rotação do motor. A proposta fundamenta-se no uso de sistemas embarcados de baixo custo e tecnologias de Internet das Coisas, visando viabilizar a instrumentação digital de embarcações tradicionalmente desprovidas de monitoramento contínuo.

Diferentemente de abordagens baseadas em sistemas proprietários de alto custo ou em acesso direto a módulos eletrônicos do motor, a metodologia adota técnicas não invasivas de aquisição de dados, aliadas a processamento local, armazenamento em memória não volátil e transmissão assíncrona tolerante a falhas. Dessa forma, o trabalho busca contribuir para a redução das barreiras técnicas e econômicas associadas à telemetria operacional embarcada, estabelecendo uma base técnica escalável para aplicações futuras de diagnóstico e manutenção orientada por dados no contexto marítimo.

2 METODOLOGIA PROPOSTA

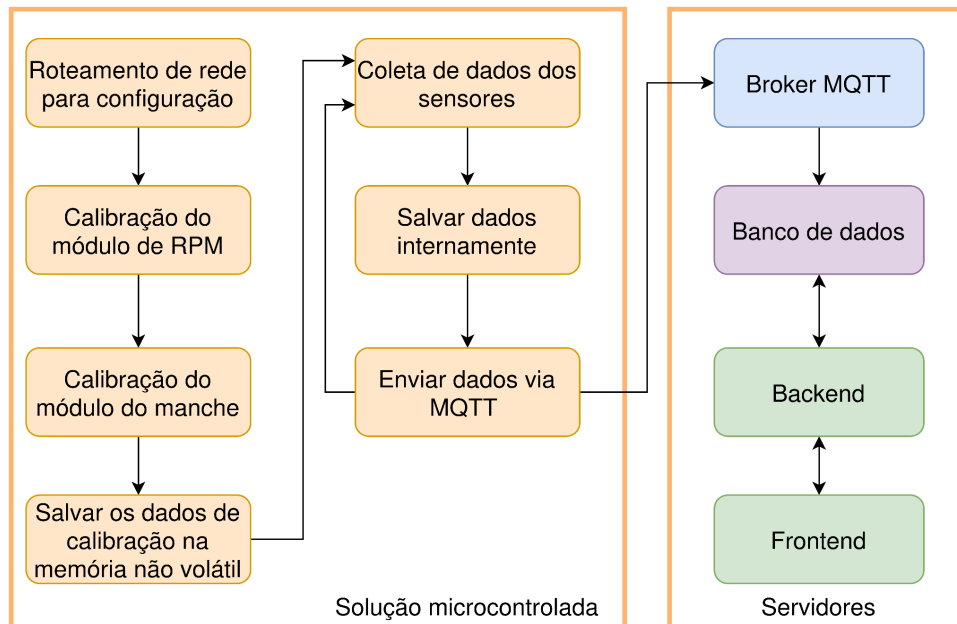
A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se no desenvolvimento de uma arquitetura embarcada para monitoramento contínuo de variáveis operacionais do sistema propulsivo, com ênfase na rotação do motor e na posição do comando de aceleração. A abordagem emprega uma solução microcontrolada capaz de integrar aquisição de sinais, calibração automática, processamento local, armazenamento persistente e transmissão remota de dados, compondo um sistema IoT distribuído e tolerante a falhas de conectividade.

A arquitetura foi concebida segundo um modelo em camadas, no qual a solução embarcada atua como nó de borda responsável pela coleta e pré-processamento dos dados, enquanto a infraestrutura em terra é encarregada do armazenamento, processamento adicional

e disponibilização das informações para análise. Essa separação funcional permite reduzir a complexidade do sistema embarcado, ao mesmo tempo em que viabiliza a expansão futura das capacidades analíticas por meio de serviços de backend e interfaces de visualização.

A Figura 1 apresenta uma visão geral da metodologia proposta. No domínio embarcado, o sistema inicia-se com a configuração da conectividade de rede e a execução dos procedimentos de calibração dos módulos de leitura do RPM e da posição do comando de aceleração. Os parâmetros de calibração são armazenados em memória não volátil, garantindo persistência mesmo após reinicializações ou falhas de energia. Em operação normal, os dados dos sensores são coletados de forma contínua, processados localmente e armazenados internamente como mecanismo de redundância.

Figura 1 - Diagrama da arquitetura geral da metodologia proposta



A transmissão dos dados é realizada por meio de um protocolo de mensagens leve, estabelecendo a comunicação entre a solução embarcada e a infraestrutura de servidores. No domínio em terra, um broker MQTT atua como ponto central de recepção das mensagens, encaminhando os dados para armazenamento persistente em banco de dados. A partir desse repositório, serviços de backend são responsáveis pelo processamento e pela organização das informações, possibilitando seu consumo por aplicações *frontend* destinadas à visualização, análise e apoio à tomada de decisão.

Essa arquitetura distribuída permite a coleta confiável de dados operacionais em ambientes marítimos caracterizados por instabilidade energética e conectividade intermitente,

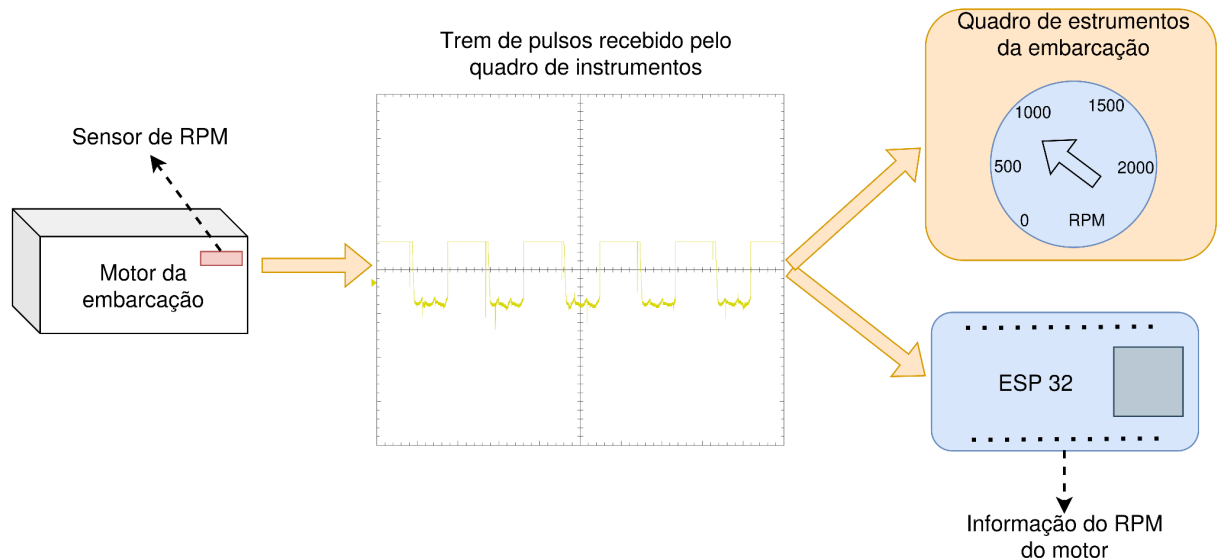
ao mesmo tempo em que oferece flexibilidade para integração com módulos analíticos mais avançados, como detecção de anomalias e manutenção baseada na condição. O fluxo modular apresentado na Figura 1 evidencia como a solução proposta articula os elementos embarcados e os serviços em terra para compor um sistema de monitoramento escalável, robusto e adequado a aplicações reais de instrumentação naval.

2.1 Aquisição da Rotação do Motor por Leitura de Trem de Pulsos

A rotação do motor é obtida a partir da leitura de um sinal pulsado gerado pelo próprio sistema de instrumentação da embarcação. Em motores equipados com tacômetros eletrônicos, esse sinal é produzido por um sensor acoplado ao motor e encaminhado ao painel de instrumentos da torre de comando, onde pode alimentar mostradores analógicos ou digitais. O sinal assume a forma de um trem de pulsos elétricos cuja frequência é diretamente proporcional à velocidade de rotação do eixo do motor.

Na metodologia proposta, esse trem de pulsos é capturado diretamente no painel de instrumentos da embarcação, conforme ilustrado na Figura 2, sem a necessidade de intervenções mecânicas ou instalação de sensores adicionais no motor. Essa abordagem torna a solução não invasiva e aplicável a diferentes tipos de embarcações e sistemas de instrumentação já existentes. O módulo embarcado realiza a contagem do número de pulsos em um intervalo de tempo previamente definido, permitindo estimar o regime instantâneo de rotação do motor em rotações por minuto (RPM) a partir da frequência observada.

Figura 2 - Diagrama do processo de aquisição do RPM do motor a partir do trem de pulsos fornecido pelo sistema de instrumentação da embarcação, com leitura simultânea pelo tacômetro e pela unidade embarcada.



Para garantir a adaptabilidade do sistema a diferentes motores, sensores e configurações de painel, a metodologia incorpora um procedimento de calibração automática. Durante essa etapa, o operador posiciona o motor em regimes de rotação conhecidos como valores de referência previamente indicados no tacômetro da embarcação (por exemplo, 500, 1000 e 1500 RPM), e confirma cada condição ao sistema. Para cada regime, o módulo embarcado registra a quantidade de pulsos detectados no intervalo de amostragem, estabelecendo pontos de correspondência entre frequência de pulsos e rotação do motor.

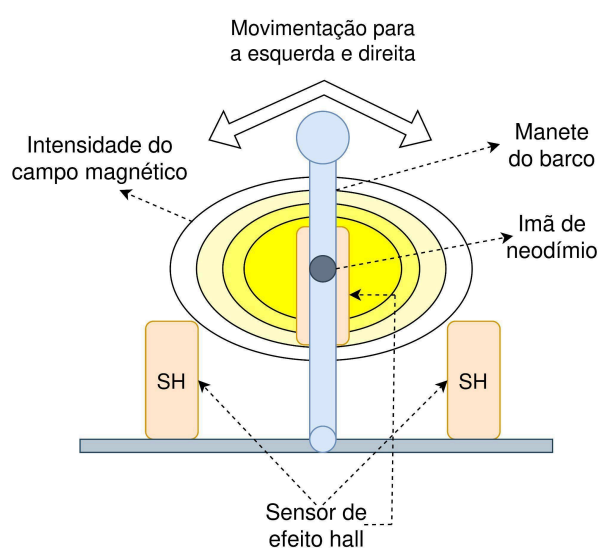
Os parâmetros obtidos na calibração são armazenados em memória não volátil e utilizados como referência durante a operação normal. A partir desses pontos, o sistema estima o RPM corrente por meio de interpolação ou extrapolação proporcional, com base na contagem de pulsos observada em tempo real. Essa estratégia permite o cálculo contínuo da rotação do motor com boa precisão, independentemente do tipo de embarcação ou do sistema de instrumentação original, preservando a simplicidade da instalação e a robustez da solução proposta.

2.2 Determinação da Posição do Comando de Aceleração

A posição do comando de aceleração é determinada por meio de um arranjo não invasivo baseado em sensores de efeito Hall analógicos, associados a um ímã permanente fixado ao mecanismo móvel do manche. Conforme ilustrado na Figura 3, três sensores Hall

(SH) são posicionados de forma distribuída ao longo da base do comando, sendo um sensor central e dois sensores laterais, enquanto um ímã de neodímio é acoplado à alavanca de controle. O deslocamento do manche provoca variações contínuas na intensidade do campo magnético percebido por cada sensor, permitindo inferir a posição do comando a partir da combinação dos sinais analógicos adquiridos.

Figura 3 - Arranjo proposto para leitura da posição do comando de aceleração por meio de sensores de efeito Hall. Três sensores Hall (SH) são posicionados ao longo da base do comando, enquanto um ímã de neodímio acoplado à alavanca gera um campo magnético cuja intensidade varia conforme o deslocamento do manche, permitindo a estimativa contínua da posição a partir das leituras analógicas.



A adoção de sensores magnéticos, em detrimento de soluções baseadas em potenciômetros ou elementos resistivos de contato, decorre da necessidade de maior robustez frente às condições adversas típicas do ambiente marinho. A elevada umidade, a atmosfera salina, a vibração contínua e as variações térmicas aceleram processos de corrosão, desgaste mecânico e degradação elétrica, comprometendo a confiabilidade de dispositivos baseados em contato físico ao longo do tempo [10,11]. A leitura sem contato físico proporcionada pelos sensores de efeito Hall reduz a suscetibilidade a esses mecanismos de degradação, tornando a solução mais adequada para aplicações embarcadas de longa duração.

Diferentemente de abordagens discretas baseadas em chaves de fim de curso ou estados binários, a metodologia proposta possibilita a leitura contínua da posição do comando ao longo de toda a sua faixa de operação. À medida que o ímã se afasta de um sensor específico, a intensidade do campo magnético medida decresce de forma gradual, enquanto aumenta nos sensores mais próximos, conforme representado pelas linhas concêntricas de

intensidade na Figura 3. A combinação dessas leituras analógicas fornece uma assinatura magnética única para cada posição do manche, permitindo estimar sua posição com maior resolução e estabilidade.

Para garantir adaptabilidade a diferentes geometrias mecânicas e dimensões físicas do comando, a proposta incorpora um procedimento de calibração automática após a instalação do sistema. Durante essa etapa, o operador posiciona o manche em estados de referência previamente definidos, como posição central, avanço máximo e ré máxima, e confirma cada condição ao sistema. Para cada posição, os valores analógicos dos três sensores Hall são registrados e utilizados para construir um mapeamento proporcional contínuo entre o campo magnético medido e a posição real do comando.

Os parâmetros obtidos na calibração são armazenados em memória não volátil e utilizados como referência durante a operação normal. Essa estratégia permite que a mesma solução seja aplicada a embarcações com diferentes cursos de manete, independentemente de variações mecânicas, como comandos com deslocamentos totais distintos. Assim, a posição atual do manche pode ser estimada por interpolação proporcional a partir das leituras instantâneas dos sensores, conferindo à solução elevada generalidade, precisão e robustez operacional em ambientes marítimos.

2.3 Processamento Local, Armazenamento e Transmissão dos Dados

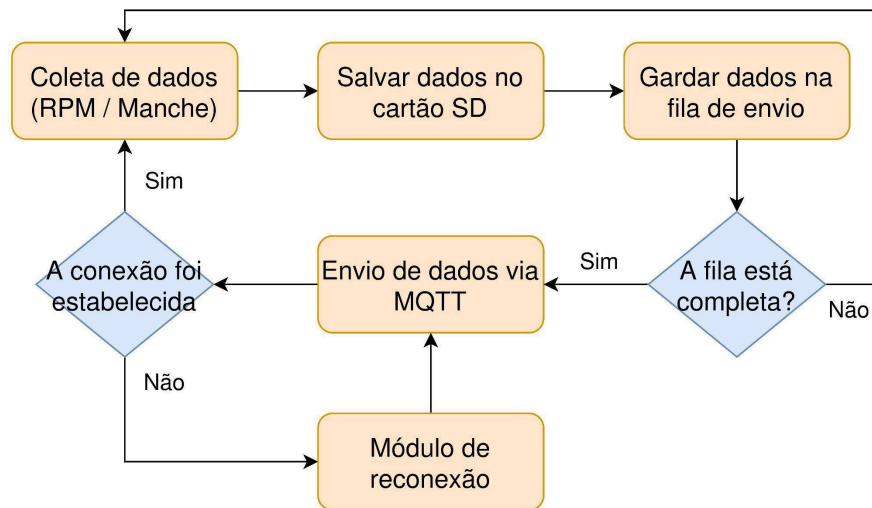
Os sinais provenientes da leitura do trem de pulsos do motor e da posição do comando de aceleração, são processados localmente pela unidade embarcada que atua como núcleo de aquisição e pré-processamento dos dados operacionais. Nessa etapa, as leituras brutas dos sensores são convertidas em grandezas físicas por meio das curvas de calibração previamente estabelecidas, garantindo a coerência entre os valores medidos e os estados reais de operação do sistema propulsivo. Adicionalmente, são realizadas verificações básicas de consistência temporal e organização das amostras em blocos de aquisição associados a janelas de tempo definidas.

Visando aumentar a robustez do sistema frente às condições operacionais típicas do ambiente marítimo, a metodologia proposta adota uma estratégia de armazenamento local contínuo em memória não volátil. Esse mecanismo assegura a preservação dos dados operacionais mesmo em situações de falha de comunicação, desligamentos inesperados ou indisponibilidade temporária da rede. Os dados armazenados localmente são organizados de

forma sequencial em uma fila de transmissão, preservando a ordem temporal de aquisição e permitindo posterior sincronização sem perda de informações.

A transmissão dos dados é realizada de forma assíncrona por meio de um protocolo de comunicação orientado a mensagens, adequado a cenários caracterizados por largura de banda limitada e latência variável. Os dados são enviados em blocos, reduzindo o overhead de comunicação e aumentando a eficiência do enlace. O fluxo geral de processamento, armazenamento e envio dos dados é ilustrado na Figura 4, que apresenta o ciclo contínuo de aquisição, registro local e tentativa de transmissão.

Figura 4 - Fluxograma do processamento local, armazenamento e envio dos dados na solução embarcada.



Em cenários de conectividade intermitente, o sistema opera de forma tolerante a falhas. Caso a conexão com a infraestrutura remota não esteja disponível ou a transmissão não seja confirmada, os blocos de dados permanecem armazenados na fila de envio. Quando a conectividade é restabelecida, o sistema retoma automaticamente o processo de transmissão, sincronizando os dados pendentes de forma transparente e garantindo a integridade da base histórica.

No domínio da infraestrutura remota, as mensagens transmitidas pela unidade embarcada são recebidas por um broker MQTT, que atua como ponto central de entrada e distribuição dos dados. A partir desse broker, as informações são encaminhadas para um banco de dados persistente, onde ficam disponíveis para processamento posterior. Serviços de backend são responsáveis pela agregação, organização e disponibilização dos dados, permitindo seu consumo por aplicações de frontend destinadas à visualização, análise

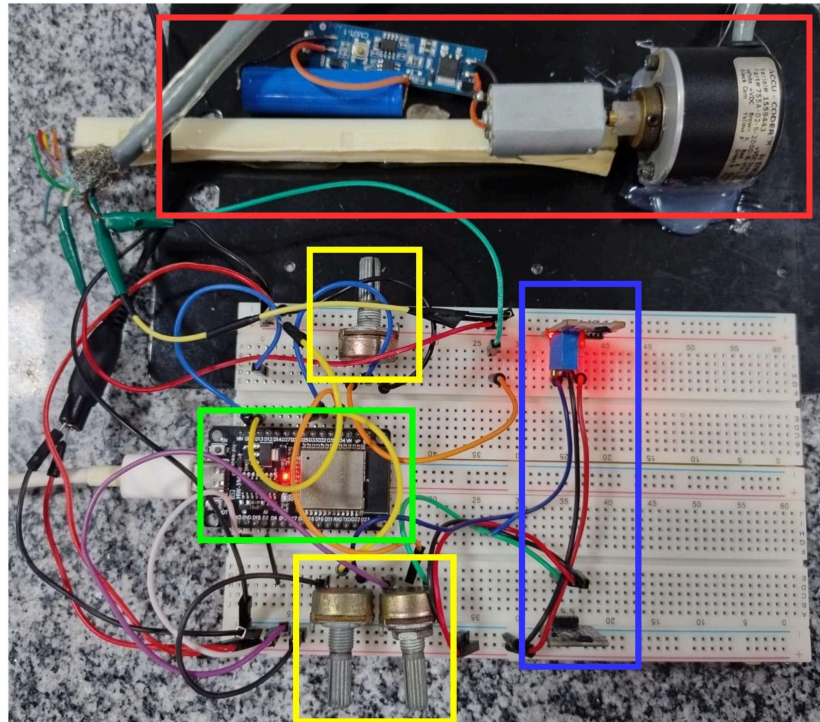
operacional e suporte à tomada de decisão. Essa abordagem integrada de processamento local, armazenamento não volátil e transmissão assíncrona confere à solução elevada resiliência operacional, escalabilidade e adequação a ambientes marítimos reais, nos quais falhas de comunicação e restrições de conectividade são condições esperadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a viabilidade da metodologia proposta, foi desenvolvido um protótipo funcional em ambiente de bancada, com o objetivo de validar a aquisição dos sinais de rotação do motor e da posição do comando de aceleração, bem como o processamento local dessas informações pela unidade embarcada. Os ensaios realizados nesta etapa possuem caráter experimental e exploratório, sendo direcionados à verificação do funcionamento dos principais módulos do sistema antes de sua aplicação em ambiente real de operação.

A montagem do protótipo experimental é apresentada na Figura 5. O conjunto foi concebido para reproduzir, em escala reduzida, as condições funcionais do sistema embarcado proposto. Um motor elétrico de corrente contínua foi acoplado a um encoder incremental, responsável pela geração de um trem de pulsos proporcionais à velocidade de rotação. Esse sinal representa, de forma equivalente, o sinal disponibilizado por sistemas de instrumentação de motores em embarcações reais, normalmente utilizado para alimentação de tacômetros analógicos ou digitais.

Figura 5 - Fluxograma do processamento local, armazenamento e envio dos dados na solução embarcada.



O trem de pulsos gerado pelo encoder opera em nível lógico de 5 V e foi condicionado por meio de um divisor resistivo, adequando-o ao nível de entrada do microcontrolador ESP32, que opera em 3,3 V. Esse sinal foi então aplicado ao microcontrolador, permitindo a contagem de pulsos em janelas temporais definidas e o cálculo do regime de rotação do motor. De forma complementar, o sinal também foi monitorado externamente, possibilitando a verificação da coerência entre a leitura local e a referência visual do sistema de instrumentação.

O módulo responsável pela leitura da posição do comando de aceleração foi implementado utilizando sensores de efeito Hall alimentados em 5 V, cujos sinais analógicos também foram ajustados para níveis compatíveis com o conversor analógico-digital do ESP32. Em função das limitações físicas da montagem de bancada, foram utilizados dois sensores Hall nesta etapa experimental, em contraste com a configuração de três sensores prevista na metodologia completa. Ainda assim, os testes permitiram validar o princípio de funcionamento da leitura baseada em campo magnético e sua capacidade de identificar variações contínuas da posição do comando.

O microcontrolador ESP32 atuou como unidade central de aquisição e processamento, sendo responsável pela leitura dos sinais, aplicação das rotinas de calibração e cálculo das

variáveis de interesse. Durante os testes, os dados processados foram registrados localmente e apresentados em formato textual, permitindo o acompanhamento em tempo real dos valores estimados de RPM e da posição do comando de aceleração. Exemplos dessas leituras evidenciam a alternância consistente entre os estados de avanço e ré, bem como a variação proporcional associada à intensidade do comando, conforme esperado a partir do modelo proposto.

Os resultados obtidos demonstram que a abordagem proposta é capaz de capturar de forma estável tanto o sinal pulsado associado à rotação do motor quanto as variações contínuas da posição do comando de aceleração. A contagem de pulsos em intervalos temporais definidos mostrou-se adequada para a estimativa do regime de rotação, enquanto a leitura analógica dos sensores Hall permitiu mapear diferentes posições do comando ao longo de sua faixa de deslocamento.

Do ponto de vista funcional, os ensaios confirmam a viabilidade de uma solução não invasiva para aquisição de RPM, uma vez que o sinal é obtido diretamente a partir da instrumentação existente, sem a necessidade de instalação de sensores adicionais no motor. De modo semelhante, a leitura magnética da posição do comando mostrou-se apropriada para aplicações embarcadas, oferecendo maior robustez frente a desgaste mecânico e degradação por contato físico, características relevantes em ambientes sujeitos a vibração, umidade elevada e atmosfera salina.

É importante ressaltar que os resultados apresentados correspondem a uma fase inicial de validação em ambiente controlado. O protótipo ainda não foi submetido a ensaios prolongados nem a testes em embarcação real, o que impõe limitações à análise quantitativa de desempenho, confiabilidade e robustez a longo prazo. Fatores como interferência eletromagnética proveniente do motor, variações no fornecimento de energia elétrica e condições ambientais severas não foram plenamente reproduzidos nos experimentos de bancada.

Ainda assim, os testes realizados fornecem evidências consistentes de que a arquitetura proposta é tecnicamente viável e adequada ao objetivo de monitoramento do regime de rotação do motor e da posição do comando de aceleração. A modularidade da solução, aliada ao uso de sensores sem contato físico e à capacidade de processamento local do microcontrolador, indica potencial para evolução futura, incluindo a ampliação do número de sensores Hall, a validação em ambiente real de operação e a integração completa com a infraestrutura de transmissão e visualização de dados.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de arquitetura embarcada para o monitoramento contínuo da rotação do motor e da posição do comando de aceleração em sistemas propulsivos marítimos, baseada em microcontroladores e tecnologias de Internet das Coisas. A abordagem foi concebida com foco em baixo custo, simplicidade arquitetural e robustez operacional, buscando atender às restrições típicas de ambientes marítimos, como vibração, umidade elevada, atmosfera salina e conectividade intermitente.

A metodologia proposta diferencia-se por empregar técnicas não invasivas de aquisição de dados. A rotação do motor é estimada a partir do trem de pulsos já disponível no sistema de instrumentação da embarcação, evitando a instalação de sensores adicionais diretamente no motor. De forma complementar, a posição do comando de aceleração é determinada por meio de sensores de efeito Hall analógicos associados a um ímã permanente, eliminando componentes baseados em contato físico e aumentando a confiabilidade do sistema em ambientes agressivos. A incorporação de procedimentos de calibração automática confere flexibilidade à solução, permitindo sua adaptação a diferentes geometrias mecânicas e cursos de manete sem necessidade de ajustes manuais complexos.

A implementação de um protótipo funcional em ambiente de bancada permitiu validar a viabilidade técnica da proposta. Os resultados preliminares demonstraram que o sistema é capaz de captar de forma consistente o trem de pulsos associado à rotação do motor, bem como estimar a posição relativa do comando de aceleração a partir das leituras dos sensores magnéticos. Esses testes iniciais confirmam o potencial da solução para aquisição contínua e estruturada de dados operacionais relevantes do sistema propulsivo.

Como trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de testes embarcados em operação real, com avaliação prolongada da estabilidade do sistema, da robustez dos sensores e da confiabilidade da comunicação de dados. Adicionalmente, a integração com camadas superiores de processamento, análise histórica e visualização abre caminho para aplicações mais avançadas, como suporte à manutenção baseada na condição, detecção de padrões anômalos e apoio à tomada de decisão operacional. Nesse contexto, a solução proposta estabelece uma base técnica sólida para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento embarcado acessíveis, escaláveis e alinhados às demandas contemporâneas de digitalização do setor marítimo.

REFERÊNCIAS

- [1] Sankar, P., V. R., Charulatha, S., Kumar, P., Kumar, P. A., & Kumar, S. (2025). Digital twin-based real-time industrial monitoring and control. In *Proceedings of the 2025 International Conference on Computing, Intelligence, and Application (CIACON)* (pp. 1–6). Durgapur, India. <https://doi.org/10.1109/CIACON65473.2025.11189434>
- [2] V. S. P., Kumar, A. S. T., G. S. M., & Kumar, D. S. (2025). Optimizing industrial automation with digital twin and IoT sensors. In *Proceedings of the 6th International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV)* (pp. 1597–1602). Tirunelveli, India. <https://doi.org/10.1109/ICICV64824.2025.11085939>
- [3] Guntha, R., Sai Shibu, N. B., & Rao, S. N. (2019). Resource constrained onboard controller system for real-time fishing boat tracking in high seas. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED)* (pp. 1–5). Kollam, India. <https://doi.org/10.1109/ISED48680.2019.9096236>
- [4] Tasseti, A. N., Galdelli, A., Pulcinella, J., Mancini, A., & Bolognini, L. (2022). Addressing gaps in small-scale fisheries: A low-cost tracking system. *Sensors*, 22(3), 839. <https://doi.org/10.3390/s22030839>
- [5] Sugiarto, E., Suhendi, A., Abdussalam, M. Y., Husniah, Z. A., & Lestari, A. P. (2023). Prototype design of a fishing boat safety monitoring system using LoRa and microsensor devices. *Journal of Measurements, Electronics, Communications, and Systems (JMECS)*, 10(2), 77–85.
- [6] Ferreira, J. C., & Martins, A. L. (2019). Edge computing approach for vessel monitoring system. *Energies*, 12(16), 3087. <https://doi.org/10.3390/en12163087>
- [7] Abrori, M. Z. L., Sidhi, S. D. P., & Prasetyo, D. (2021). Modern monitoring instrument to support fishing vessel operation and maintenance: A review. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(6), 2305–2312.
- [8] Kim, S., Kim, H., & Jeon, H. (2023). Development of a simplified performance monitoring system for small and medium-sized ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1734. <https://doi.org/10.3390/jmse11091734>
- [9] Bukovac, O., Pelić, V., Mrakovčić, T., Jelić, M., Radica, G., Vidović, T., Račić, N., Lalić, B., & Bratić, K. (2025). Remote monitoring, simulation and diagnosis of electronically controlled marine engines. *Energies*, 18(6), 1399. <https://doi.org/10.3390/en18061399>

- [10] Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., & Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transportation Safety and Environment*, 3(2), 85–102. <https://doi.org/10.1093/tse/tdab005>
- [11] Liu, L., Lu, T., Luo, D., & Xiao, H. (2019). Research on applied reliability of BGA solder balls in extreme marine environment. In *Proceedings of the IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (pp. 2054–2060). Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2019.00315>
- [12] Sanchez-Iborra, R., Liaño, I. G., Simoes, C., Couñago, E., & Skarmeta, A. F. (2019). Tracking and monitoring system based on LoRa technology for lightweight boats. *Electronics*, 8(1), 15. <https://doi.org/10.3390/electronics8010015>
- [13] Xu, G., Shi, Y., Sun, X., & Shen, W. (2019). Internet of Things in marine environment monitoring: A review. *Sensors*, 19(7), 1711. <https://doi.org/10.3390/s19071711>
- [14] Noto, S., Gharbaoui, M., Falcitelli, M., Martini, B., Castoldi, P., & Pagano, P. (2023). Experimental evaluation of an IoT-based platform for maritime transport services. *Applied System Innovation*, 6(3), 58. <https://doi.org/10.3390/asi6030058>
- [15] Dong, S., Liu, J., Han, B., Wang, S., Zeng, H., & Zhang, M. (2025). UMAP-based all-MLP marine diesel engine fault detection method. *Electronics*, 14(7), 1293. <https://doi.org/10.3390/electronics14071293>
- [16] Islam, R., Guo, Y., Adumene, S., & Abdussamie, N. (2025). Reliability assessment of marine propulsion systems for MASS: A bibliometric analysis and literature review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(11), 2070. <https://doi.org/10.3390/jmse13112070>
- [17] Upadrashta, D., & Wijaya, T. (2026). AI/ML-based anomaly detection and fault diagnosis of turbocharged marine diesel engines: Experimental study on engine of an operational vessel. *Information*, 17(1), 16. <https://doi.org/10.3390/info17010016>
- [18] Agustini, S. A., et al. (2023). Perancangan sistem digitalisasi monitoring data RPM engine dan temperatur minyak lubrikan kapal berbasis IoT com prototype ESP32. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 11(2), 45–54.