

Multiplataforma para Teste de Sensores e Avaliação de Algoritmos de Determinação de Atitude

Isadora Martines Ferreira* Daniel Strufaldi Bastista*
Marcelo Carvalho Tosin* Francisco Granziera Jr.*

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de
Londrina, Londrina, Paraná, Brasil

E-mails:

{isadora.martines, daniel.strufaldi, mctosin, granziera}@uel.br

Abstract: This work describes a multiplatform system for testing and validating attitude determination systems based on magnetic and inertial sensors (MARG). The platform concept involves a simulation system and an electronic system. The first simulates body dynamics, MARG sensors data, and tests attitude determination algorithms. The electronic system, in turn, is modular and allows Software- and Hardware-in-the-loop simulations together with the simulation model. Thus, it allows algorithm testing with real sensor data and the analysis of these sensors. The work presents the project and the concept of the multiplatform and a prototype built with development boards. Results demonstrates the sensor calibration and attitude determination using two sets of MARG sensor data available at the prototype.

Resumo: Este trabalho descreve um sistema multiplataforma para testes e validação de sistemas de determinação de atitude baseado em sensores magnéticos e inerciais (MARG). O conceito da plataforma envolve um sistema de simulação e um sistema eletrônico. O primeiro é capaz de simular a dinâmica de corpos, dados de sensores MARG, e testar algoritmos de determinação de atitude. O sistema eletrônico, por sua vez, é modular e permite simulações *Software- e Hardware-in-the-loop* em conjunto com o modelo de simulação. Desta forma, é possível testar algoritmos com dados de sensores reais e também a analisar os mesmos. O trabalho apresenta o conceito e o projeto da multiplataforma e mostra a implementação de um protótipo construído com placas de desenvolvimento. Os resultados demonstram a calibração de sensores e a determinação de atitude utilizando dados de dois conjuntos de sensores comerciais MARG.

Keywords: attitude determination; MARG sensors; inertial sensors; multi sensor systems.

Palavras-chaves: Determinação de atitude; Sensores MARG; Sensores inerciais; Sistema multissensores;

1. INTRODUÇÃO

A atitude de um corpo descreve a sua orientação tridimensional no espaço em relação a uma referência conhecida (Markley and Crassidis, 2014). Determinar e controlar a atitude é um processo essencial em uma grande parte dos sistemas de navegação, como aeronaves, satélites e similares. Todavia, nos últimos anos essa medida passou a ser parte de uma gama muito maior de aplicações, estando presente em sistemas de veículos, objetos de uso pessoal, brinquedos, *gadgets*, aparelhos médicos, celulares, entre diversos tipos de aplicações, as quais podem possuir características consideravelmente distintas entre si.

Diversos métodos e soluções podem ser empregadas no processo de determinação de atitude (Markley and Crassidis, 2014). Cada tipo de aplicação, ou até mesmo entre soluções distintas para uma mesma aplicação, pode haver diferenças

consideráveis tanto em *hardware* quanto nas funções matemáticas presentes no processo de determinar o apontamento do corpo. Por exemplo, dependendo da aplicação de um satélite, este pode possuir sensores COTS (*commercial off-the-shelf*), de baixo custo, similares a aqueles presentes em um *smartphone* moderno, até sensores de milhares de dólares.

Atualmente, apesar das diversas formas de determinar atitude, as mais comuns fazem uso de sensores magnéticos, solares, estelares, acelerômetros ou de outras grandezas físicas que sirvam de referência. Estes métodos, comumente chamados de determinação de atitude, podem ser caracterizados como algoritmos sem memórias, ponto a ponto (Markley and Crassidis, 2014). Adicionalmente, as aplicações podem utilizar métodos de estimação de atitude, nas quais as informações dos sensores usados na determinação de atitude são combinadas com informações de velocidades angulares, obtidas por meio de girômetros, através de algoritmos com memória, com a presença de modelos dinâmicos e processo de filtragem.

* Projeto de número 139734/2021-0 financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

A multiplataforma proposta neste trabalho busca prover uma ferramenta capaz de testar e submeter tais algoritmos, e, sensores a análises e validações de forma rápida. Permitindo e aprimorando a prototipagem de projetos de sistemas de determinação de atitude para as mais distintas aplicações, independente do *hardware* e/ou modelo matemático usado a ser empregado na aplicação final.

Adicionalmente, ela serve como um método de aprendizado para compreender a implementação de algoritmos de atitude e interligá-la com o meio físico, possibilitando o estudo e a análise prática de tais sistemas. Em termos científicos, a multiplataforma visa contribuir para a prototipagem de futuros sistemas de determinação de atitude. A acoplação de um sensor (e sua eletrônica) à plataforma servirá como uma etapa intermediária ao processo de prototipagem da eletrônica final de um determinado sistema, como, por exemplo, um sistema de determinação de atitude para pequenos satélites (Batista et al., 2014). Este procedimento intermediário visa eliminar problemas em eletrônicas finais mais complexas, onde eventuais falhas seriam mais custosas, tanto em termos financeiros quanto em cronograma.

Em termos físicos, a proposta para a multiplataforma é ser um cubo, feito em impressão 3D, devido a geometria bem conhecida e permitindo encaixes de forma simples. Cada face deste sistema possuirá a eletrônica referente a um dos seus subsistemas, os quais incluem a central de processamento, um sistema AHRS (*Attitude and heading reference system*) para ser usado como referência, e as faces com os magnetômetros a serem testados. Dessa forma, as faces são modulares e facilitam os testes e validações.

Na sequência, o trabalho apresenta a proposta para a multiplataforma, seus conceitos de simulação e também da interface com sensores práticos. O trabalho mostra os resultados de um protótipo inicial dessa multiplataforma, feito em uma estrutura provisória e contendo placas de sensores para validação do conceito do projeto.

2. O CONCEITO DA MULTIPLATAFORMA

2.1 Motivação

A grande disponibilidade e variabilidade de tipos de sensores, que podem ser integrados em um sistemas de determinação e estimação de atitude, tornam a escolha destes bastante difícil. Ainda, vale ressaltar que os requisitos da aplicação tais como acurácia, custo e consumo energético irão afetar também a escolha dos sensores e algoritmos para cálculo dos ângulos de atitude. Por este motivo, ter uma ferramenta capaz de simular, integrar, testar e validar rapidamente uma configuração de sensores e algoritmos, reduziria o tempo de desenvolvimento pois traria respostas do desempenho relativo com muita rapidez.

Com este intuito foi idealizada a multiplataforma. Um sistema reconfigurável tanto em termos de *hardware* quanto de *software* e altamente integrável aos sistemas de simulação *Hardware* e - *Software-in-the-Loop* (HIL e SIL, respectivamente). Tais soluções modulares e HIL são amplamente usadas em aplicações espaciais envolvendo atitude, seja para validação de *hardware*, como nos trabalhos de Steffes et al. (2011); Haddox (2014), quanto para validações de algoritmos (Bauer and Bokor, 2010; Lizarraga et al., 2009).

2.2 Requisitos no design da multiplataforma

Um dos requisitos colocados é que a multiplataforma seja modular, rapidamente reconfigurável. Para atender a esse aspecto foi proposta uma topologia cúbica com faces intercambiáveis. Isto permite a troca de sensores ou a troca da posição angular dos mesmos. A estrutura final deve ser feita em impressão 3D, com elementos de fixação que garantam a modularidade quanto a geometria do *setup*. As faces ortogonais garantem maior facilidade na análise das triades dos sensores.

Outra condição é garantir o processamento distribuído de baixo consumo energético. Isto permite que os dados sejam adquiridos e pré-processados localmente, evitando interferência na rotina principal. Um terceiro requisito é que os dados já pré-processados sejam enviados para um processador central por meio de uma interface serial de alta velocidade e que a computação da atitude ocorra na maior taxa possível. Para tal, o processador principal deve possuir duplo núcleo, de forma que um fique responsável pela interface de dados e outro dedicado aos cálculos da atitude.

O sistema também deve possuir faces dedicadas para sistemas auxiliares e para um determinador de atitude de referência. Os auxiliares são baterias, memória de armazenamento em massa e transmissor *bluetooth*, permitindo que o sistema possa funcionar livre de cabos caso necessário para testes. Portanto, o sistema deve possuir duas baterias de 3.6V, um transmissor BLE (*bluetooth low-energy*) e um SDCard (Secure Digital Card). Por fim, o sistema deve ter a capacidade de operar com um AHRS comercial acoplado em uma de suas faces, provendo dados de referência caso necessário.

Por fim, o processador da plataforma deve ser capaz de executar simulações do tipo HIL e/ou SIL. Assim, o sistema deve possuir uma etapa de simulação, feita em Matlab/Simulink (ou software similar), capaz de executar simulações dinâmicas. Utilizando o Simulink, por exemplo, pode-se gerar código C para processadores ARM-Cortex a partir dos diagramas de blocos, funções básicas deste *software*, e também funções do próprio usuário (MathWorks®, 2022). Isto viabiliza simulações SIL e HIL para validação de algoritmos e também testes parciais de *hardwares* durante o desenvolvimento do sistema de determinação de atitude.

2.3 Especificação da Multiplataforma conforme Requisitos

O diagrama mostrado na Figura 1 descreve a configuração cúbica adotada. Três faces da multiplataforma são destinadas a circuitos eletrônicos dos sistemas a serem testados ou validados. Ou seja, PCBs (Placas de Circuito Impresso) contendo os sensores MEMS dos sistemas em prototipagem. As demais faces são destinadas ao sistema central de processamento, o sistema de energia, e uma ao sistema de interfaces. Essa última ainda possui compatibilidade com o AHRS comercial *Spatial* da empresa *Advanced Navigation*.

O modelo 3D presente na Figura 2 mostra o modelo físico do projeto da multiplataforma, cujas faces são descritas na Fig. 1. De tal forma que a base do modelo 3D corresponde a placa central, o topo, frente e lado esquerdo são compostos

pelas placas com sensores, lado direito apresenta as baterias, interfaces e módulos de carregamento e ao fundo o SD Card, AHRS e módulo bluetooth. Ademais, observa-se pequenos cubos nos vértices da multiplataforma, a função destes é garantir o melhor alinhamento entre as faces.

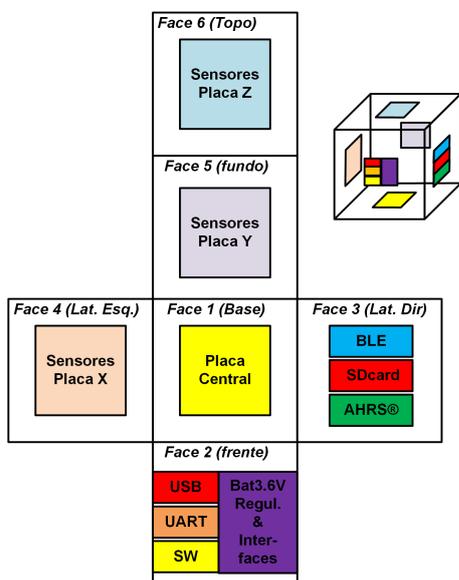


Figura 1. Descrição dos elementos de cada uma das faces da Multiplataforma.

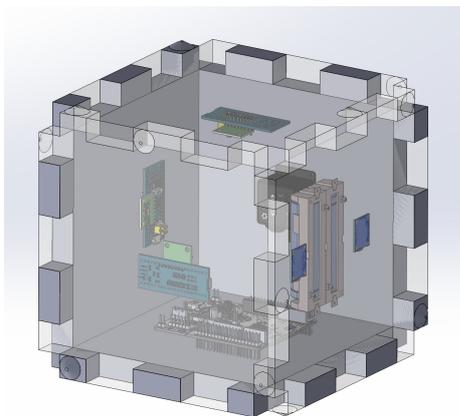


Figura 2. Versão 3D do modelo da Multiplataforma.

2.4 Descrição das Placas de Sensores

As placas de Sensores X, Y, e Z são sistemas eletrônicos com um sensor ou grupo de sensores, e realiza a interfaces com estes localmente efetuando um pré-processamento dos dados. Os dados já processados são disponibilizados por meio de uma interface serial de alta velocidade para a placa central.

Para atender esta função a eletrônica deve ser específica com microcontroladores cujos processadores sejam ARM Cortex-M3/M0, ou similares. Em geral, microcontroladores deste porte, independente do fabricante, possuem disponibilidade de todos os tipos mais comuns de barramentos seriais, tais como I2C, SPI, UART e CAN. Também é possível usar a interface ADC do microcontrolador ou de

alguma leitura de frequência, período ou largura de pulso por meio dos temporizadores.

A Figura 3 mostra um diagrama básico proposto para cada uma destas placas. Essas placas podem ou não possuir reguladores próprios, mas como opção primárias são alimentadas diretamente pelo Sistema de Energia do Cubo. Isso reduz a complexidade da eletrônica, agiliza e reduz o custo da prototipagem de cada PCB. O conector de gravação do *firmware* e de depuração do código fica na própria PCB, bem como um conector de acesso a uma UART para algum tipo de monitoramento ou para uso no desenvolvimento do *firmware*. A comunicação com a Placa Central é feita por meio de uma SPI (modo *full-duplex*) de alta velocidade. Isto vai possibilitar um mínimo atraso na aquisição dos dados das Placa de Sensores.

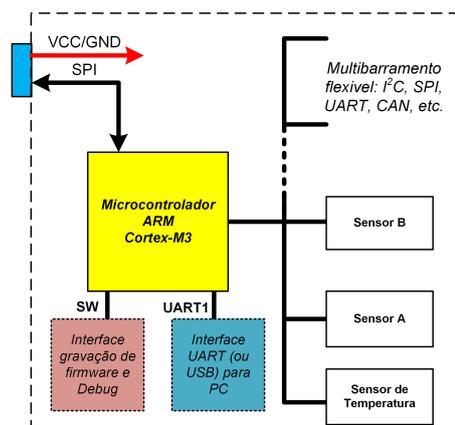


Figura 3. Diagrama básico do circuito eletrônico das Placas de Sensores X, Y e Z.

2.5 Descrição da Placa Central

Conforme requisitos apresentados, essa placa deve possuir dois núcleos de processamento. Portanto, foi escolhido um microcontrolador composto por núcleos ARM Cortex-M7 + Cortex-M4. O processador de núcleo duplo garante que um destes seja exclusivamente alocado para interfaces de comunicação (SPI com as Placas de Sensores, UART ou Bluetooth), enquanto o núcleo de maior capacidade de processamento seja utilizado na execução do algoritmo de determinação (e/ou estimativa de atitude) utilizando FPU (*float* em 32 bits) ou emulando *double* em 64 bits.

A Figura 4 traz um diagrama contendo os elementos que compõem o circuito eletrônico da placa principal. A figura também descreve os sistemas de outras faces relevantes ao entendimento do diagrama. Embora os reguladores e baterias estejam em outra face, o gerenciamento e monitoramento é feito através da PCB Central. A memória de armazenamento de massa, tipo SDCard, também é controlada pela Placa Central e ele ficará alocado na face de conectores facilitando a inserção e retirada do mesmo.

Este processador principal deve possuir compatibilidade com geração de códigos via Matlab/Simulink (ou *software* similar). Dessa forma, funções e algoritmos podem ser embarcados usando compiladores compatíveis com estes *softwares* sem a necessidade de implementações em baixo nível, atendendo ao requisito de simulações SIL para auxiliar na prototipagem dos sistemas.

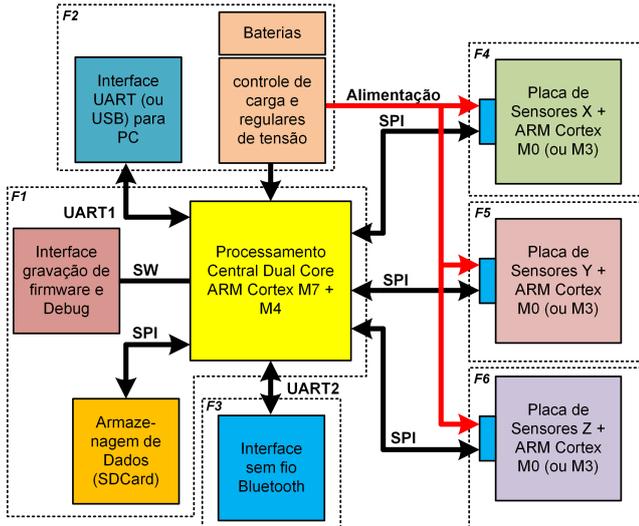


Figura 4. Descrição dos elementos da placa principal (F1) e dos elementos adjacentes necessários ao funcionamento completo do sistema.

2.6 Interfaces adicionais SDCard e Bluetooth

Apesar da possibilidade de operação com envio de dados por Bluetooth, é essencial que o sistema seja capaz de realizar o *log* dos dados em certos testes. Portanto, o uso do SDCard é essencial para: permitir uma velocidade de gravação de dados superior do que a transmissão; e evitar que a interface Bluetooth possa interferir no funcionamento de algum tipo de sensor (como magnéticos, por exemplo), e portanto, a alternativa de gravar os dados permite essa análise.

3. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO E TESTES DOS ALGORITMOS

A multiplataforma possui uma etapa que permite a simulação de sistemas dinâmicos, seja em partes ou por completo. Na totalidade, o sistema deve ser capaz de simular a dinâmica e cinemática de um corpo, dados de sensores MARG, além dos cálculos de determinação e estimação de atitude conforme os métodos implementados.

Adicionalmente, essa simulação deve ser capaz de ser executada, de forma SIL ou HIL, pelo processador da placa principal. Permitindo que a simulação seja substituída em parte (ou partes) pelos elementos (sensores/*hardwares* e rotinas de *firmware*) para testes individuais das etapas. A subseção a seguir apresenta os fundamentos teóricos necessários à compreensão da simulação, que é descrita nas demais subseções.

Por fim, é válido citar que essa simulação por parte da plataforma permite uma análise inicial, na forma de estudo e validação, dos algoritmos relacionados tanto à calibração de sensores MARG, quanto de algoritmos de determinação e estimação de atitude.

3.1 Fundamentos Teóricos

3.1.1 Equações da Dinâmica do Corpo

Com intuito de simular um movimento de rotação no

espaço livre parte-se da equação da dinâmica da Euler (Sidi, 1997):

$$\boldsymbol{\tau} = \dot{\mathbf{h}}_B + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{h}_B, \quad (1)$$

onde $\boldsymbol{\tau}$ é o torque no sistema inercial, \mathbf{h}_B o momento angular do corpo, e $\boldsymbol{\omega}$ a sua velocidade angular, ambos no sistema de coordenadas do corpo.

Em uma primeira simplificação, considera-se que os eixos do corpo são coincidentes com seus principais eixos de inércia, o que torna a matriz de inércia \mathbf{I} diagonal, e os vetores momento angular e velocidade angular colineares pois $\mathbf{h}_B = \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}$, logo (1) pode ser reescrita como

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega} \quad (2)$$

Um corpo sujeito a um torque de perturbação possuirá velocidade angular de acordo com a seguinte equação diferencial não-linear acoplada

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{I}^{-1}(\boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\Omega}\mathbf{I}\boldsymbol{\omega}), \quad (3)$$

onde a matriz anti-simétrica $\boldsymbol{\Omega}$ é um re-arranjo do vetor velocidade angular, dada por

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

Desenvolvendo (3) fica claro o acoplamento entre as velocidades angulares e a não-linearidade na equações

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \frac{\tau_x(I_z - I_y)}{I_x} \omega_y \omega_z \\ \dot{\omega}_y &= \frac{\tau_y(I_x - I_z)}{I_y} \omega_x \omega_z \\ \dot{\omega}_z &= \frac{\tau_z(I_y - I_x)}{I_z} \omega_x \omega_y \end{aligned} \quad (4)$$

Resolvendo-as simultaneamente é possível obter a velocidade angular dos eixos do corpo. O torque é considerado apenas um pulso de duração pequena aplicado no início do processo, pode ser modelado por

$$\tau_i = T_i [u(t) - u(t - t_i)], \quad (5)$$

onde i é o índice do eixo que pode ser x, y ou z ; T_i é a amplitude do torque no respectivo eixo; $u(t)$ é a função degrau unitário e t_i define a duração do pulso.

3.1.2 Equações da Cinemática

O vetor velocidade angular obtido pela solução do conjunto dado em (4) será agora utilizado como entrada para gerar a variação da atitude no tempo. Das opções mais comuns de representação para atitude optou-se pelo uso do quaternário, então, a equação da cinemática de atitude é dada por

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega} \otimes q, \quad (6)$$

onde ambos elementos q e $\boldsymbol{\omega}$ são quatérnions, sendo este último um *quatérnion* puro, ou seja, possui a parte escalar igual a zero e parte vetorial é o próprio vetor velocidade angular. O operador \otimes representa o produto quaterniônico. A integração de (6) gera a atitude no tempo, que será utilizada para gerar leituras dos sensores.

3.1.3 Medida de Sensores e sua Calibração

Para simular a medida de cada sensor de referência são necessários três passos. O primeiro é aplicar o quatérnio de atitude no sistema de coordenadas de cada sensor para gerar uma medida vetorial na atitude que o corpo se encontra. O segundo passo é aplicar o modelo de medida do sensor de forma inversa, ou seja, converter a medida vetorial para medida física original do sensor, incluindo fatores de escala, *biases* e desalinhamentos típicos. O terceiro passo é somar um valor aleatório que simula o ruído. Estes três passos podem ser combinados em uma única equação.

$$\tilde{\mathbf{s}}_B = \mathbf{A}\mathbf{R}\mathbf{s}_R + \mathbf{b} + \boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

Na qual \mathbf{s}_R e \mathbf{s}_B são vetores medidos pelo sensor na referência e na atitude atual do corpo, respectivamente; \mathbf{R} é uma matriz de rotação obtida pela conversão do quatérnio de atitude para a matriz de cosseno diretores (DMC); \mathbf{A} é uma matriz de fatores de escala e também desalinhamento entre eixos; \mathbf{b} é um vetor de *biases* das medidas e $\boldsymbol{\eta}$ representa o vetor ruído branco.

Importante lembrar que sensores de velocidade angular não precisam da aplicação da matriz \mathbf{R} pois suas medidas já se encontram no sistema de coordenadas do corpo.

3.2 Simulação para Validação dos Algoritmos

A Figura 5 mostra um diagrama do fluxo da simulação dos sensores para teste dos algoritmos de determinação/estimação de atitude. O procedimento de simulação leva em conta a geometria na qual os sensores estão alocados, o modelo de cada sensor (fator de escala, viés, desalinhamento dos eixos e ruído) a taxa de aquisição que será utilizada e o pré-processamento realizado nas Placas de Sensores.

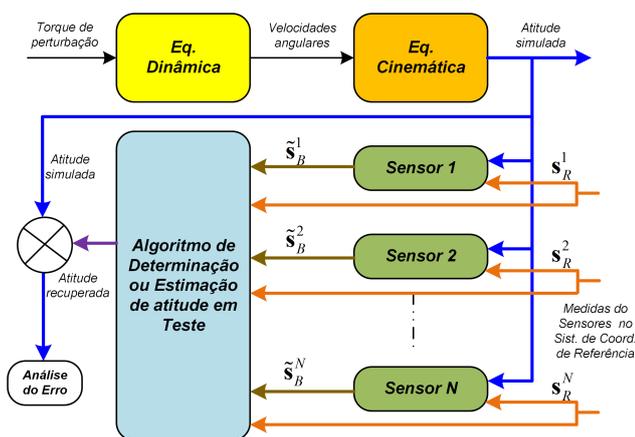


Figura 5. Fluxo da simulação de teste do Algoritmo Atitude.

O motor da simulação é um tombamento contínuo do corpo, cuja matriz de inércia é conhecida. É considerado um espaço-livre de atritos. Um impulso inicial é dado e a partir deste impulso o corpo apresenta interação entre as velocidades conforme as equações em (4). A integração simultânea das velocidades angulares gera uma sequência de atitudes para o corpo. A saída da atitude está representada na forma de matriz de cossenos diretores (DCM),

mas pode ser facilmente convertida para quatérnios ou ângulos de Euler (Sidi, 1997).

A atitude é aplicada a cada eixo sensor de acordo com sua posição angular na multiplataforma. A saída física de cada sensor é convertida para um valor físico mensurável e o ruído característico é adicionado. Esta primeira parte da simulação produz dados simulados dos sensores da mesma forma que eles serão produzidos na implementação prática.

O passo seguinte é passar estes dados para os algoritmos sob teste. Se eles estiverem corretamente implementados, a saída é a mesma atitude de entrada que produziu os dados, com algum desvio devido ao ruído adicionado. A estatística do erro de atitude é um parâmetro importante na comparação dos algoritmos, mas não é o único. Por este motivo, o passo seguinte foi adicionado ao procedimento.

3.3 Teste dos Algoritmos Embarcados na Multiplataforma

Apesar da possibilidade de testes dos algoritmos na simulação, uma parte importante da prototipagem de um sistema eletrônico com funções matemáticas deste nível é realizar testes das funções embarcadas e executadas no seu processador de aplicação. Um dos motivos é a incerteza dos modelos utilizados para os sensores que em geral subestimam seus erros e ruídos.

Um outro ponto é que outras métricas são levantadas na implementação prática (Rodrigues et al., 2018): tempo de execução de um ciclo do algoritmo, complexidade na tradução (geralmente linguagem C), existência de singularidades, erro numérico efetivo e custo energético, dentre outros fatores, haja visto que em um sistema embarcado não se tem as mesmas facilidades que em um *desktop* com Matlab/Simulink.

Um das validações importantes que podem ser feitas nesta etapa é validar implementações de algoritmos de estimação de atitude utilizando dados simulados de sensores. Os dados são gerados em tempo-real pela simulação em Matlab/Simulink e enviados por uma interface UART para uma Placa de Sensores que disponibiliza os dados para a Placa Central como se os tivesse adquirido dos sensores. A atitude é estimada também em tempo-real e devolvida para o *desktop* que compara os resultados calculados. Isto pode tanto indicar erros grosseiros na tradução do código quanto erros finos provenientes da limitação numérica das variáveis declaradas como *float* em 32 bits (Rodrigues et al., 2018). Esta simulação do tipo *hardware-in-the-loop* (HIL) é bastante confiável para validar sistemas (Harrison et al., 2011).

4. PROTÓTIPO DA MULTIPLATAFORMA

A multiplataforma é um conceito em processo de validação. Antes de fabricar as PCBs dedicadas foi realizada uma montagem experimental utilizando kits de avaliação disponíveis no mercado. O protótipo apresentado neste artigo é justamente esta versão. Sua finalidade é ilustrar o conceito e também levantar possíveis problemas e limitações.

A Figura 6 mostra a montagem da multiplataforma em um cubo acrílico. A Placa Central é representada pelo kit STM32H755 (Arm Cortex M7 + M4, *dual core*). Cada

Placa de Sensores é composta por um kit STM32F103 (Arm Cortex M3), seu próprio conjunto de sensores e uma mini matriz de contatos acoplada às faces. Um das faces contém duas baterias de 3.6V e seus respectivos módulos de carga. Ademais, um conversor USB-UART está acoplado à Placa Central para alimentação via USB e comunicação com Simulink para envio de dados.

Inicialmente os dados dos sensores são enviados crus sem qualquer tipo de tratamento e o cálculo da atitude é realizado no Simulink. Futuramente, as etapas de cálculos serão passadas para o sistema embarcado (Placa Central) e o Simulink ficará apenas com a tarefa de mostrar e salvar os dados.

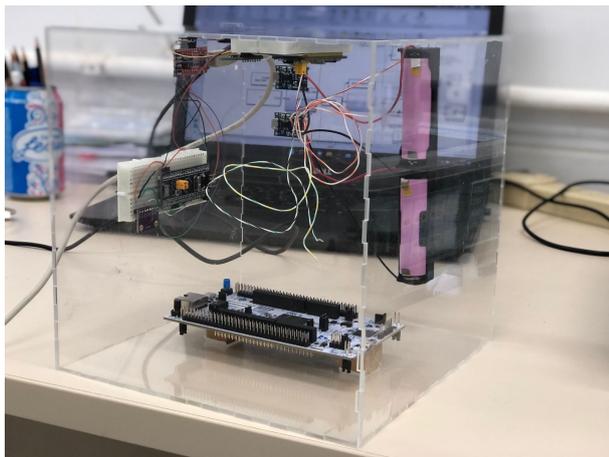


Figura 6. Protótipo inicial em acrílico elaborado para validação da Multiplataforma.

Posteriormente, pretende-se implantar o sistema de baterias para alimentação autônoma da multiplataforma e um sistema *bluetooth* para a comunicação entre *hardware* e *software*.

5. ESTUDO DE CASO

Para ilustrar as possíveis aplicações foi formulado um ensaio com dois conjuntos de placas de desenvolvimento comerciais conhecidos por GY-86 e GY-91, cujos sensores são de baixo custo e similares aos utilizados em celulares, VANTs e outros. A placa GY-86 conta com um circuito integrado MPU-6050 e um HMC5883L. O primeiro é um acelerômetro e girômetro de três eixos e o segundo um magnetômetro triaxial. A outra possui um MPU-9250, este circuito integrado conta com um acelerômetro e girômetro, ambos de três eixos, e o magnetômetro triaxial AK8963, encapsulado no mesmo *wafer*. Para o estudo de caso com o protótipo construído, as informações das velocidades angulares fornecidas pelos girômetros não são utilizadas.

O objetivo do teste é coletar os dados dos acelerômetros e magnetômetros com a finalidade de comparar o desempenho através da atitude obtida por cada conjunto de sensores, incluindo a análise da atitude sem e com a calibração dos mesmos. A atitude é calculada utilizando o algoritmo TRIAD (Markley and Crassidis, 2014), que é capaz de determinar a matriz de cossenos diretores a partir de dois vetores de referência não colineares dados as suas medidas em uma posição inicial (utilizada como referência) e suas medidas em uma atitude qualquer.

Para explicitar a atitude calculada por estes conjunto de sensores, foi implementado uma visualização gráfica no Simulink, através do bloco VR-Sink. A atitude calculada por cada conjunto de sensores é representada por um cubo. Os cubos virtuais estão presentes ao fundo da Figura 7.

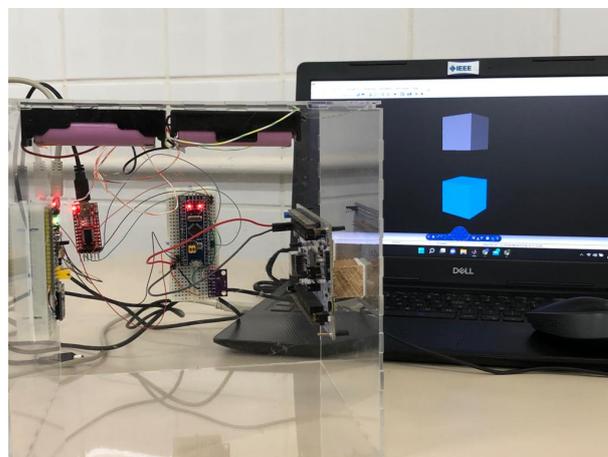


Figura 7. Protótipo da Multiplataforma com exemplificação da simulação gráfica ao fundo.

Em um primeiro teste qualitativo foi possível observar que ambos cubos virtuais não seguiam os movimentos reais, provavelmente pelo fato dos sensores estarem descalibrados, e além disso apresentando trepidação, conseqüente do ruído advindo dos sensores. Logo, fez-se necessária a aplicação de um algoritmo de calibração (Takahashi et al., 2010) para atenuar os erros, principalmente dos magnetômetros.

5.1 Procedimento para calibração

Devido ao problema detectado na análise qualitativa, foi realizada a aquisição dos dados de ambos conjuntos de sensores acelerômetros e magnetômetros tanto da GY-86, quanto da GY-91. Foi realizado a renderização da *norma* dos dados, como mostrado nas Figuras 8.(a) e 9.(a) o que claramente evidencia nas medidas a presença de *offset*, diferenças de fatores de escala entre os eixos e também interferências ruidosas. Após a aplicação do algoritmo de calibração obtêm-se as Figuras 8.(b) e 9.(b).

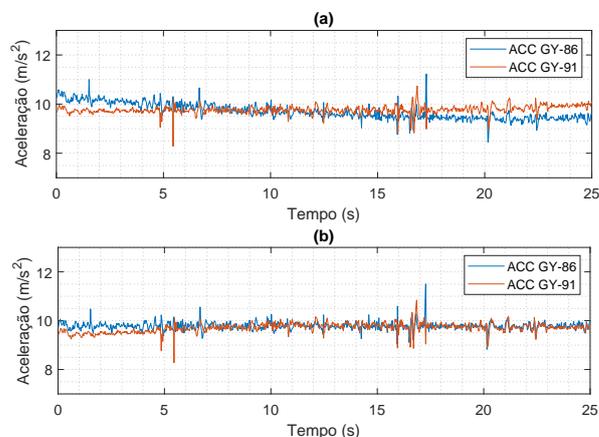


Figura 8. Módulos das medidas dos acelerômetros. (a) Sem Calibração. (b) Dados Calibrados.

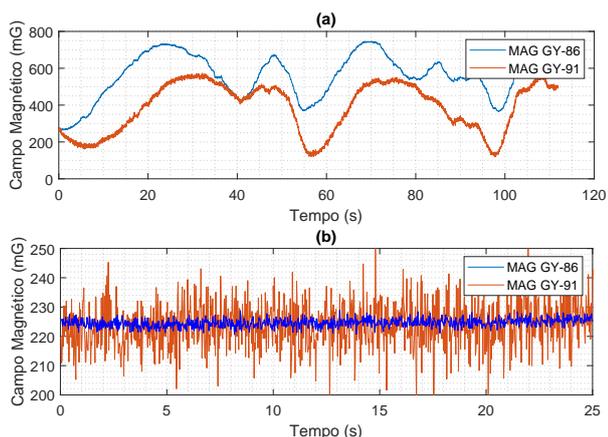


Figura 9. Módulos das medidas dos magnetômetros. (a) Sem Calibração. (b) Dados Calibrados.

Comparando os dois dados, antes e depois da calibração, percebe-se que o magnetômetro apresenta maiores erros em suas medidas. Isto ocorre, provavelmente, devido a interferência de *Hard- e Soft-Iron* (Caruso, 2000). Para ilustrar melhor esses erros dos magnetômetros foram plotados os dados dos magnetômetros de ambos sensores em torno de uma esfera unitária de referência, obtendo-se as Figuras 10.(a) e 11.(a)., nas quais é possível observar de forma mais nítida os erros dos sensores.

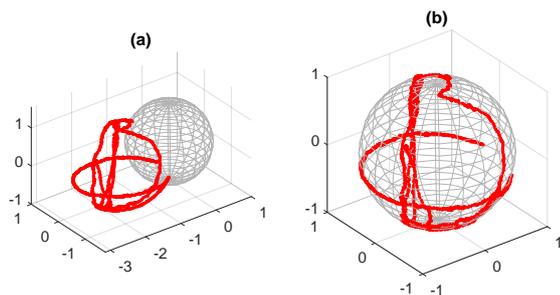


Figura 10. Dados do Magnetômetro da placa GY-86 plotados na esfera unitária. (a) Sem Calibração. (b) Com Calibração.

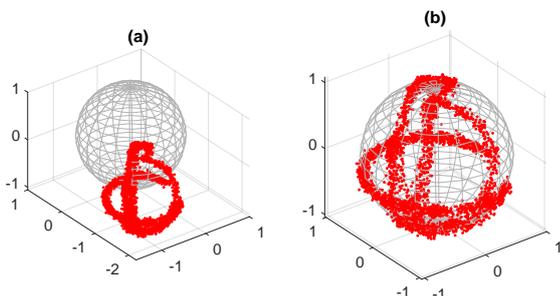


Figura 11. Dados do Magnetômetro da placa GY-91 plotados na esfera unitária. (a) Sem Calibração. (b) Com Calibração.

Ao observar as Figuras 9.(b) e 10.(b) percebe-se que o algoritmo de calibração foi eficaz, uma vez que os pontos medidos após a calibração integram a esfera unitária centralizada na origem. Também é nítida a diferença na qualidade dos dados, pois o ruído do magnetômetro do GY-91 é muito superior ao do GY-86.

5.2 Atitude antes e depois da calibração

Após a coleta de dados para calibração, foi realizada um experimento controlado rotacionando o cubo em torno de um de seus eixos, na faixa de $+90^\circ$ e -90° com passos constantes de $\approx 10^\circ$. A rotação foi realizada de forma manual, girando o cubo sobre um papel, que continha o círculo trigonométrico com divisórias a cada 10° . Assim, estes dados, cuja posição em relação ao gabarito é conhecida, podem utilizados para avaliar a atitude com os dados não calibrados e após a calibração.

O cálculo e a análise da atitude deste experimento pode ser realizada utilizando os dados sem calibração e e com a mesma. Os resultados sem e com a calibração são mostrados nas Figuras 12 e 13, respectivamente. As Figuras 12.(a) e 13.(a) são referentes ao módulo GY-86 e as Figuras 12.(b) e 13.(b) ao módulo GY-91.

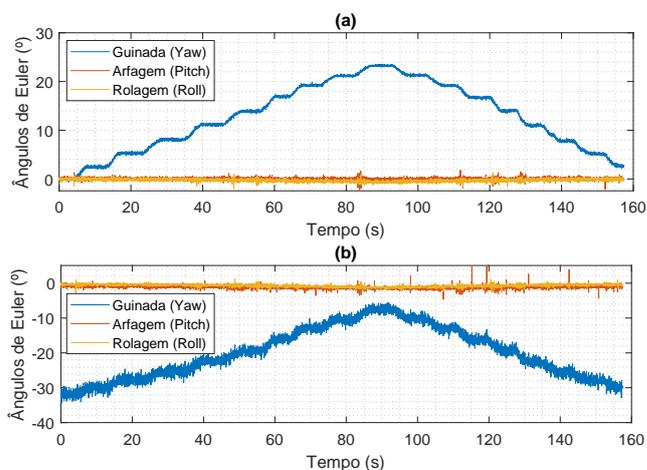


Figura 12. Ângulos de Euler obtidos pelo algoritmo TRIAD. Dados sem calibração. (a) Placa GY-86. (b) Placa GY-91.

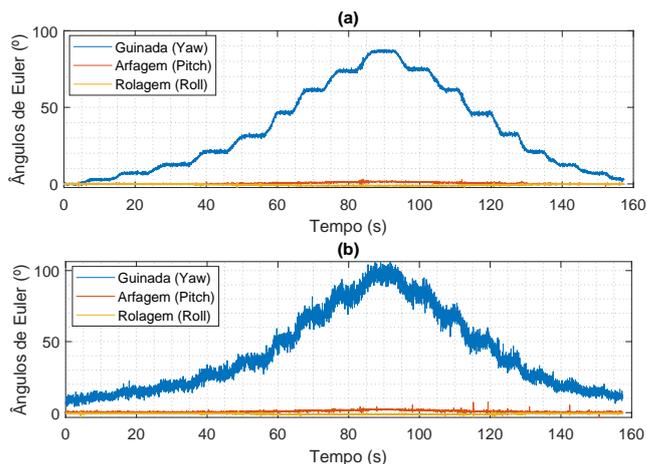


Figura 13. Ângulos de Euler obtidos pelo algoritmo TRIAD. Dados com calibração. (a) Placa GY-86. (b) Placa GY-91.

Logo, há uma diferença visível através do gráfico, principalmente causada pelos offsets dos magnetômetros. Note que o ângulo de rotação da Figura 12 está totalmente equivocado para ambos conjuntos de sensores. Já na Figura 13 tanto a excursão quanto os passos foram coerentes. Fica

nítida a diferença de qualidade entre os dados da GY-86 e da GY-91.

5.3 Versatilidade da Multiplataforma

A cada dia surgem novos sensores, novos algoritmos e o tempo para avaliar seu desempenho tem levado a dois caminhos: ou adquire-se um *development kit* do fabricante ou trabalha-se com simulação. O primeiro leva a custos, muitas vezes substanciais, sem contar no tempo e na burocracia de compras. O segundo leva somente a resultados teóricos que não trazem experiência ao projetista. A multiplataforma, embora ainda parcialmente conceitual, já está se mostrando viável para implementações rápidas e resultados comparativos diretos.

6. CONCLUSÃO

A multiplataforma descrita neste trabalho é um sistema idealizado para facilitar testes e validações tanto de algoritmos de atitude quanto dos seus componentes embarcados, principalmente os sensores. Ela se justifica uma vez que muitos projetos no âmbito acadêmico exploram somente simulações deste tipo de sistema, que por mais realista que seja, não condizem com as limitações e aspectos que podem surgir em uma implementação real. Ademais, percebe-se que há um grande hiato temporal entre a etapa de concepção do projeto e os testes práticos de validação, que geralmente ocorrem na última etapa do projeto. Neste ponto, a multiplataforma visa encurtar o tempo para atingir ensaios práticos e validações de *hardware* e *softwares* embarcados.

A modularidade proposta com o uso de múltiplos microcontroladores na plataforma é uma tendência que evita a sobrecarga de processador quando utilizado apenas um microcontrolador central. Apesar de um maior número de processadores, o uso de sistemas distribuídos pode reduzir custos, pois minimiza cablagens, conexões entre sistemas, e, como ponto principal, permite a reelaboração do projeto de subsistemas específicos sem que os demais sejam alterados ou impactados.

O estudo de caso apresentado na última seção pode ser realizado de forma muito rápida com a plataforma. As comparações qualitativas de desempenho podem ser feitas de várias formas, inclusive de forma visual, pela interface gráfica em tempo real. Testes comparativos para avaliar a calibração dos sensores e a comparação de desempenho entre os conjuntos de sensores foi bastante facilitada pelo processo proposto. Desta forma, espera-se que a versão final a multiplataforma atue como uma excelente ferramenta para auxílio no desenvolvimento de sistemas de determinação de atitude.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho. Ao CREA-PR (via CEEE) pelo fomento para publicação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Batista, D.S., Granziera Jr., F., Tosin, M.C., and de Melo, L.F. (2014). Sistema Mecatrônico baseado em Sensores

- MEMS voltado à Determinação de Atitude em Pequenos Satélites. In *XX Congresso Brasileiro de Automática*, 3190–3197. Belo Horizonte.
- Bauer, P. and Bokor, J. (2010). Development and hardware-in-the-loop testing of an Extended Kalman Filter for attitude estimation. In *2010 11th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, 57–62. IEEE.
- Caruso, M.J. (2000). Applications of magnetic sensors for low cost compass systems. In *IEEE 2000. Position location and navigation symposium (Cat. No. 00CH37062)*, 177–184. IEEE.
- Haddox, P.G. (2014). The Development of a Hardware-in-the-Loop Attitude Determination and Control Simulator for IlliniSat-2. In *52nd Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia.
- Harrison, W.S., Tilbury, D.M., and Yuan, C. (2011). From Hardware-in-the-Loop to Hybrid Process Simulation: An Ontology for the Implementation Phase of a Manufacturing System. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.
- Lizarraga, M., Dobrokhodov, V., Elkaim, G., Curry, R., and Kaminer, I. (2009). Simulink Based Hardware-in-the-Loop Simulator for Rapid Prototyping of UAV Control Algorithms. In *AIAA Infotech@Aerospace Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia.
- Markley, F.L. and Crassidis, J.L. (2014). *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control*, 1–16. Springer New York, New York, NY.
- MathWorks® (2022). ARM Support from Embedded Coder. Disponível em: www.mathworks.com/hardware-support/arm.html. Acessado em Agosto de 2022.
- Rodrigues, V.C., Silva, G.B., Batista, D.S., Tosin, M.C., and Granziera, F. (2018). Numerical error and temporal analysis of embedded magnetic sensor calibration using arm cortex-m4 processor. In *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 1387–1394.
- Sidi, M.J. (1997). *Spacecraft Dynamics and Control: A Practical Engineering Approach*. Cambridge Aerospace Series. Cambridge University Press.
- Steffes, S., Samaan, M., Conradt, M., and Theil, S. (2011). Reconfigurable Hardware-in-the-Loop Test Bench for the SHEFEX2 Hybrid Navigation System Experiment. In *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia.
- Takahashi, N.S., Santana, T.A.S., Granziera Jr., F., and Tosin, M.C. (2010). Accelerometer and Magnetometer Auto-Calibration Algorithm for Attitude Determination. *Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications*, II(3), 11–19.