

CAPÍTULO 4

PROVA DE CONCEITO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE OPERAÇÃO E DE FALHAS EM MOTOR A COMBUSTÃO

Data de aceite: 01/07/2024

Marcio Luís Munhoz Amorim

Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos
São Carlos, SP

Jorge Gomes Lima

Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e
Renováveis - CEAR
João Pessoa – PB

Norah Nadia Sánchez Torres

Universidade Federal da Integração
Latinoamericana – UNILA
Programa de Pos-graduação
Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade – PPGIES
Foz do Iguaçu, PR

Fabiano Salvadori

Universidade Federal da Paraíba – UFPB
Centro de Energias Alternativas e
Renováveis - CEAR
João Pessoa – PB

Oswaldo Hideo Ando Junior

Universidade Federal Rural de
Pernambuco - UFRPE
Grupo de Pesquisa em Energia &
Sustentabilidade Energética - GPEnSE
Cabo de Santo Agostinho – PE

RESUMO: Este capítulo descreve a proposta e o desenvolvimento da prova de conceito (PoC) para um sistema de aquisição de dados focado na detecção de falhas e no monitoramento da condição operacional de motores a combustão em bancada. O objetivo principal foi desenvolver e validar um sistema de telemetria utilizando sensores não invasivos e tecnologia open source, com base em uma revisão do estado da arte. O sistema proposto coleta dados sobre vibração, som, temperatura e nível de CO₂ para identificar falhas de ignição e combustão, contribuindo para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na indústria marítima. Utilizando um microcontrolador ESP32 com conectividade Wi-Fi, vários sensores compatíveis foram integrados para criar um protótipo funcional. Testes preliminares indicam a viabilidade do PoC para a aquisição de dados e criação de datasets para fins de pesquisa e desenvolvimento.

PALAVRAS-CHAVE: Aquisição de dados, Motores a Combustão, Sensores Não Invasivos, Sistema Open Source, Monitoramento e Detecção de Falhas.

PROOF OF CONCEPT OF AN OPERATIONAL AND FAULT DATA ACQUISITION SYSTEM FOR COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT: This chapter describes the proposal and development of a proof of concept (PoC) for a data acquisition system focused on detecting faults and monitoring the operational condition of benchtop combustion engines. The main objective was to develop and validate a telemetry system using non-invasive sensors and open-source technology, based on a review of the state of the art. The proposed system collects data on vibration, sound, temperature, and CO₂ levels to identify ignition and combustion faults, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions (GHG) in the maritime industry. Using an ESP32 microcontroller with Wi-Fi connectivity, various compatible sensors were integrated to create a functional prototype. Preliminary tests indicate the feasibility of the PoC for data acquisition and the creation of datasets for research and development purposes.

KEYWORDS: Data Logger, Combustion Engines, Non-Invasive Sensors, Open-Source System, Monitoring and Fault Detection.

INTRODUÇÃO

A logística portuária desempenha um papel crucial na economia global, sendo responsável por aproximadamente 90% do comércio internacional. De acordo com o Plano Nacional de Logística e Transporte de 2015, estima-se que haverá um aumento de 92% na movimentação nos portos brasileiros até 2042, totalizando 1,8 bilhão de toneladas comercializadas.

A Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2022) e o World Population Review (2022) indicam que as emissões globais anuais de gases de efeito estufa (GEE) cresceram 41% desde 1990, com o setor de energia sendo responsável por 73% dessas emissões, e 15% deste total provenientes do setor de transporte. Este cenário ressalta a necessidade urgente de adoção de tecnologias sustentáveis no transporte aquaviário, alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 e os compromissos do Acordo de Paris para a neutralização do CO₂ até 2050 (SACHS et al., 2022). O Brasil comprometeu-se, no âmbito do Acordo de Paris, a reduzir suas emissões de CO₂ em 37% até 2025, com perspectiva de alcançar uma redução de 43% até 2030 (IEA et al., 2022; RUCKS et al., 2023).

O transporte naval é fundamental para o comércio global, sendo responsável por mais de 90% do transporte de mercadorias. No entanto, o setor enfrenta desafios significativos em relação à poluição atmosférica, especialmente em áreas costeiras. As emissões de CO₂ provenientes das atividades marítimas representam aproximadamente 3% do total global, com projeções indicando um aumento de até 250% até 2050. Em resposta a esse cenário, a Organização Marítima Internacional (IMO) tem estabelecido metas para reduzir a intensidade de carbono dos navios e promover a adoção de tecnologias de emissão zero até 2030 (MCCAFFERY et al., 2021; SEUNGMAN et al., 2023).

Considerando a relevância estratégica da indústria marítima para o comércio mundial e os imperativos de sustentabilidade propostos pela IMO, este projeto investiga o desenvolvimento de um dispositivo capaz de monitorar o sistema de transmissão mecânica das embarcações. Esse monitoramento visa não apenas melhorar a eficiência operacional, mas também reduzir as emissões de GEE ao otimizar a detecção precoce de falhas nos motores de combustão interna (MCI), componentes essenciais que podem sofrer falhas devido a erros de projeto, instalação, manutenção ou operação (SALGADO, 2013; SILVA, 2024).

Nesse contexto, o presente projeto visa desenvolver uma plataforma de telemetria naval para o transporte aquaviário de cabotagem que consistirá em um sistema embarcado de aquisição de dados, composto por hardware e software, que facilitará a telemetria de motores e outros dispositivos das embarcações, com comunicação integrada a um centro logístico através de IoT, computação em nuvem e um dashboard de controle em tempo real.

Entre os principais objetivos da plataforma estão: (i) Monitoramento da embarcação (localização, deslocamento, rota e velocidade); (ii) Diagnóstico de falhas de ignição, combustão e falhas nos motores; (iii) Monitoramento de dados dos motores (RPM, temperatura, pressão, nível de óleo, etc.); (iv) Controle do consumo e monitoramento da qualidade dos combustíveis; e (v) Auxílio na tomada de decisão de rotas pela disponibilização de dados e criação de histórico das embarcações (data lake).

Logo, como parte do desenvolvimento do projeto, tem-se a concepção e desenvolvimento de uma prova de conceito (PoC) que é essencial para validar a eficiência e viabilidade técnica da concepção do sistema de telemetria a ser desenvolvido. Com base na expertise dos pesquisadores e no estado da arte tecnológico, a PoC visa validar a funcionalidade e aplicabilidade em bancada para futuros usos na detecção de falhas em motor a combustão.

Portanto, este capítulo apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para monitoramento de motores a combustão em bancada, focando especialmente na criação e validação de uma prova de conceito (PoC). Os resultados dos testes preliminares apontam para a viabilidade da aplicação da PoC na detecção de falhas e no monitoramento das condições dos motores a combustão, delineando possíveis direções para pesquisas futuras, visando melhorar o sistema e sua aplicação em ambientes e condições operacionais.

O capítulo está estruturado em quatro seções principais que abordam diferentes aspectos do desenvolvimento da plataforma de telemetria naval para o transporte aquaviário de cabotagem. A Seção 1 introduz o contexto e os objetivos do projeto, enfatizando a relevância da logística portuária e os desafios ambientais enfrentados pelo setor marítimo. Na Seção 2, são detalhados os materiais e métodos utilizados, incluindo a seleção criteriosa dos componentes e a implementação da PoC. Os resultados preliminares são apresentados e discutidos na Seção 3, onde se analisa a viabilidade técnica da futura

aplicação da PoC como parte do sistema na detecção de falhas e no monitoramento das condições dos motores. Finalmente, a Seção 4 apresenta as principais considerações para uso em futuras pesquisas, explorando potenciais melhorias para uso em bancada da PoC em distintos cenários.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na seção de Materiais e Métodos, são apresentados os detalhes dos procedimentos utilizados para desenvolver e implementar a prova de conceito (PoC) do sistema de aquisição de dados de operação e falhas em motores a combustão em bancada. Apresenta-se a seleção dos componentes essenciais, como o microcontrolador ESP32 e os sensores não invasivos para aquisição de dados dos motores a combustão. Este capítulo aborda os métodos empregados para integrar os dispositivos e adquirir os dados para a criação de *datasets*.

Prova de Conceito (PoC): Detalhamento e Especificação

Para o desenvolvimento do projeto, visando uma metodologia de baixo custo e baixo esforço computacional utilizando técnicas não invasivas, optou-se pela utilização de Digital Signal Processors (DSP). Com base no estado da arte, selecionou-se uma placa microcontrolada equipada com o chip ESP32, que possui conectividade Wi-Fi integrada. Inicialmente, definiu-se quais tipos de dados deveriam ser coletados para o desenvolvimento do sistema de telemetria, sendo escolhidos: vibração, som, temperatura, nível de CO₂ e compostos orgânicos voláteis.

Analisando os dados necessários, selecionaram-se sensores e módulos disponíveis no mercado que fornecessem informações precisas. Com isso, iniciou-se o processo de criação do protótipo para testes. O primeiro passo foi a elaboração do diagrama esquemático, contendo o ESP32, módulos e sensores. Posteriormente, deu-se a soldagem dos componentes em uma PCB perfurada, sendo incluída ao conjunto uma bateria para suporte de funcionamento. Utilizou-se uma impressora 3D com filamento PLA para criar encaixes que acomodassem a PCB e a bateria, mantendo o sistema estável no ambiente de aplicação. Estes encaixes foram acoplados dentro de um perfil retangular de alumínio, criando uma estrutura rígida e fechada.

Para o primeiro teste, foi escrito o código para controle dos módulos e sensores utilizando a interface Arduino IDE. A Fig. 1 mostra o projeto 3D do PoC, onde podemos observar a tela informativa de operação do dispositivo (a), botões de controle (b), os sensores de CO₂ e compostos orgânicos (c), entrada USB para análise e reprogramação do ESP32, com o sensor de temperatura acima (d), microfone (e) e entrada para cartão MicroSD (f).

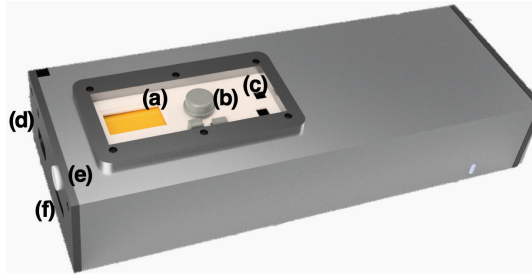


Figura 1 - Demonstrativo do Projeto 3D do PoC.

Fonte: Do Autor.

Placa Microcontrolada **ESP32**

O ESP32 é um microcontrolador desenvolvido pela Espressif Systems de baixo custo e alta eficiência, tendo como principais características a velocidade de processamento de até 240MHz, suporte a Wi-Fi e Bluetooth, e a grande quantidade de entradas e saídas (I/Os). Ele pode ser programado utilizando linguagem C/C++, compatível com a Arduino IDE e o ESP-IDF, e possui uma tensão de operação de 2.2V a 3.6V.

A escolha da placa para a implementação do PoC levou em consideração o baixo custo de mercado e a variedade de sensores e módulos compatíveis, além da conectividade Wi-Fi, alta capacidade de memória (520 KB de memória flash e 80 KB de memória RAM) e variedade de portas periféricas, como GPIO, UART, I2C e SPI. A Fig. 2 mostra o microcontrolador na PCB.

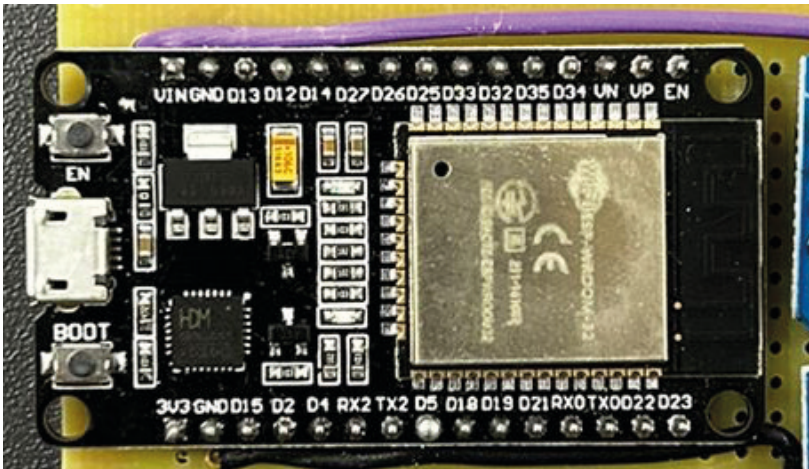


Figura 2 – Demonstrativo do ESP32 WROOM

Fonte: Do Autor.

Hardware para Captação de Som

Para a captação de som compatível com o ESP32, escolheu-se o módulo microfone GY-MAX4466 com ganho ajustável. O circuito é composto por um microfone de eletreto que opera na faixa de 20Hz a 20kHz, e um potenciômetro para ajuste de ganho, com comunicação analógica. O módulo GY-MAX4466 possui especificações técnicas que garantem um desempenho superior na captação de áudio: a tensão de operação varia entre 2,4V e 5,5VDC, com uma corrente quiescente de apenas $24\mu\text{A}$. Apresenta uma relação de rejeição da fonte de alimentação de 112dB e uma taxa de rejeição de modo comum de 126dB, proporcionando alta precisão e qualidade na captação de som. O módulo também possui um AVOL alto de 125dB ($R_L = 100k$), garantindo um ganho significativo. Suas dimensões são compactas, medindo 20mm x 10mm x 9mm, e pesa apenas 2,5g. A Fig. 3 apresenta o local onde os módulos foram instalados no gabinete.

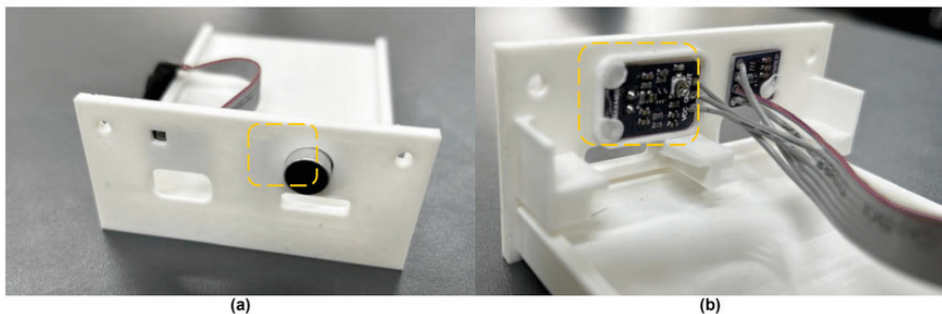


Figura 3 – Demonstrativo do (a) microfone (externo) e do (b) módulo do microfone (interno).

Fonte: Do Autor.

Hardware para Captação de Vibração

Para a captação de vibração que atenda aos requisitos do sistema de telemetria, uma alternativa viável é a medição do deslocamento dos eixos x, y e z do plano cartesiano. Esta abordagem permite identificar variações através da vibração, onde alterações nos pontos do plano ao longo do tempo revelam relações de amplitude e tempo. Convertendo esses dados do domínio do tempo para o domínio da frequência, podemos analisar as frequências presentes no sinal captado.

Nesse contexto, foi escolhido o módulo ADXL345 (Fig. 4), um acelerômetro de três eixos projetado para medir aceleração linear nas direções x, y e z. Amplamente utilizado em projetos com Arduino e outros microcontroladores, o ADXL345 possui uma resolução de 10 bits e permite configurar a faixa de medição entre $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ e $\pm 16g$, adaptando-se a diferentes níveis de aceleração.

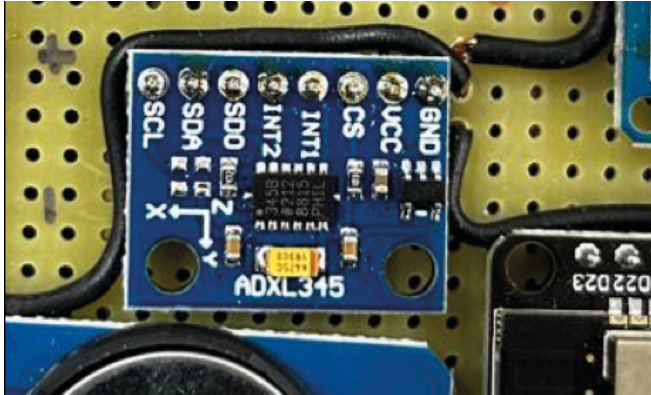


Figura 4 – Demonstrativo do módulo ADXL345.

Fonte: Do Autor.

A comunicação com o microcontrolador pode ser feita através das interfaces digitais I2C ou SPI, e opera com uma alimentação entre 3V e 5V, consumindo apenas $40\mu\text{A}$ em operação. Na Fig. 4 mostra o módulo conectado a PCB, sua comunicação é digital através do protocolo I2C, ele instalado no centro do dispositivo, permitindo que ele fosse montado na cabeça do motor, facilitando a identificação dos eixos.

Hardware para Captação de Temperatura

Para a medição precisa de temperatura, optou-se pelo uso de um sensor termopar do tipo K em conjunto com o módulo MAX6675. Este sensor é capaz de medir temperaturas na faixa de 0°C a 1024°C com uma resolução de $0,25^{\circ}\text{C}$, oferecendo uma precisão excepcional. A comunicação digital é realizada através da interface SPI de 3 fios. O módulo MAX6675 opera com uma faixa de tensão de 3,0 a 5,5V DC e consome cerca de 50mA durante a operação. Além disso, possui um circuito integrado para detecção de quebra do termopar, o que garante a integridade dos dados e alerta o usuário em caso de falhas. Suas dimensões são $32 \times 15 \times 14\text{mm}$ e pesa aproximadamente 5,8g com embalagem.

Na Figura 5.a, é apresentado o demonstrativo do sensor de temperatura tipo K, onde (i) representa a ponta de prova do sensor, (ii) é a chave liga/desliga, e (iii) é a entrada USB para carregamento do módulo de baterias. A Figura 5.b mostra o circuito do sensor integrado na PCB.

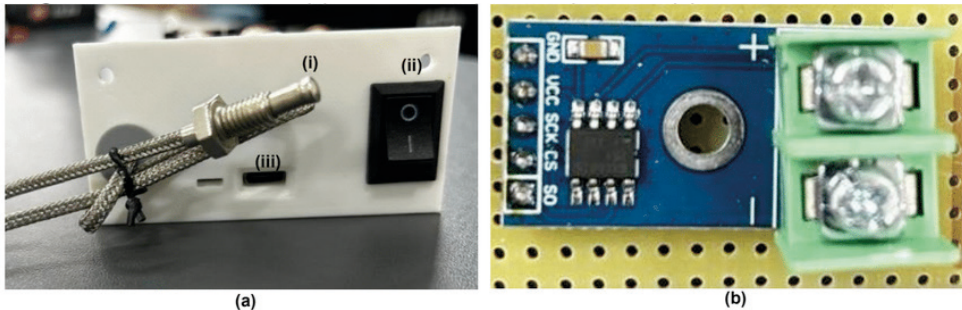


Figura 5 – Demonstrativo do (a) sensor de temperatura tipo K e do (b) módulo do sensor na PCB.

Fonte: Do Autor.

Hardware para Captação de Dados Ambientais

Juntamente, com o sensor de temperatura tipo K com o módulo MAX6675, foi integrado o sensor GY-BME280 (Fig. 6), que oferece medição precisa de temperatura, pressão atmosférica e umidade. Este módulo utiliza o sensor Bosch BME280 e suporta interfaces I2C (até 3,4MHz) e SPI (até 10MHz). Operando com uma faixa de tensão de 1,8 a 3,6V DC, o GY-BME280 mede umidade na faixa de 0 a 100%, temperatura de -40 a 85°C e pressão de 300 a 1100hPa. As margens de erro são de $\pm 0,008\%$ RH para umidade, $\pm 0,01^\circ\text{C}$ para temperatura e $\pm 1\text{Pa}$ para pressão.

O GY-BME280 tem dimensões compactas de 15,5x11,5x2,5mm e peso de apenas 1,5g facilitam a integração em diversos projetos, como estações meteorológicas e sistemas de navegação GPS, oferecendo um complemento essencial para a aquisição de dados ambientais em tempo real.

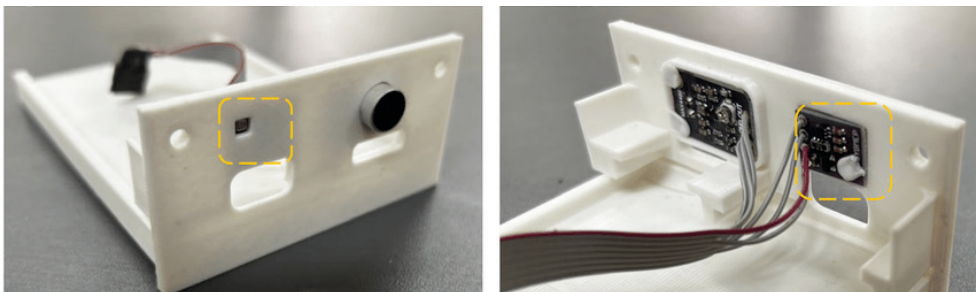


Figura 6 – Demonstrativo do (a) sensor GY-BME280 e do (b) módulo de aquisição do GY-BME280.

Fonte: Do Autor.

Já para monitorar o nível de CO₂ no ambiente, foi utilizado o sensor ENS160, projetado especificamente para monitorar a qualidade do ar. Este módulo é capaz de detectar uma ampla gama de gases e compostos orgânicos voláteis (COV), incluindo tolueno, hidrogênio, etanol, NO₂ e ozônio. O ENS160 possui dois sensores separados, um para gases orgânicos e outro para CO₂. Ele opera com protocolos I2C e SPI, suportando até quatro sensores de gás independentes e fornecendo múltiplas saídas de qualidade do ar (IAQ), como TVOC, eCO₂ e AQL.

O sensor tem uma faixa de operação de temperatura de -40 a +85°C e uma umidade relativa de 5 a 95% RH. Funciona com uma faixa de tensão entre 1,71 e 1,98V, oferecendo alta resistência a silicone e umidade. O sensor aquece em menos de um minuto e estabiliza em menos de uma hora, proporcionando medições precisas e rápidas.

No protótipo, o sensor ENS160 foi estrategicamente instalado na parte frontal do gabinete para maximizar a precisão da medição de CO₂. A Figura 7 ilustra o local de instalação do sensor e o módulo no protótipo.

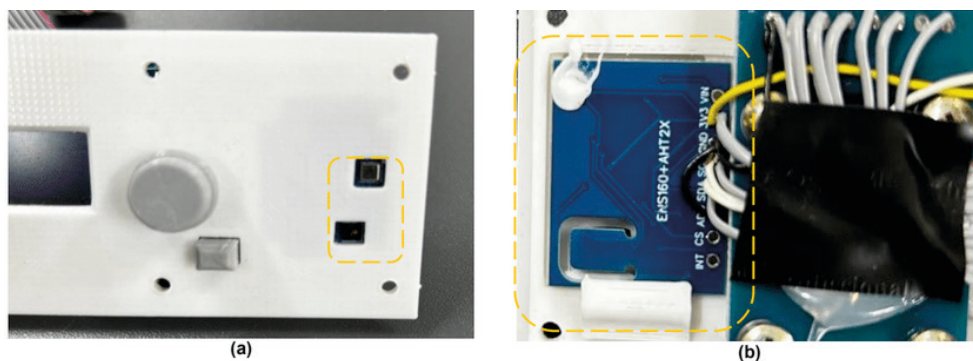


Figura 7 – Demonstrativo da instalação do ENS160 no Protótipo do (a) sensor e do (b) módulo.

Fonte: Do Autor.

Código de Programação

A programação do microcontrolador foi desenvolvida na interface do Arduino IDE visando integrar o código de cada sensor e módulo para que o protótipo pudesse captar simultaneamente as informações de todos os sensores durante os testes. Antes de iniciar os testes completos com todos os sensores, foi fundamental avaliar individualmente o funcionamento de cada um para otimizar o código ou ajustar os componentes, se necessário, caso algum dado apresentasse discrepâncias em relação ao esperado.

O código elaborado está disponível para download no artigo (AMORIM et al., 2024) através do seguinte link: <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1329.v1>

Para garantir o funcionamento adequado do sistema de aquisição de dados, foram incorporados componentes auxiliares essenciais para otimização, visualização em tempo real e armazenamento dos dados dos sensores, além de uma fonte de energia sustentável.

Display OLED e Joystick: Um display OLED com resolução de 128x64 pixels foi integrado para visualização dos dados em tempo real (Figura 8). Na linha superior do display, são exibidas a data e o status de gravação do dispositivo. Na segunda linha, são mostrados os valores capturados pelo microfone e pelo sensor de CO₂. A terceira linha apresenta a temperatura do sensor interno e externo, enquanto na última linha são exibidos os valores dos três eixos de vibração.

Módulo Joystick: Um módulo joystick com botões foi adicionado para facilitar a interação homem-máquina, permitindo uma operação intuitiva e navegação pelos menus (Fig. 9.a).

Armazenamento de Dados: Para o armazenamento dos dados, foi utilizado um módulo leitor e gravador de cartão Micro SD (Figura 9.b), acompanhado de um cartão de 16 GB formatado em FAT32. Isso possibilita a gravação dos dados durante os testes em formato de texto, garantindo alta capacidade e velocidade de armazenamento.

Fonte de Energia: O sistema é alimentado por baterias de lítio IMR18650 recarregáveis, com capacidade de 1800 mAh e autonomia superior a 6 horas de operação contínua (Fig. 9.c). Isso proporciona independência de cabos durante o funcionamento do dispositivo.

Módulo RTC (Real Time Clock): Para garantir a sincronização precisa dos dados coletados, foi incorporado um módulo RTC (Figura 9.d). Este módulo autônomo mantém registro da data, hora, minuto e segundo em que cada informação é capturada. Inclui uma bateria CR2032 para operação contínua sem conexão à rede elétrica.

Estrutura do PoC: A estrutura física do PoC é composta por uma PCB perfurada para acomodação dos componentes eletrônicos, fios AMG20 para conexão, módulo de carregamento da bateria, botão de ligar/desligar, e peças impressas em filamento PLA utilizando uma impressora 3D. O conjunto é montado em um perfil de alumínio para proporcionar estabilidade e proteção aos componentes (Figura 10). Onde, a Fig. 10.a mostra o perfil em alumínio com os recortes, acabamento e parafusos para comportar o conjunto da PCB (Fig. 10.b e Fig. 10.c), conjunto da bateria e conjunto display com botões (Fig. 10.d). Reunindo os conjuntos (Fig 10.e) insere-se no perfil de alumínio, sendo vista superior (Fig 10.f), vista lateral esquerda (Fig 10.g) e lateral direita (Fig 10.h), respectivamente.

Protótipo Concluído (PoC): Apresenta o protótipo desenvolvido como PoC para um sistema de aquisição de dados focado na detecção de falhas e monitoramento da condição de operação de motores a combustão em bancada (Fig. 11).



Figura 8 tela informativa OLED

Fonte: Do Autor

Este conjunto de componentes eletrônicos e estrutura física forma a prova de conceito (PoC) do sistema de aquisição de dados de operação e falhas em motores a combustão em bancada. Com a implementação do PoC, demonstra-se a capacidade do sistema para capturar, processar e exibir dados cruciais como vibração, temperatura, CO2 e outros parâmetros relevantes em tempo real. Além de prover autonomia energética através de baterias recarregáveis e sincronização temporal precisa com um módulo RTC, o PoC estabelece uma base para futuros desenvolvimentos e implementações, tanto na melhoria contínua do sistema quanto na expansão para diferentes aplicações e de pesquisa.

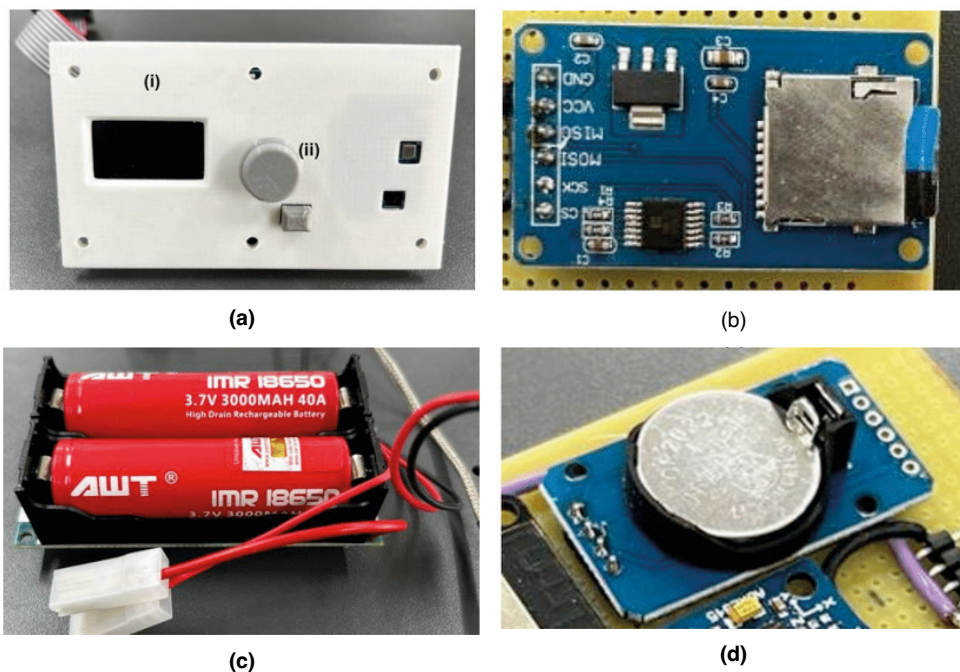
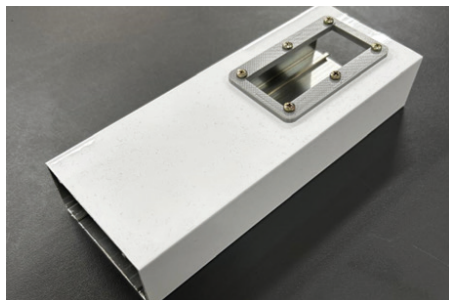
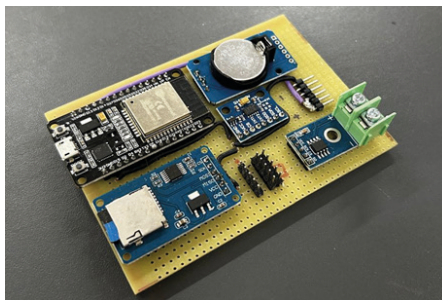


Figura 9 – Demonstrativo do (a) display (i) e do joystick (ii), do (b) módulo leitor e gravador de cartão Micro SD, da (c) bateria lítio IMR18650 e do (d) módulo RTC.

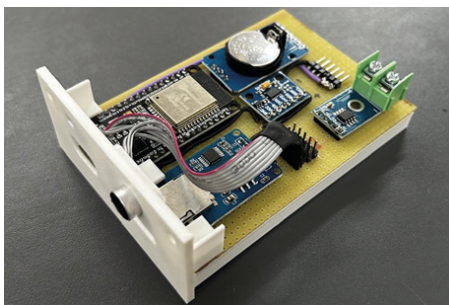
Fonte: Do Autor.



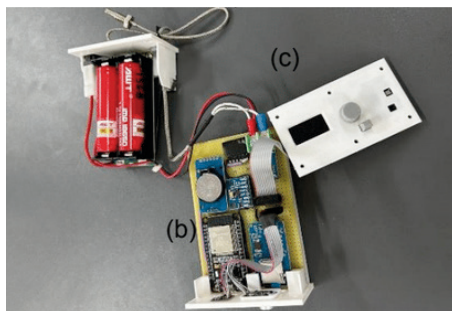
(a)



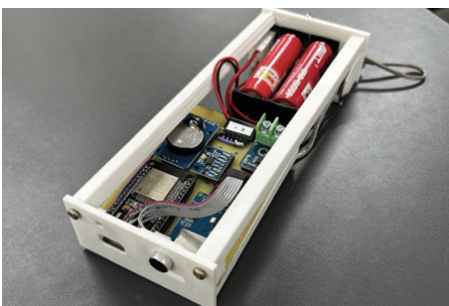
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(i)

Figura 10 – Demonstrativo das partes e peças que compõem a parte estrutural do PoC.

Fonte: Do Autor.



Figura 11 - Demonstrativo do Protótipo Concluído (PoC).

Fonte: Do Autor.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na implementação da prova de conceito (PoC) para o sistema de aquisição de dados voltado à detecção de falhas e monitoramento da condição operacional de motores a combustão em bancada. Os testes foram conduzidos utilizando um microcontrolador ESP32 e uma variedade de sensores não invasivos, conforme detalhado na seção de Materiais e Métodos.

Durante os testes preliminares em laboratório, o sistema demonstrou eficácia na coleta de dados. Os resultados indicam que os sensores integrados captaram parâmetros essenciais como vibração, som, temperatura e nível de CO₂, fundamentais para identificar irregularidades no funcionamento do motor. A integração do microcontrolador ESP32 com conectividade Wi-Fi possibilitou a coleta contínua e em tempo real dos dados, facilitando a análise e a tomada de decisões.

Os testes iniciais em ambiente laboratorial proporcionaram resultados satisfatórios, confirmando a funcionalidade do protótipo. A utilização de tecnologia open source e sensores não invasivos mostrou-se não apenas eficiente, mas também acessível em termos de custo, o que é crucial para sua implementação em diversas aplicações. Os dados coletados oferecem uma base sólida para o desenvolvimento futuro de técnicas de diagnóstico e algoritmos de detecção de falhas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento e a implementação do PoC para aquisição de dados em bancada demonstraram ser uma abordagem promissora para a detecção de falhas e monitoramento da condição de operação. A utilização de sensores não invasivos e componentes de baixo custo, como o ESP32, provou ser eficiente na coleta de dados para análise do desempenho do motor.

Com base nos resultados preliminares, serão realizadas alterações e melhorias para atender às demandas da pesquisa e aprimorar o sistema. Os testes iniciais em ambiente laboratorial forneceram resultados satisfatórios, confirmando a funcionalidade do protótipo. Futuras pesquisas poderão expandir esta abordagem, incluindo testes em condições operacionais de motores de combustão.

Além disso, a criação de um dataset a partir dos dados coletados poderá apoiar o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico não invasivas e algoritmos de detecção de falhas, contribuindo significativamente para a inovação tecnológica. Este capítulo apresenta os resultados iniciais de validação do PoC, que se encontra em fase de desenvolvimento de produto.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de N°407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 e 40666/2022-3. Os autores gostariam de agradecer a FACEPE (Fundação de Amparo à Pesquisa de Pernambuco) ao longo do projeto com referências APQ-0616-9.25/21 e APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. agradece ao apoio do Programa em Engenharia de Sistemas Energéticos (PPGESE) Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

REFERÊNCIAS

AMORIM, M. L. M.; LIMA, J. G.; SÁNCHEZ TORRES, N. N.; SALVADORI, F.; ANDO JUNIOR, O. H. Open-Source Code: Data Logger System for Monitoring and Fault Detection in Bench Testing of Combustion Engines. Preprints 2024, 2024061329. <https://doi.org/10.20944/preprints202406.1329.v1>

COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Índice ODS 2021 para América Latina y el Caribe.pdf. Bogotá, Colombia, ago. 2022.

IEA; IRENA; UNSD; World Bank; WHO. Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2022. Washington DC, 2022.

MACHADO, N. Transporte marítimo adota ambição de emissões líquidas zero até 2050. epbr. Disponível em: <https://epbr.com.br/transporte-maritimo-adota-ambicao-de-emissoes-liquidas-zero-ate-2050/>. Acesso em: 19 mai. 2024.

MCCAFFERY, C.; ZHANG, H.; KARAVALAKIS, G.; DURBIN, D. T.; MILLER, J.; JOHNSON, C. K. Sources of air pollutants from a Tier 2 ocean-going container vessel: main engine, auxiliary boiler. *Atmospheric Environment*, 2021. ISSN 1352-2310.

MORDOR INTELLIGENCE. Tamanho do mercado de transporte de carga marítima e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029). Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/global-maritime-freight-transport-market>. Acesso em: 19 mai. 2024.

RUCKS, S.; LEITE, L.; FERREIRA, I.; SALVE, S.; MUNIZ, E. Relatório Anual 2022 ONU Brasil. Nações Unidas, Brasília, DF, mar. 2023.

SACHS, J.; KROLL, C.; LAFORTUNE, G.; FULLER, G.; WOELM, F. Sustainable Development Report 2022. 1. ed. Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009210058.

SALGADO, D. A propulsão elétrica nos navios mercantes. Trabalho de conclusão de curso. Marinha do Brasil, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Curso de Oficiais da Marinha Mercante, 2013. Disponível em: <https://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000005/0000054d.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2024.

SEUNGMAN, H.; BYONGUG, J.; JANG, H.; PARK, C.; KU, B. A framework for determining the life cycle GHG emissions of fossil marine fuels in countries reliant on imported energy through maritime transportation: A case study of South Korea. *Science of the Total Environment*, v. 123, n. 4, p. 567-580, 2023. ISSN 0048-9697.

SILVA, D. Motores à combustão interna. MOTUL. Disponível em: <https://motulexpert.com.br/fenomenos-de-falhas-em-motor-a-combustao-interna/>. Acesso em: 19 mai. 2024.

WORLD POPULATION REVIEW. Gini Coefficient by Country 2022. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/>. Acesso em: 17 jun. 2024.