

RELATÓRIO DE MACROENTREGA 4

Otimização do Dispositivo Etilômetro Veicular PIFF-2306.0041

Período: 05/12/2024 a 04/03/2025

Item	Critérios de Aceitação	Produto
2.1 MRUs Comerciais	Relatório contendo informações dos MRUs comerciais.	Relatório
2.2 Módulos IMU	Relatório contendo informações do IMU.	Relatório
2.3 Sensores	Relatório contendo informações dos sensores pesquisados e selecionados para o projeto.	Relatório
2.4 Definição da Solução Técnica	Relatório contendo informações das soluções técnicas sugeridas e apresentadas ao parceiro.	Relatório
3.1 Calibração Externa (Acutronic)	Relatório contendo informações sobre os tipos, normas e formas de calibração.	Relatório
3.2 Hexapod	Relatório contendo informações sobre os modelos, valor de importação e meios de fabricação.	Relatório
3.3 Atuadores (Pesquisados)	Relatório contendo informações referentes aos atuadores pesquisados.	Relatório
3.3 Atuadores (Soluções Técnicas)	Relatório contendo informações das soluções técnicas sugeridas e apresentadas ao parceiro.	Relatório
3.4 Definição da Solução Técnica	Relatório contendo informações das soluções técnicas sugeridas e apresentadas ao parceiro.	Relatório

DIRETOR DO PICG
Leonardo Oliveira Tavares

DIRETOR DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
Rogério Atem de Carvalho

DIRETORA DE GESTÃO DE PROJETOS
Juliana de Souza Monteiro de Matos

COORDENADOR DO PROJETO
Robson da Cunha Santos

PESQUISADORES
Gerson Gomes Cunha
Milena Bissonho Soares

ESTUDANTES
Jean Viana Ribeiro
Letícia Barcelos Reis
Matheus Ribeiro Vidal
Klauss Miranda Marchi
Matteus Araujo Ouverney
Gabriel Caldas Dos Santos
Gabriel Renato Pereira Campos
Paulo Mauricio Silva Gonzalez Junior

Sumário

1 Introdução	5
1.1 Objetivo Geral	6
1.2 Objetivos Específicos	6
2 Pesquisa de Sensores e Módulos	7
2.1 MRUs Comerciais	7
2.2 Módulos IMU	9
2.3 Módulos Sensoriais	11
2.4 Definição da Solução Técnica	13
2.4.1 Requisitos	13
2.4.2 Equipe 1	15
2.4.3 Equipe 2	16
2.4.4 Equipe 3	16
2.4.5 Esquematização Geral	16
3 Pesquisa de Atuadores	18
3.1 Calibração Externa (Acutronic)	18
3.2 Hexapod	20
3.3 Atuadores (Pesquisados)	21
3.4 Atuadores (Soluções Técnicas)	22
3.5 Definição da Solução Técnica	23
3.5.1 Comparação de Calibradores	24
4 Metodologia de Execução	25
5 Conclusão	25

List of Figures

1	MRU Fabricado pela Flagship Technology	7
2	VN-300 DUAL GNSS/INS	9
3	Giroscópio HWT901B	11
4	Sistema Exemplo de Monitoramento de Inclinação	13
5	Prototipagem de um Circuito Simples de Acelerômetro	14
6	Diagrama Esquemático da Solução Técnica	17
7	Sistema de Calibração da Kongsberg	18
8	Hexapod de 6 Eixos	20
9	Plataforma Personalizada do Movimento	21
10	Prototipagem de Simulador de Movimento	22
11	Controle Preditivo Pêndulo Invertido Rotatório	23

List of Tables

1	Comparação de MRUs	8
2	Comparação de 4 Sensores Inerciais com Preço Informado	10
3	Comparação de Sensores Acelerômetros/Giroscópios	12
4	Comparação de Dispositivos de Mercado	15
5	Comparação de Hexapods	20
6	Comparação de Atuadores de Calibração	24

1 Introdução

As operações em plataformas para aproximação de aeronaves e preparação para pouso em helideques, bem como para a movimentação de guindastes marítimos, enfrentam desafios críticos de segurança, especialmente devido às condições instáveis do oceano. A falta de um dispositivo e sistema nacional capaz de acompanhar os movimentos dessas estruturas obriga as empresas a recorrerem a equipamentos estrangeiros de referência de movimento (MRUs), que possuem alto custo de importação, manutenção complexa e dificuldades de integração a sistemas locais. Para suprir essa demanda, o projeto propõe a criação de um Dispositivo Nacional de Referência de Movimentos (DNRM), capaz de fornecer medições precisas em tempo real, aumentando a segurança e reduzindo custos operacionais no setor offshore brasileiro.

A eficácia do monitoramento depende da integração de tecnologias de sensores, processamento rápido de dados e comunicação estável. O DNRM combinará acelerômetros, giroscópios e magnetômetros de alta performance, calibrados para operar em ambientes salinos e com vibrações constantes. O sistema incorporará algoritmos de filtragem adaptativa para eliminar interferências causadas por ondas, ventos e maquinário, além de um firmware especializado para sincronizar e interpretar múltiplos sinais simultaneamente. Essa arquitetura garantirá compatibilidade com softwares de gestão já utilizados pela indústria, dispensando adaptações custosas.

Do ponto de vista econômico, o projeto prioriza a otimização de recursos em todas as etapas, desde a seleção de componentes duráveis até a automação do processo de calibração. A fabricação nacional do dispositivo permitirá reduzir em até 60% os gastos com aquisição e manutenção em comparação aos modelos importados, segundo análises preliminares. A diminuição da dependência de fornecedores externos também mitigará riscos logísticos, como atrasos na reposição de peças, contribuindo para a previsibilidade orçamentária das operadoras.

A implementação do DNRM representa um avanço estratégico para a indústria offshore, alinhando inovação tecnológica e sustentabilidade financeira. Além de substituir equipamentos estrangeiros, o dispositivo incorporará um protocolo de autoverificação contínua, assegurando confiabilidade sem necessidade de intervenção humana frequente. Testes piloto em plataformas da Bacia de Campos validarão sua eficiência sob condições reais, com perspectivas de expansão para outros segmentos navais. A iniciativa fortalece a autonomia tecnológica do setor, oferecendo uma solução adaptada às especificidades do mercado nacional.

Objetivos

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo funcional com tecnologia nacional de um Dispositivo de Referência de Monitoramento dos Movimentos em Helidecks e Guindastes Offshore para aplicação em helidecks e guindastes offshore, capaz de garantir alta precisão, confiabilidade e segurança em ambientes marítimos, que seja compatível com os softwares existentes no mercado.

1.2 Objetivos Específicos

1. Implementar mecanismos de aquisição em tempo real (roll, pitch, yaw, aceleração e vibração) com alta confiabilidade e precisão.
2. Desenvolver sistema de análise e visualização gráfica para diagnóstico de anomalias e suporte à decisão.
3. Integrar a interface de visualização aos sistemas de controle, garantindo rastreabilidade e interoperabilidade.
4. Identificar e determinar as características e parâmetros essenciais dos MRUs disponíveis comercialmente, para garantir que o protótipo atenda às exigências do setor.
5. Avaliar e selecionar alternativas de sensores e módulos que ofereçam o melhor desempenho em condições offshore.
6. Desenvolver circuitos eletrônicos robustos e firmware otimizado para processamento de dados de movimento em tempo real.
7. Criar um software de comunicação eficiente que permita a integração do dispositivo com sistemas de controle e monitoramento existentes.
8. Estudar e definir um processo de calibragem preciso para assegurar a exatidão das medições em diferentes condições operacionais.
9. Produzir um protótipo funcional, realizando testes rigorosos para validar seu desempenho em aplicações reais.

2 Pesquisa de Sensores e Módulos

As principais variáveis de interesse são a aceleração e a inclinação nos três eixos. A pesquisa abrangerá os MRUs (Unidades de Referência de Movimento), que monitoram deslocamentos em estruturas offshore, os IMUs (Unidades de Medição Inercial), que integram acelerômetros e giroscópios para medir posição e orientação, e os sensores embutidos, responsáveis pela captura precisa dos movimentos e vibrações. Esta seção abordará a pesquisa destes dispositivos separadamente.

2.1 MRUs Comerciais

Os MRUs são dispositivos de medição inercial projetados para capturar dados precisos de inclinação (roll, pitch, yaw), aceleração e velocidade angular em estruturas móveis, como helidecks e guindastes offshore. Eles utilizam acelerômetros para medir acelerações lineares e giroscópios para detectar rotações em torno dos três eixos. As figuras 1a e 1b mostram um desses dispositivos pesquisados.

Figura 1: MRU Fabricado pela Flagship Technology

(a) MRU19A



(b) MRU19B



Fonte: <http://en.flag-ship.cn/>

Para maior precisão, os MRUs aplicam filtros digitais, como o de Kalman, que combinam os dados dos sensores para reduzir ruídos e minimizar erros acumulados. Essas medições são essenciais para corrigir oscilações e garantir a estabilidade em operações críticas no ambiente marítimo. Neste estudo, foram consideradas as principais características técnicas que permitem a seleção do dispositivo mais adequado para servir como referência e padrão nas futuras implementações.

Os quatro melhores MRUs foram selecionados com base nesses critérios e estão apresentados na Tabela 1. Dentre as especificações escolhidas, destaca-se a faixa angular, que indica a amplitude de ângulos que cada dispositivo pode medir, e a precisão estática em roll e pitch, que avalia a exatidão das medições de inclinação em condições estáticas. Além disso, é analisada a precisão dinâmica para ângulos de até 5°, essencial para operações em movimento. A proteção contra água e poeira é especificada pela classificação IP.

Tabela 1: Comparação de MRUs

Especificação	Guidance Marine IMU	InertialLabs MRU-E	SBG Ellipse Series	Kongsberg MRU H
Faixa Angular	±30°	±90°, ±180°	360°	±180°
Precisão Estática Roll & Pitch	0.02° RMS	0.03° RMS	±0.05° RMS	0.03° RMS
Precisão Dinâmica (±5°)	0.03° RMS	0.06° RMS	0.12° RMS	0.010° 1-sigma
Proteção (IP)	IP67	IP66	IP66	IP66
Peso	2 kg	280 g	45 g	2.2 kg
Saída de Dados	NMEA0183	RS-422, RS-232	RS-232, RS-422	Ethernet, RS-232
Ruído Angular (Giroscópio)	N/A	0.004°/s	0.0035°/s	0.015°/s RMS
Ruído Acelerômetro	0.01 m/s² RMS	0.025 mg	0.14 mg/√Hz	0.002 m/s² RMS
Material	Alumínio Anodizado	Anodizado	Alumínio Anodizado	Anodizado
Fonte	Ship Motion Control	Inertial Labs	SBG Systems	Kongsberg

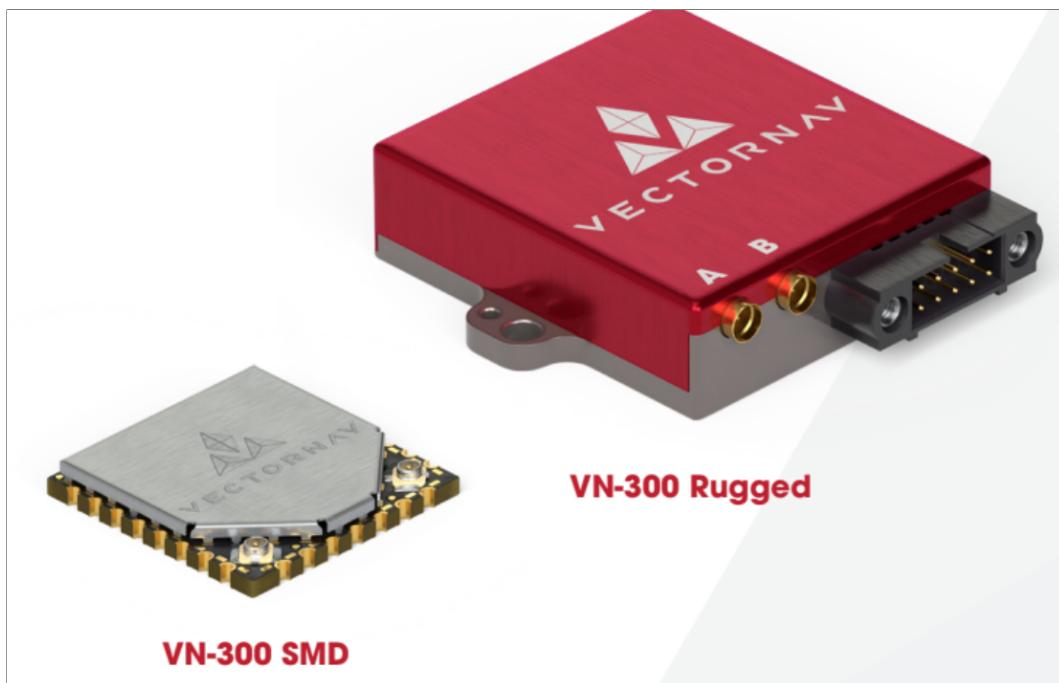
Fonte: Autoria Própria (*Google Drive*)

Outros aspectos considerados incluem o peso dos dispositivos e os protocolos de saída de dados, como NMEA0183, RS-232, RS-422 e Ethernet, que garantem a compatibilidade com diferentes sistemas. Em relação ao desempenho, a tabela avalia o ruído angular do giroscópio (em graus por segundo) e o ruído do acelerômetro (em m/s² ou mg), que refletem a precisão das medições. Por fim, destaca-se o material de construção, predominantemente alumínio anodizado, que confere resistência e durabilidade aos dispositivos.

2.2 Módulos IMU

Os IMUs (Unidades de Medição Inercial) são módulos que integram acelerômetros, giroscópios e, em alguns casos, magnetômetros para medir aceleração linear, velocidade angular e orientação no espaço. Os acelerômetros detectam mudanças de velocidade nos três eixos, enquanto os giroscópios medem a taxa de rotação. Quando presentes, os magnetômetros ajudam a corrigir desvios na orientação usando o campo magnético terrestre. Assim como os MRUs, os IMUs também processam esses dados por meio de filtros dedicados, garantindo medições mais precisas ao minimizar ruídos e erros acumulados. Eles são amplamente utilizados em navegação, estabilização de plataformas e controle de movimentos em sistemas embarcados e aplicações offshore.

Figura 2: VN-300 DUAL GNSS/INS



Fonte: VectorNav

A Figura 2 apresenta o dispositivo VN-300 DUAL GNSS/INS, um sistema de navegação inercial (INS) de alto desempenho, auxiliado por GNSS e equipado com uma bússola GNSS integrada. O dispositivo combina sensores iniciais baseados em MEMS, dois receptores GNSS de alta sensibilidade e algoritmos avançados de filtragem de Kalman, proporcionando estimativas precisas de posição, velocidade e atitude. Embora esses dispositivos possuam um custo mais elevado, sua aquisição é justificada pela alta confiabilidade e robustez, sendo amplamente testados e validados no mercado. Essa característica reduz significativamente o tempo necessário para o desenvolvimento do projeto, permitindo que o foco seja direcionado à implementação do software de monitoramento, uma vez que o sensor utilizado já oferece precisão e eficiência comprovadas.

Tabela 2: Comparação de 4 Sensores Inerciais com Preço Informado

Especificação	IMX-5 (InertialSense)	ADIS16488A (Analog Devices)	ADIS16495-2 (Analog Devices)	MTi-G-710 (Xsens)
Tecnologia	MEMS	MEMS	MEMS	MEMS
Faixa de Giro ($^{\circ}/s$)	± 4000	± 450	± 450 a ± 480	± 450
Faixa de Aceleração (g)	± 16	± 18	± 8	± 16
Taxa Máxima de Saída	1000 Hz (IMU), 200 Hz (AHRS)	2.4 kHz	4.25 kHz	Até 2000 Hz
Tensão de Alimentação	4.5–20 V	3.0–3.6 V	3.0–3.6 V	3.3 ou 4.5–34 V
Interface	USB, UART, RS232, RS485, CAN, SPI	SPI	SPI	USB, RS232, RS422, UART
Dimensões (mm)	$30.5 \times 25.4 \times 14.8$	$47 \times 44 \times 14$	$47 \times 44 \times 14$	$57 \times 41.9 \times 23.6$
Peso (g)	14	48	42	58
Faixa de Preço (USD)	\$3999	\$2.713,83	\$3.891,46	\$ 5.379,00
Fonte	Inertial Sense	Analog Devices	Analog Devices	Movella

Fonte: Autoria Própria (*Google Drive*)

A Tabela 2 apresenta a comparação entre os IHMs selecionados como os mais adequados para o projeto, considerando dispositivos com comportamentos similares e que atendem aos critérios essenciais de precisão e confiabilidade. Tais dispositivos foram escolhidos por alinharem-se ao escopo do projeto, oferecendo uma solução tecnicamente viável e financeiramente vantajosa. Em comparação com os MRUs, que possuem um custo elevado e menor possibilidade de parametrização, os IHMs selecionados proporcionam maior flexibilidade no desenvolvimento, facilitando a implementação de novas funcionalidades e aprimoramentos conforme as necessidades do sistema.

2.3 Módulos Sensoriais

Assim como as Unidades de Medida Inercial (IMUs), os módulos de sensores que incorporam acelerômetros e giroscópios operam com base no mesmo princípio de medição. No entanto, esses módulos apresentam vantagens em termos de custo reduzido, compactação e integração de funcionalidades de filtragem e processamento diretamente no próprio sensor. Essa característica proporciona maior autonomia no desenvolvimento, permitindo maior flexibilidade na personalização e parametrização do dispositivo, de acordo com os requisitos específicos do projeto. A figura 3 se refere a um módulo pesquisado com filtros embutidos e alta precisão de operação.

Figura 3: Giroscópio HWT901B



Fonte: AliExpress

Os sensores serão utilizados em testes de bancada conduzidos pela equipe de desenvolvimento. A medição da aceleração e inclinação em tempo real será realizada por meio de acelerômetros e giroscópios integrados a módulos responsáveis pelo sensoriamento e processamento dos dados. Esses módulos incorporam técnicas de filtragem e comunicação por protocolos específicos, proporcionando maior precisão em comparação à leitura analógica direta. Diante disso, os principais sensores foram analisados, e suas características estão detalhadas na tabela comparativa.

Tabela 3: Comparação de Sensores Acelerômetros/Giroscópios

Especificação	HWT9053-485	WTGAHRS3	HWT901B	MPU-6050
Precisão Angular	$\pm 0.001^\circ$	0.05° (estático), 0.1° (dinâmico)	0.05°	$\pm 0.05^\circ$
Interface	RS485 Modbus	TTL/RS232/485	TTL/RS232/485	I ² C, SPI
Tensão de Alimentação	5-36V	5-36V	3.3-5V (TTL), 9-36V (RS232/RS485)	2.375V-3.46V
Frequência Máxima de Saída	921600 baud	200Hz	200Hz	1kHz
Resistência à Água	IP67	IP67	Não especificado	Não especificado
Chip Principal	ADXL355 + MMC3630	ICM4260X	RM3100	MPU-6050
Peso	Sensor: 52.8g, Cabo: 43.7g	Não especificado	Não especificado	4x4x0.9mm (QFN)
Saída de Dados	aceleração e inclinação	aceleração, inclinação, latitude e longitude	aceleração, ângulo e taxa angular	aceleração e inclinação
Consumo de Corrente	Não especificado	<40mA	40mA típico	3.9mA (com DMP)
Faixa de Temperatura	-40 a +85 °C	-40 a +85 °C	-40 a +85 °C	-40 a +85 °C
Link	AliExpress	AliExpress	Fonte	RoboCore

Fonte: Autoria Própria (*Google Drive*)

Os dispositivos serão adquiridos a fim de avaliar a precisão e a confiabilidade do sistema. Com base nessas análises, será desenvolvido um software de monitoramento, que será implementado em um microprocessador para viabilizar a aquisição e o processamento dos dados, permitindo a apresentação das informações. O microprocessador deverá contar com um circuito dedicado, integrado aos sensores, possibilitando a fabricação de uma placa de circuito impresso específica para o projeto. Além disso, fatores ambientais, como temperatura e umidade, devem ser considerados, uma vez que o encapsulamento do sistema deverá garantir resistência a testes de submersão e exposição a altas temperaturas.

2.4 Definição da Solução Técnica

O produto final do projeto será um Dispositivo de Referência de Monitoramento dos Movimentos (DRMM), um MRU (Motion Reference Unit) nacional desenvolvido especificamente para aplicações em helidecks e guindastes offshore.

2.4.1 Requisitos

Dentre os principais requisitos de aceitação do projeto pelo cliente no que se refere ao dispositivo, o produto final deve conter:

1. Sensores de última geração, incluindo acelerômetros e giroscópios de alta precisão.
2. Firmware customizado, com algoritmos de filtragem de ruído e fusão sensorial.
3. Software de comunicação avançado, permitindo integração com sistemas supervisórios offshore.
4. Calibragem automatizada, garantindo medições confiáveis ao longo do tempo.
5. Design modular e escalável, facilitando futuras atualizações e adaptações para diferentes aplicações offshore.

O projeto inclui um sistema de indicação de dados ao usuário, assegurando que as informações coletadas pelos sensores sejam processadas e apresentadas de forma acessível para supervisão e tomada de decisões. A pesquisa realizada pela **SMC MRU Motion Lab** possibilitou uma compreensão mais aprofundada sobre a estruturação desse sistema.

Figura 4: Sistema Exemplo de Monitoramento de Inclinação



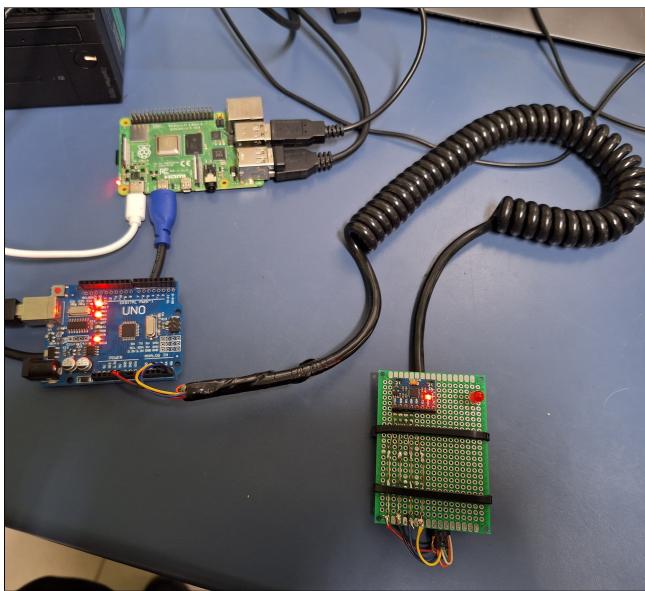
Fonte: YouTube

Conforme ilustrado na Figura 4, é possível observar um sistema de monitoramento gráfico do dispositivo, no qual uma superfície é inclinada por atuadores em um movimento senoidal, exibindo graficamente a posição vertical do ponto focal, representado pelo sensor. Esse sistema poderá ser aprimorado por meio do desenvolvimento de um software dedicado, sendo necessário definir a abordagem mais adequada para sua implementação.

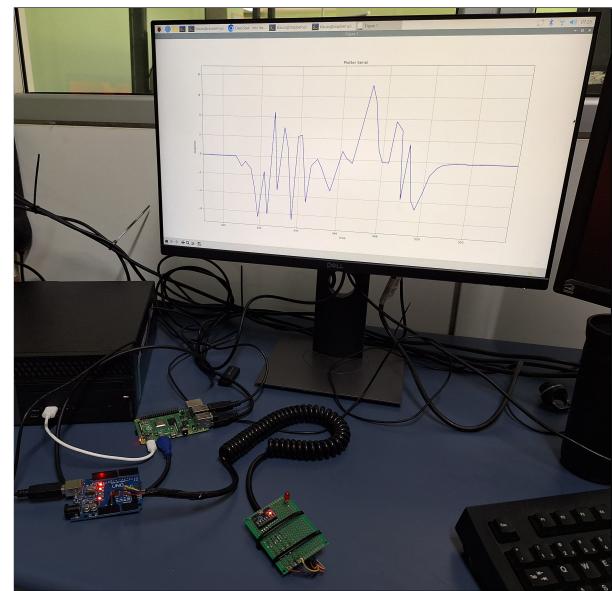
Com intuito de obter maior compreensão acerca das variáveis de estudo, a equipe projetou circuito base de como funcionaria o sistema utilizando o sensor MPU6050, que constitui um acelerômetro e um giroscópio conectados em um Arduino que por comunicação I2C, recebe dados de aceleração e inclinação no tempo e os envia para um microprocessador Raspberry PI, que aplica um filtro de Kalman Simples nos dados de aceleração para filtrá-los e convertê-los para posição e velocidade. A figura subsequente mostra a implementação feita para fins de teste.

Figura 5: Prototipagem de um Circuito Simples de Acelerômetro

(a) Componentes



(b) Simulação



Fonte: Autoria Própria

Existem diversas formas de alcançar uma solução técnica satisfatória, e cada uma traz riscos específicos. A aquisição de módulos MRU prontos no mercado, por exemplo, simplificaria o processo ao exigir apenas a criação de uma interface e a comunicação com o microprocessador. Ainda assim, essa via pode se tornar inviável financeiramente, seja pelo alto custo, seja pela falta de retorno econômico.

Em contrapartida, construir um MRU a partir de sensores individuais implica desenvolver algoritmos para filtrar os dados, integrar diferentes sensores, projetar o encapsulamento e realizar testes de robustez. Mesmo assim, há o risco de não se atingir a precisão esperada, além de demandar um longo período para homologação e patenteamento. A Tabela 4

mostra uma comparação entre os diferentes dispositivos com base em suas vantagens e desvantagens de mercado.

Tabela 4: Comparação de Dispositivos de Mercado

Critério	MRUs	IMUs	Módulos Sensoriais
Precisão	Alta	Média	Baixa a Média
Custo	Alto	Médio	Baixo
Nível de Parametrização	Baixo	Médio	Alto
Facilidade de Integração	Média	Média	Alta (exige maior esforço de desenvolvimento)
Robustez	Alta	Média	Baixa a Média
Durabilidade	Alta	Média	Baixa a Média
Compatibilidade	Sim (protocolos marítimos e industriais)	Sim (dependendo do modelo)	Não (exige "bridge" ou firmware custom)

Fonte: Autoria Própria

Apesar da alta precisão dos MRUs, a facilidade de integração e parametrização são relativamente baixas, o que impede autonomia da equipe para manutenção e desenvolvimento de novas funcionalidades. Entretanto, o estudo e pesquisa permitirão desvendar se é possível aumentar a precisão a partir de sensores menos potentes através de algoritmos avançados como redes neurais ou ajuste de funções multivariáveis. Assim sendo, para otimizar o projeto e evitar desperdiçar recursos em alternativas que podem não funcionar, decidiu-se dividir o trabalho em três equipes autônomas, cada uma focada em uma dessas abordagens.

2.4.2 Equipe 1

A primeira equipe deverá adquirir os módulos de acelerômetros e giroscópios, comprendendo seu funcionamento e protocolo de comunicação. Caso necessário, será conduzido um estudo sobre técnicas de filtragem de dados, como filtros de frequência e o filtro de Kalman, para assegurar a precisão das medições. Os dados serão exibidos em tempo real nas coordenadas x, y e z, permitindo a visualização da posição atual por meio de software dedicado. Para viabilizar o processamento das informações, será realizada a pesquisa e seleção de um processador adequado, considerando sua capacidade de executar operações matemáticas com eficiência. Além disso, fatores ambientais, como o aquecimento do compartimento onde o MRU será instalado, deverão ser analisados para prevenir supera-

quecimento e garantir a resistência do sistema, essencial para a realização dos testes de submersão.

2.4.3 Equipe 2

A segunda equipe realizará a pesquisa e aquisição de sensores e módulos, como MRUs, que possuam funcionalidades integradas, com dados previamente filtrados e processados, visando otimizar tempo e recursos no desenvolvimento do projeto. Além disso, deverá ser estabelecida a comunicação desses dispositivos com o software de monitoramento desenvolvido em paralelo. Os dados obtidos a partir dos MRUs comerciais servirão como referência para a equipe responsável pelo processamento, permitindo uma comunicação bilateral entre os grupos. Essa abordagem possibilita a implementação de um sistema de contingência, garantindo que, em caso de falha no processamento desenvolvido, os MRUs adquiridos possam ser utilizados como fonte principal de dados, assegurando a continuidade das operações e o aprimoramento das funcionalidades do projeto.

2.4.4 Equipe 3

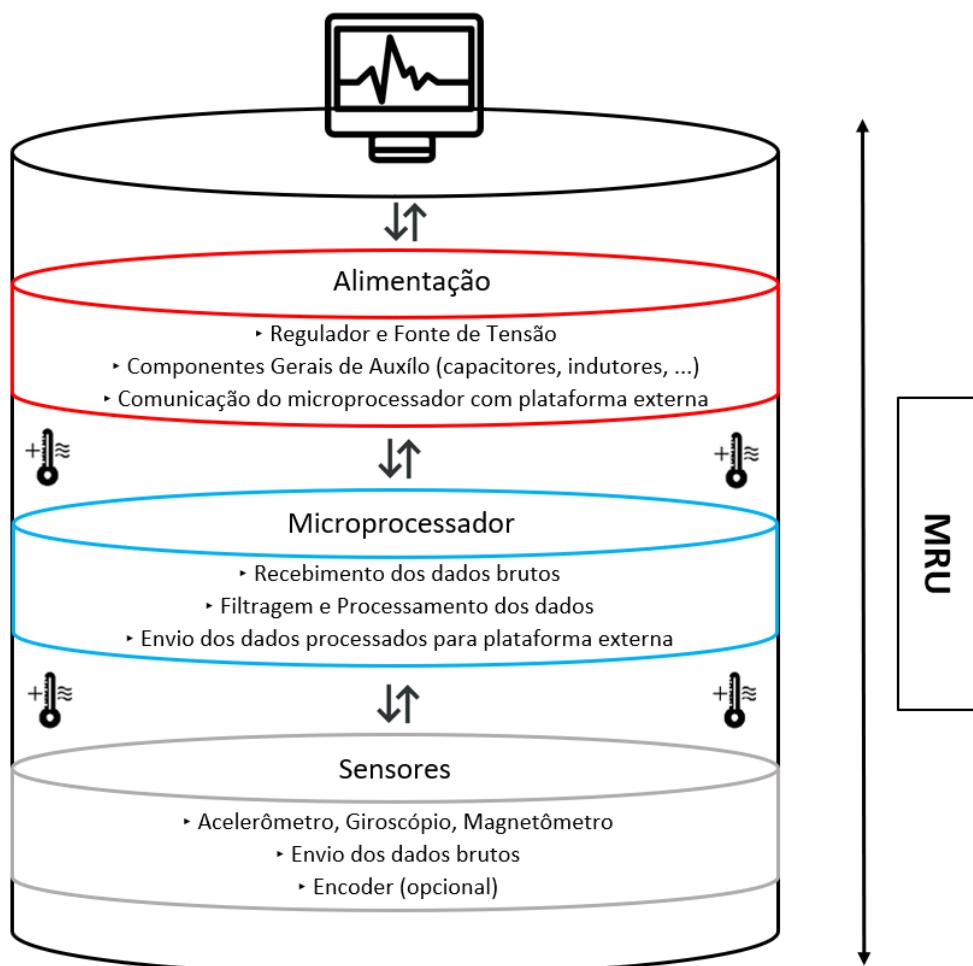
A terceira equipe será responsável por identificar e estabelecer os principais protocolos de comunicação utilizados para a integração com os MRUs, garantindo compatibilidade com os desenvolvimentos realizados pelas equipes 1 e 2. O desenvolvimento será conduzido de forma paralela e independente, possibilitando a integração com os módulos selecionados por qualquer uma das equipes. Adicionalmente, essa equipe terá a função de pesquisar e cotar serviços de calibração, além de viabilizar a aquisição de hexapods para a criação de um ambiente adequado para testes e validação do sistema.

2.4.5 Esquematização Geral

Independentemente da abordagem adotada ao final do projeto, observa-se um padrão geral de estrutura necessário para a construção do dispositivo. Essa estrutura pode ser desenvolvida a partir do estudo de sistemas similares que possuam objetivos equivalentes. Nesse contexto, a Figura 6 ilustra a ideia geral do produto, contemplando processos de comunicação, aquisição e filtragem de dados. Ressalta-se ainda que a sequência ou a ordem dos componentes pode variar, sendo esta disposição apresentada apenas para fins de visualização e compreensão geral dos elementos e de sua integração com diferentes dispositivos e sensores.

Os sensores constituem a base do sistema e podem ser IMUs integradas ou módulos que reúnam magnetômetros, giroscópios e acelerômetros, com ou sem sistemas de filtragem ou pré-processamento embutidos. Também é possível empregar múltiplos sensores da mesma grandeza para obter redundância e aprimorar a precisão das leituras, permitindo comparações. Além disso, encoders ou conversores digitais podem ser instalados próximos aos sensores para preparar e enviar os dados à camada superior.

Figura 6: Diagrama Esquemático da Solução Técnica



Fonte: Autoria própria

O microprocessador é responsável pelo processamento de dados e pela obtenção de variáveis essenciais para o objetivo do sistema. Ao receber as informações dos sensores, organiza-as e as envia para a plataforma externa (primeira camada). É fundamental considerar o sobreaquecimento do compartimento que abriga os componentes, selecionando um dispositivo com baixa geração de calor e um material de invólucro que proporcione boa dissipação térmica, além de ser resistente e robusto. Assim, evitam-se problemas de superaquecimento e possíveis danos causados por umidade ou líquidos.

3 Pesquisa de Atuadores

Os atuadores serão utilizados no projeto para a calibração dinâmica do Dispositivo de Referência de Monitoramento dos Movimentos (DRMM), permitindo a simulação controlada de oscilações, inclinações e acelerações. Sua aplicação possibilita a avaliação da resposta dos sensores, o ajuste de parâmetros, a correção de erros e a validação dos algoritmos de fusão de dados, garantindo medições precisas e confiáveis antes da operação em ambientes offshore.

3.1 Calibração Externa (Acutronic)

Com objetivo de garantir que o produto final atinja o mesmo nível de precisão e confiabilidade dos equipamentos de referência disponíveis no mercado, busca-se validar se o dispositivo é capaz de medir de forma correta roll, pitch e heave (ou demais graus de liberdade), dentro das tolerâncias especificadas, sob condições controladas de rotação, aceleração e temperatura. Esse conjunto permite formular um sistema de calibração que deve possuir requisitos que permitem alcançar as metas estabelecidas.

A Figura 7 mostra um sistema de calibração funcional desenvolvido pela empresa Kongsberg. Dessa forma, o estudo destaca justamente o uso de máquinas de calibração de dois eixos com câmara climática integrada (Acutronic) para assegurar que cada MRU saia de fábrica (ou retorno de um serviço de recalibração) dentro das especificações de fábrica.

Figura 7: Sistema de Calibração da Kongsberg



Fonte: Kongsberg

A Acutronic produz mesas de calibração e ensaio (turntables) de dois ou mais eixos, capazes de posicionar o MRU em diferentes ângulos (roll e pitch, por exemplo) e em varia-

das velocidades de rotação. O procedimento descrito consiste em colocar o dispositivo em uma mesa de testes Acutronic, aplicar rotações e ciclos de temperatura para medir, ajustar e validar, e, por fim, emitir um certificado de calibração que atesta se o MRU atende aos limites de erro especificados. Com isso, pode-se criar um roteiro padrão do que deve ser feito para a calibração do dispositivo desenvolvido.

1. O MRU é fixado na plataforma de teste para que cada eixo de medição (roll, pitch, yaw) seja exercitado de forma precisa.
2. A Acutronic executa rotações controladas e movimentos cílicos, enquanto sensores de referência internos monitoram a posição e velocidade exatas.
3. Os dados gerados pelo MRU em teste são comparados aos dados “verdadeiros” (a referência fornecida pela máquina de calibração). Isso permite identificar desvios de escala, offset e possíveis não-linearidades.
4. Com base nessa análise, são aplicados coeficientes de correção (ganhos, offsets, matrizes de alinhamento) no firmware do MRU para alinhar as medições às condições reais de uso. Esse processo pode ser repetido diversas vezes, até que o erro do equipamento fique dentro das tolerâncias definidas.
5. Ao fim do processo, gera-se um relatório/certificado atestando a acurácia final do dispositivo, a temperatura de teste e a data do ensaio.

Um paralelo que pode ser feito com a solução técnica é utilizar este procedimento de calibração a para a construção de modelos de inteligência artificial que encontra padrões entre as medições reais e lidas pelo sensor, para aprender e melhorar a precisão dos dados a partir dessa mesma relação. Um exemplo simples seria o uso de aprendizado de máquina ou redes neurais para encontrar uma relação entre a medida dos últimos dados de um ou mais sensores medindo a mesma variável. Assim sendo, o modelo entende o comportamento e pode gerar previsões dos dados reais, o que ganha cada vez mais destaque na indústria de tecnologia.

3.2 Hexapod

Os Hexapods são plataformas de movimentação com seis graus de liberdade (6-DOF), permitindo deslocamentos lineares e rotações em torno dos eixos X, Y e Z com alta precisão. São amplamente utilizados em testes e calibração de sensores, garantindo a replicação controlada de condições dinâmicas reais. No contexto do projeto, seriam utilizados na validação de medições e algoritmos, assegurando a confiabilidade dos dados antes da aplicação em ambientes offshore. A Figura 8 mostra um Hexapod conhecido da empresa Physik Instrumente.

Figura 8: Hexapod de 6 Eixos



H-840

- CIPA certified
- Load capacity to 30 kg
- Travel ranges to ± 50 mm / $\pm 30^\circ$
- Position repeatability to ± 0.1 μ m
- Brushless motors and absolute position encoder options
- Works in any orientation

Fonte: Physik Instrumente

Os principais Hexapods selecionados estão apresentados na Tabela 5, a partir das características extraídas da tabela geral.

Tabela 5: Comparação de Hexapods

Especificação	Physik Instrumente H-840.D2A	Symétrie PUNA	Aerotech HEX300-230HL	Moog HX-M300
Capacidade de Carga (kg)	20	150	12	91
Faixa de Movimento (X/Y/Z mm)	± 50 / ± 50 / ± 25	± 100 / ± 100 / ± 50	± 55 / ± 60 / ± 25	± 15 / ± 15 / ± 10.5
Faixa de Rotação (Roll/Pitch/Yaw °)	± 15 / ± 15 / ± 30	± 23 / ± 23 / ± 30	± 15 / ± 15 / ± 30	± 2.3 / ± 2.5 / ± 4.8
Precisão (μm)	0.3 (X/Y/Z)	0.5 (X/Y/Z)	0.015 (X/Y/Z)	1 (X/Y/Z)
Repetibilidade (μm)	± 0.3	± 0.5	± 0.1	± 2

Tipo de Atuador	Brushless DC Motor	Brushless Motor with Encoder	Brushless Servomotor	Frameless Torque AC Servo Motor
Tipo de Sensor	Absolute Rotary Encoder	Incremental Rotary Encoder	Linear Encoder	Linear Encoder
Dimensões (mm)	Ø281 x 189.8	Ø500 x 420	Ø300 x 230	Ø564 x 330
Comunicação	Ethernet, USB	Custom	Ethernet, CAN	Custom
Fonte	PI	Symétrie	Aerotech	MOOG

Fonte: Autoria Própria (*Google Drive*)

3.3 Atuadores (Pesquisados)

Os atuadores DIY para plataformas de movimento 6DOF são amplamente utilizados na construção de simuladores de voo e realidade virtual (VR), permitindo a replicação precisa de deslocamentos e rotações em todas as direções. Essas plataformas personalizadas utilizam atuadores lineares ou rotativos, acionados por motores de corrente contínua (DC) ou servos de corrente alternada (AC), proporcionando controle refinado sobre a amplitude de movimento, velocidade e capacidade de carga. A Figura 9 mostra um desses atuadores que poderiam ser utilizados.

Figura 9: Plataforma Personalizada do Movimento



Fonte: AliExpress

A construção modular dessas estruturas permite ajustes conforme as necessidades específicas da aplicação, tornando-as uma alternativa viável aos sistemas comerciais. Além disso, a precisão dos atuadores é essencial para garantir movimentos suaves e confiáveis, sendo um fator determinante para sua integração em sistemas de monitoramento de movimento.

3.4 Atuadores (Soluções Técnicas)

A substituição de Hexapods comerciais por plataformas de movimento personalizadas baseadas em atuadores DIY pode representar uma solução mais econômica e flexível para aplicações industriais e de pesquisa. Ao integrá-las a um Dispositivo de Referência de Monitoramento dos Movimentos (DRMM), torna-se possível simular variações reais de movimento em tempo real, permitindo testes e calibrações mais acessíveis, sendo necessária a calibração e controle da plataforma. Ademais, tais atuadores podem ser aplicados ao projeto, uma vez que é possível transmitir dados em tempo real a partir do MRU para ajustar a movimentação dos atuadores, garantindo que a plataforma replique com precisão as condições dinâmicas de ambientes offshore. A implementação desse sistema pode utilizar protocolos que permitem a transmissão eficiente dos dados captados pelos sensores. Com a fusão de informações provenientes de giroscópios, acelerômetros e magnetômetros, o sistema pode interpretar variações de movimento e calibrar a resposta da plataforma de maneira automática, otimizando a simulação e os testes do MRU.

Figura 10: Prototipagem de Simulador de Movimento



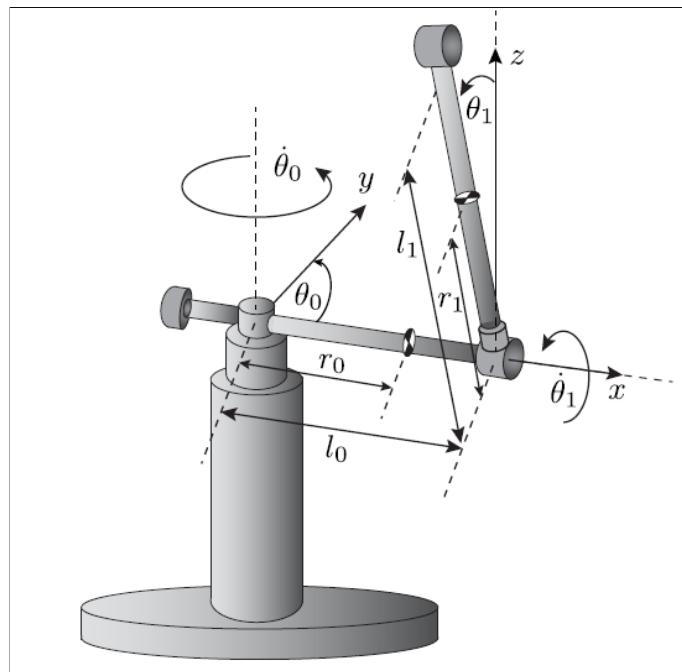
Fonte: Flightsim

De acordo com projetos DIY documentados na comunidade r/flightsim (Figura 10), a construção de plataformas 6DOF para simuladores de voo exige a integração de atuadores lineares de alta resposta, controladores PID e software dedicado para sincronização dos movimentos. Seguindo essa abordagem, a aplicação desses simuladores no desenvolvimento e calibração do MRU pode permitir a reprodução de movimentos marítimos simulados, validando os sensores do DRMM antes da instalação em navios ou plataformas offshore. Além disso, ao utilizar códigos abertos e controladores acessíveis, como Arduino, ESP32 ou Raspberry Pi, a integração pode ser viabilizada sem a necessidade de investimentos elevados, tornando a solução mais acessível e modular para testes de sensores em diferentes condições operacionais.

3.5 Definição da Solução Técnica

Considerando a abordagem de utilização de atuadores para a simulação de embarcações, um circuito de controle paralelo seria implementado para operar cada pistão de maneira independente, permitindo que o sistema reproduza movimentos complexos definidos por uma equação matemática que descreve a posição da partícula no tempo. Dessa forma, protótipo deve captar esses deslocamentos e validar se as medições correspondem ao comportamento esperado, garantindo que a modelagem matemática do sistema esteja alinhada com os valores experimentais. Para a implementação inicial, um microcontrolador como o ESP32 poderia ser empregado para controlar os atuadores em tempo real utilizando algoritmos PID (Proporcional, Integral, Derivativo). Esse controle permitiria a geração de ondas artificiais que simulam as condições dinâmicas marítimas, sendo essencial para testes de calibração e ajustes do MRU antes de sua aplicação em cenários reais.

Figura 11: Controle Preditivo Pêndulo Invertido Rotatório



Fonte: Scielo

Alternativamente, servomecanismos poderiam ser incorporados seguindo a mesma lógica de controle, possibilitando a simulação desses movimentos por meio de um braço robótico programável. Nesse caso, o braço poderia ser modelado para seguir padrões específicos de deslocamento, reproduzindo qualquer trajetória tridimensional predefinida (Figura 11). O sistema de controle determinaria os comandos necessários para que os servomecanismos ajustassem sua posição nos eixos X, Y e Z, permitindo a simulação de diversos tipos de movimentação fluida e dinâmica. Essa abordagem traria flexibilidade adicional ao projeto, possibilitando testes comparativos entre diferentes configurações de sensores e algoritmos para validar a precisão do MRU em diferentes condições de operação.

3.5.1 Comparação de Calibradores

A mesma verificação feita para os dispositivos de sensoriamento pode ser implementada de maneira análoga aos atuadores responsáveis pelos movimentos de calibração do sistema. Dessa forma, variáveis como precisão, custo, robustez e durabilidade foram também inseridos para que se possa avaliar qual é a melhor tecnologia a ser utilizada. A Tabela 6 mostra essa comparação pelos critérios abordados.

Tabela 6: Comparação de Atuadores de Calibração

Critério	Hexapods	DIY 6 Eixos	Braços Robóticos
Precisão	Alta	Baixa a Média	Média a Alta (varia conforme modelo e aplicação)
Custo	Alto	Baixo a Médio	Médio a Alto (industrial) ou Baixo a Médio (educacional/hobby)
Nível de Parametrização	Baixo a Médio (controladores dedicados)	Alto (completamente customizável)	Médio a Alto (dependendo do sistema de controle e software de programação)
Facilidade de Integração	Média (possuem interfaces industriais, mas podem exigir configuração)	Baixa a Média (demandam programação, controladores e eletrônica custom)	Média a Alta (robôs industriais costumam ter protocolos de automação bem estabelecidos)
Robustez	Alta (uso em ambientes industriais/laboratoriais)	Baixa a Média (depende da fornecedora dos componentes)	Média a Alta (robôs industriais são robustos; modelos hobby menos)
Durabilidade	Alta	Baixa a Média	Média a Alta (varia conforme fabricante e faixa de aplicação)

Fonte: Autoria Própria

Uma vez que, diferentemente dos sensores, o escopo do projeto não se baseia no desenvolvimento da construção dos sistemas de atuadores para a calibração, pode ser priorizado um sistema robusto com menor parametrização para agilizar processos de desenvolvimento e alocar a equipe para tarefas com maior demanda no que se refere ao protótipo a ser construído. Dessa forma, será priorizado os dispositivos robustos e com alta confiabilidade de mercado.

4 Metodologia de Execução

Para a realização do projeto, definiu-se um esquema de organização que divide as tarefas em equipes especializadas, cada qual responsável por uma etapa específica. Enquanto uma unidade se empenha na pesquisa e seleção dos sensores adequados, outra se ocupa da elaboração de hardware e firmware, existindo ainda um grupo dedicado ao desenvolvimento do software de comunicação e à realização dos testes de validação. Esse procedimento permite que cada componente do sistema seja planejado e verificado de forma independente, resultando em uma integração final mais segura e eficiente.

Para manter as equipes em sintonia e assegurar que as metas sejam cumpridas, foram instituídas reuniões semanais. Nesses encontros, cada grupo apresenta seus avanços, avalia-se o estágio geral do projeto e discutem-se possíveis entraves técnicos. As informações coletadas são então confrontadas com os parâmetros estabelecidos no planejamento, o que possibilita a adoção de ajustes imediatos e a correção de rotas, sempre que necessário. Além disso, essa dinâmica otimiza o uso de recursos, evitando despesas supérfluas e concentrando esforços nas soluções mais promissoras.

Quando cada ciclo de trabalho é finalizado, todos os dados reunidos são organizados em um relatório técnico. Esse documento oferece uma visão precisa do ponto em que o projeto se encontra, indica desafios pendentes e orienta as próximas etapas a serem seguidas. A manutenção constante dessa documentação torna mais claro o histórico de escolhas feitas, contribui para uma coordenação de projeto mais eficiente e assegura o cumprimento das principais entregas dentro dos prazos estipulados.

5 Conclusão

De acordo com os dados supracitados, torna-se evidente, portanto, que a criação de um dispositivo nacional de referência de movimentos representa uma estratégia viável para o setor offshore, ao reunir sensores de alta precisão e metodologias de calibração robustas sem elevar custos de forma proibitiva. O estudo de MRUs, IMUs e módulos sensoriais, em conjunto com a possibilidade de realizar testes dinâmicos em plataformas de movimento, permite validar o desempenho do equipamento em condições reais, assegurando confiabilidade e durabilidade. Além disso, ao dividir o projeto em equipes especializadas e ao contemplar atuadores customizáveis, impulsiona-se a redução de despesas operacionais sem comprometer a eficiência do sistema, o que contribui para a substituição gradual de dispositivos importados. Essa abordagem, ao mesmo tempo em que viabiliza aprimoramentos futuros, reforça o potencial de autonomia tecnológica e atende às especificidades de um ambiente marcado por demandas exigentes de segurança e precisão.