



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE HORIZONTE ARTIFICIAL
ELETRÔNICO**

ARTUR KIELING SOMENZI

Campo Grande - MS

Novembro de 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE HORIZONTE ARTIFICIAL
ELETRÔNICO**

ARTUR KIELING SOMENZI

Trabalho de Conclusão de Curso (Relatório Técnico) apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, em cumprimento às exigências legais para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Computação, sob a orientação do Prof. Fábio Iaione.

Campo Grande - MS
Novembro de 2024

RESUMO

A aviação geral, contempla todas as operações aéreas civis, exceto serviços de transportes regulares e não regulares (taxi aéreo). Inclui a aviação executiva, instrução de voo, busca e salvamento civil e aviação agrícola, que, em sua maioria, são operados por aeronaves de pequeno porte e sem pressurização.

Por sua natureza, inclui muitas operações com orçamentos limitados, o que exige que os equipamentos sejam não apenas eficazes, mas também economicamente viáveis. Integrar tecnologias acessíveis e confiáveis que aumentem a eficiência operacional dessas aeronaves, muitas vezes limitadas pela ausência de pressurização, podem aumentar a segurança dos voos por elas realizados.

Nesse contexto, um sistema baseado em giroscópios MEMS, dispositivos miniaturizados que permitem a medição da taxa de rotação em diversas aplicações, cuja operação se baseia no efeito Coriolis, oferece uma alternativa eficiente e de baixo custo. Esse sistema permite complementar as informações necessárias à segurança nos voos em condições de instrumento, ou condições visuais nulas ou extremamente restritas. Portanto, o objetivo desse trabalho foi desenvolver um horizonte artificial eletrônico.

O protótipo integrou tecnologias acessíveis e confiáveis, tais como: um *Single Board Computer* Raspberry pi 4; módulos sensores BMI 160 e BMP 280; visor LCD de 4 polegadas, que combinadas com um firmware que integra os dados fornecidos por esses sensores e fornece as informações necessárias em um equipamento eletrônico de horizonte artificial.

Com fácil operação, o protótipo atendeu positivamente os requisitos operacionais, apresentando as informações necessárias para atuar como equipamento de apoio em aeronaves não pressurizadas.

Palavras-chaves: Horizonte Artificial, Sistema embarcado, Raspberry pi, Giroscópios.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	<i>Página</i>
Figura 1 – Giroscópio Horizonte Artificial.....	13
Figura 2 – Diagrama do Sistema de Detecção MEMS.....	15
Figura 3 – Diagrama de Acelerômetro Piezoelétrico.....	18
Figura 4 – Diagrama de Barramento I2C.....	18
Figura 5 – Diagrama de Conexão Escravos e Mestre no Barramento I2C.....	19
Figura 6 – Diagrama Básico de Montagem do Hardware.....	22
Figura 7 – Single Board Raspberry Pi 4.....	23
Figura 8 – <i>Módulo Sensor BMI 160</i>	24
Figura 9 – Módulo Sensor BMP 280.....	25
Figura 10 – Visor.....	26
Figura 11 – Imagem da interface gráfica.....	26
Figura 12 – Fluxograma do <i>Software</i>	27
Figura 13 – Imagem do transferidor dos testes.....	31
Figura 14 – Ilustração Didática dos Testes.....	32
Figura 15 – Imagens dos Testes Realizados.....	32

LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
Tabela 1 – <i>Pitch up</i>	33
Tabela 2 – <i>Pitch Down</i>	33
Tabela 3 – <i>Roll R</i>	34
Tabela 4 – <i>Roll L</i>	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CROSSCHECK	- Conferência cruzada
ATTITUDE	- Posição angular da aeronave nos eixos de referência
AI DIGITAL	- Altitude <i>indicator</i>
RBAC91	- Regulamentação Brasileira da Aviação Civil
IMC	- <i>Instrument meteorological conditions</i>
PITCH	- Arfagem
ROLL	- Rolagem
DSI	- <i>Display serial interface</i>
GPIO	- <i>General purpose input/output</i>
QNH	- Pressão reduzida ao nível do mar pelo gradiente vertical da atmosfera Padrão
YAW	- Guinada
SBC	- <i>Single Board Computer</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
1.1. Giroscópios.....	13
1.1.1. Giroscópio micro eletromecânico (MEMS).....	14
1.2. Acelerômetro.....	17
1.3. Barramento I2C.....	18
2. METODOLOGIA.....	21
2.1. Dispositivos de Hardware.....	21
2.1.1. Raspberry pi 4.....	22
2.1.2. Módulo BMI160.....	23
2.1.3. Módulo BMP280.....	24
2.1.4. Visor de cristal líquido.....	25
2.2. Software.....	27
2.2.1. Quaternions.....	28
2.2.1.1. Passo a passo do cálculo de altitude.....	29
3. RESULTADOS.....	31
4. CONCLUSÃO.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

INTRODUÇÃO

A aviação geral desempenha um papel crucial no transporte aéreo, sendo responsável por uma ampla gama de operações, desde voos recreativos até missões de transporte de pequeno porte e atividades de suporte. Também tem papel fundamental na conectividade de regiões remotas, na economia local e em operações especializadas, sendo vital para áreas onde a aviação comercial não pode operar devido às limitações geográficas ou de infraestrutura

No entanto, uma das grandes preocupações para os pilotos que operam aeronaves não pressurizadas está relacionada à segurança em condições adversas, cenário externo com visibilidade ruim ou inexistente, e à falta de instrumentos modernos, como o instrumento de horizonte artificial, que possam auxiliar na navegação e controle de voo em tempo real. Embora já existam opções de dispositivos no mercado, eles costumam ser caros, pois, antes de serem colocados para comercialização, precisam passar por processos de certificação e homologação extremamente onerosos e rigorosos.

Esse cenário resulta em poucas opções, por mais que adequadas, de alto custo, e, por essa razão, torna-se inviável adquirir equipamentos digitais e ou equipamentos duplicados para modernizar o painel dos aviões. Diante disso, acaba-se optando apenas por um único equipamento para cumprir as exigências de homologação de voos por instrumentos pela ANAC na RBAC91.205(D), que pode não ser suficiente e totalmente seguro durante uma situação de voo adversa, podendo resultar em desorientação espacial e, fatalmente, um acidente.

Neste contexto, a criação de um instrumento eletrônico de voo surge como uma solução complementar, proporcionando maior precisão na leitura dos parâmetros essenciais, como altitude e direção, satisfazendo a necessidade de um equipamento auxiliar com custo mais acessível capaz de agir como um *backup* ou ferramenta de *crosscheck*, seja para outros dispositivos digitais ou mesmo os analógicos, aumentando assim a segurança operacional.

Portanto, o objetivo desse trabalho é desenvolver um instrumento de horizonte artificial utilizando um sistema embarcado, um visor de cristal líquido e sensores.

1. Fundamentação Teórica

Esse capítulo abordará os conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho proposto.

1.1. GIROSCÓPIOS

Um instrumento de horizonte artificial serve para indicar a posição angular da aeronave em relação ao horizonte (solo). Funciona tendo como base um giroscópio, que é um dispositivo formado por um disco que gira suspenso em alta velocidade. Devido a inércia do disco, mantém sua direção fixa em relação ao círculo máximo da terra, permitindo a medição da posição angular da aeronave (Figura 1).

Figura 1 – Horizonte Artificial

Figura 1 A – Giroscópio Analógico.



Figura 1 B – Giroscópio Digital.



Fonte: blog.hangra33.com.br (Figura 1^a) e www.garmin.com (Figura 1B).

1.1.1. Giroscópio Micro Eletromecânico

Um giroscópio micro eletromecânico (MEMS – *Micro Eletromechanical Systems*) em vez de disco giratório para medir a rotação, se utiliza de uma estrutura semelhante ao do acelerômetro por variação de capacitância, mas ao invés de medir a aceleração, ele mede a velocidade angular por meio da força de Coriolis.

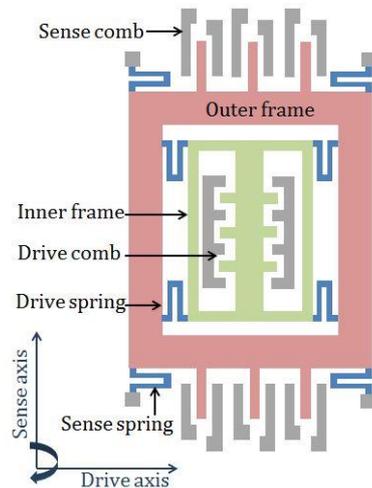
Os giroscópios MEMS são fabricados utilizando técnicas de micromaquinagem, que permitem a criação de estruturas tridimensionais em escala micrométrica. Os principais componentes de um giroscópio MEMS são (BARROS,2020):

- Estrutura Vibratória: Geralmente consiste em uma massa suspensa por feixes flexíveis que permitem a vibração em um plano específico.
- Eletrodos de Excitação e Detecção: Aplicam uma tensão alternada para excitar a vibração e detectar a deflexão devido ao efeito Coriolis.
- Circuitos Eletrônicos de Processamento: Convertem o sinal detectado em dados utilizáveis, fornecendo a taxa de rotação medida.

O funcionamento de um giroscópio MEMS é baseado em princípios da física, especialmente na conservação do momento angular e na dinâmica de vibrações. Esses componentes fazem com que quando o giroscópio gira, a força de Coriolis atue sobre o motor (*drive comb*) fazendo com que o rotor (*inner frame*) se desloque em uma direção perpendicular ao movimento de rotação, criando uma deflexão que pode ser medida. Ele usa sensores para detectar a deflexão do rotor. Essa deflexão é proporcional à taxa de rotação em torno de um eixo e é convertida em um sinal elétrico, que é então processado por circuitos eletrônicos integrados. Esse sinal pode ser calibrado e interpretado para fornecer dados precisos sobre a orientação ou a rotação do dispositivo (Figura 2).

Figura 2 – Digrama do sistema de detecção de um giroscópio do tipo MEMS, onde o *inner frame* apóia uma massa de prova que é posta para vibrar pelo *drive comb* e tudo isto é contido pelo *outer frame* que permanece estacionário para dar estabilidade a todo o sistema. Quando ocorre uma

rotação, tanto a *outer frame* quanto a *inner frame* se movem e essas movimentações são sentidas pelo *sense comb* e *sense spring* que as traduzem em termos de rotação angular.



Fonte: Chandradip Patel University of Maryland, College Park.

Os giroscópios MEMS são amplamente utilizados em dispositivos portáteis, sistemas de estabilização de imagem, e na navegação inercial de veículos aéreos e terrestres. A miniaturização e o baixo consumo de energia são vantagens significativas desses dispositivos. São amplamente utilizados em aviões para diversas funções críticas de navegação e controle de voo.

Os giroscópios MEMS desempenham um papel crucial na aviação moderna, especialmente em aeronaves não pressurizadas. Eles medem continuamente a taxa de rotação da aeronave ao redor de seus três eixos principais — *pitch* (eixo lateral), *roll* (eixo longitudinal) e *yaw* (eixo vertical). Essas medições são processadas e integradas ao longo do tempo para calcular a orientação da aeronave, proporcionando informações precisas e em tempo real sobre suas posições angulares (STUHLER, 2022).

Além disso, esses dispositivos têm um consumo energético reduzido, uma vantagem significativa em termos de eficiência operacional, especialmente em missões de longa duração. Sua robustez e resistência a vibrações são qualidades essenciais em ambientes de voo, onde condições adversas, como turbulência e variações de temperatura, são comuns (STUHLER, 2022).

Os sistemas de controle de voo (FCS – *Flight Control Systems*) também utilizam giroscópios MEMS para garantir a estabilização e controle da *attitude* (não confundir com altitude) da aeronave. Esses sistemas coletam continuamente os dados de orientação fornecidos pelos giroscópios e os utilizam para ajustar automaticamente os controles, assegurando que a aeronave mantenha a estabilidade necessária durante o voo. Essa capacidade de resposta automática não apenas melhora a segurança, mas também aumenta a capacidade de manobra da aeronave, além de reduzir significativamente a carga de trabalho dos pilotos. Isso é particularmente importante em voos de longa duração, onde o cansaço do piloto pode ser um fator crítico (BARROS, 2020).

Outro aspecto fundamental dos giroscópios MEMS é a sua integração com os sistemas de piloto automático. Esses sistemas monitoram continuamente a orientação da aeronave e enviam *feedback* ao piloto automático para corrigir qualquer desvio da trajetória de voo pré-programada. Esse controle preciso permite que a aeronave siga seu curso com mínima intervenção manual, aumentando a eficiência do voo e reduzindo a fadiga dos pilotos. Ao minimizar a necessidade de ajustes constantes durante o voo, o piloto automático melhora a segurança operacional, além de otimizar o consumo de combustível, um fator crítico em voos de longa distância (BARROS, 2020).

A literatura técnica destaca os avanços dos giroscópios MEMS como uma verdadeira revolução na aviação. De acordo com Hampson (2021), a evolução desses dispositivos permitiu uma maior precisão na navegação e controle, em comparação com sistemas giroscópios mais antigos, como os baseados em rodas de inércia. A miniaturização dos MEMS, combinada com sua capacidade de operar em condições extremas de vibração e temperatura, tornou possível seu uso em uma variedade de aplicações além da aviação comercial, incluindo drones e veículos espaciais, ampliando suas utilidades no campo aeroespacial.

Além disso, os giroscópios MEMS oferecem maior confiabilidade devido à sua arquitetura de redundância. A capacidade de auto diagnose e detecção precoce de falhas nesses sistemas permite a correção de erros em tempo real, o que é essencial em ambientes críticos de voo. Segundo Leveson (2011), a adoção de tecnologias de redundância e a capacidade de os sistemas se auto ajustarem conforme a necessidade aumentam significativamente a segurança,

garantindo que, mesmo diante de uma falha parcial, a operação do voo possa continuar sem comprometer a integridade da missão.

Por fim, além de sua precisão e robustez, o custo-benefício dos giroscópios MEMS tem facilitado sua adoção em uma ampla gama de plataformas aéreas, incluindo aviões de pequeno porte usados na aviação geral. De acordo com Leland (2022), a capacidade de produzir esses dispositivos em massa a um custo relativamente baixo tem contribuído para sua ampla utilização, permitindo que até mesmo operadores com orçamentos limitados acessem tecnologias avançadas de navegação e controle.

Em resumo, os giroscópios MEMS transformaram o cenário da aviação moderna, proporcionando maior precisão, eficiência e segurança tanto em aeronaves comerciais quanto em plataformas menores. Seus benefícios — desde a miniaturização até a capacidade de operar em ambientes extremos — têm impulsionado a inovação em diversas áreas da aviação, e as futuras evoluções prometem ainda mais avanços, especialmente no que tange à integração com tecnologias emergentes, como inteligência artificial e sistemas de controle autônomo.

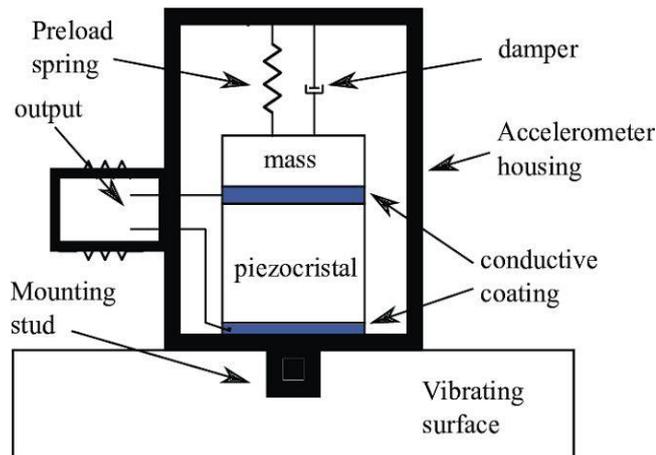
1.2 Acelerômetro piezoelétrico

Os acelerômetros piezoelétricos são sensores que medem a aceleração usando o efeito piezoelétrico, no qual certos materiais geram uma carga elétrica quando submetidos a uma força mecânica (como pressão ou vibração) conforme pode ser visto na Figura 3.

Em um acelerômetro piezoelétrico, uma massa acoplada ao elemento piezoelétrico exerce pressão sobre o material sensível ao movimento, gerando uma carga proporcional à força aplicada. Essa carga elétrica é então convertida em um sinal de tensão, que é processado para medir a aceleração.

O sensor BMI160 possui três deles organizados em três eixos, permitindo que ele possa ser usado para medir a aceleração em um espaço tridimensional.

Figura 3 – Diagrama demonstrando a estrutura de um acelerômetro piezoelétrico, onde um sistema massa mola amortecido é colocado sobre um cristal piezoelétrico que quando deformado gera um sinal elétrico, que é detectado pelo sensor e pode ser usado para medir aceleração



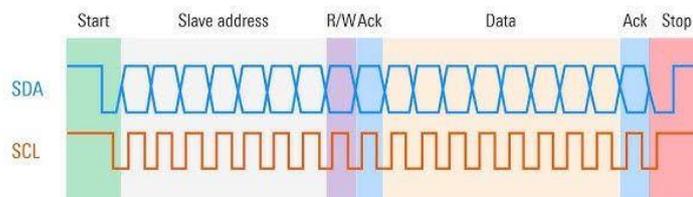
Fonte: Romanssini et al. (2023).

1.3 Barramento I2C

O protocolo I2C (*Inter Integrated Circuit*) conforme apresentado na Figura 4, é um protocolo de comunicação serial síncrono muito usado para conectar dispositivos de baixa velocidade, como sensores e microcontroladores, em distâncias curtas.

Figura 4 – Diagrama demonstrando como se dá a comunicação em um barramento I2C entre o escravo e o mestre, quais são as fases, e como isso é relacionado ao sinal de *clock* do dispositivo.

Overview of I2C frames

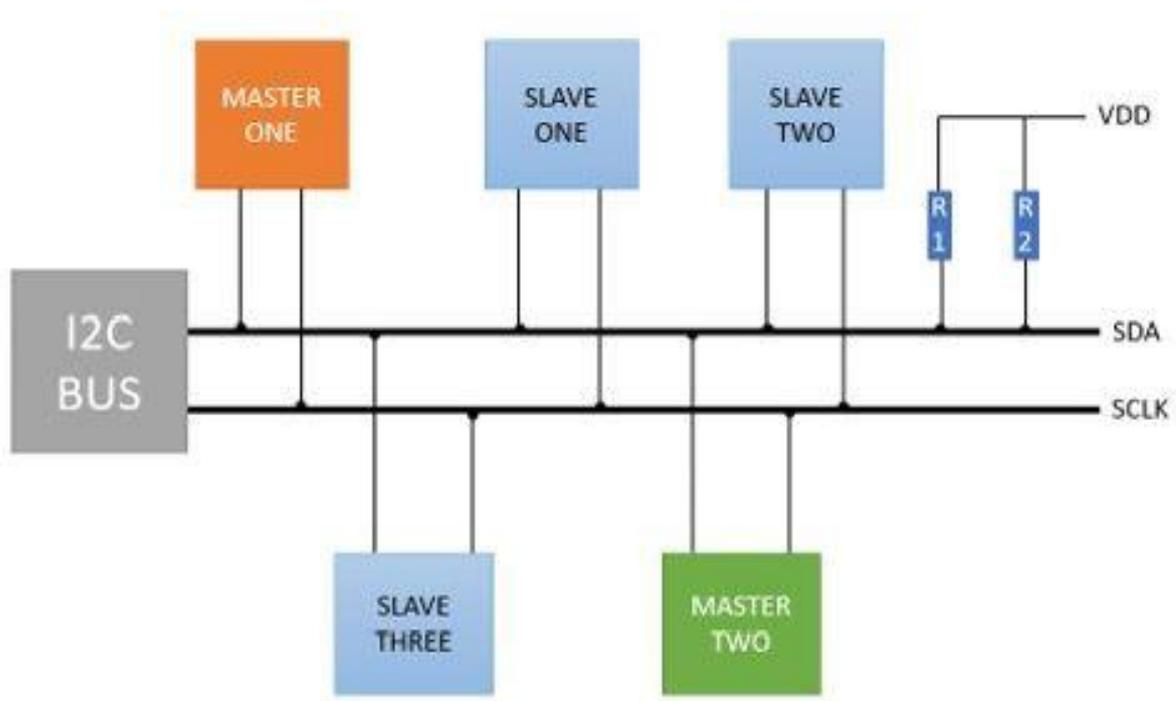


Esse protocolo foi desenvolvido pela Philips e permite a comunicação entre múltiplos dispositivos usando apenas duas linhas:

1. **SDA (Serial Data Line)**: linha de dados, responsável pela transmissão e recepção de bits de dados.
2. **SCL (Serial Clock Line)**: linha de *clock*, usada para sincronizar o envio e a recepção dos bits de dados entre os dispositivos.

O barramento I2C, representado na Figura 5, permite uma configuração de barramento com múltiplos dispositivos e funciona no modo mestre-escravo. Onde o mestre controla a comunicação, gera o sinal de *clock* e seleciona o dispositivo a se comunicar, enquanto o escravo responde aos *inputs* do mestre e possui um endereço único no barramento, que permite ao mestre comunicar-se com os diferentes dispositivos individualmente.

Figura 5 – Diagrama de como ficam ligados os escravos e o mestre em um barramento I2C.



Fonte: <https://www.design-reuse.com/articles/54776/i2c-interface-timing-specifications-and-constraints.html>.

2. Metodologia

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desse trabalho, incluindo os dispositivos de hardware utilizados, os protocolos de comunicação para estabelecer a conexão entre esses dispositivos e o software desenvolvido, são descritos a seguir.

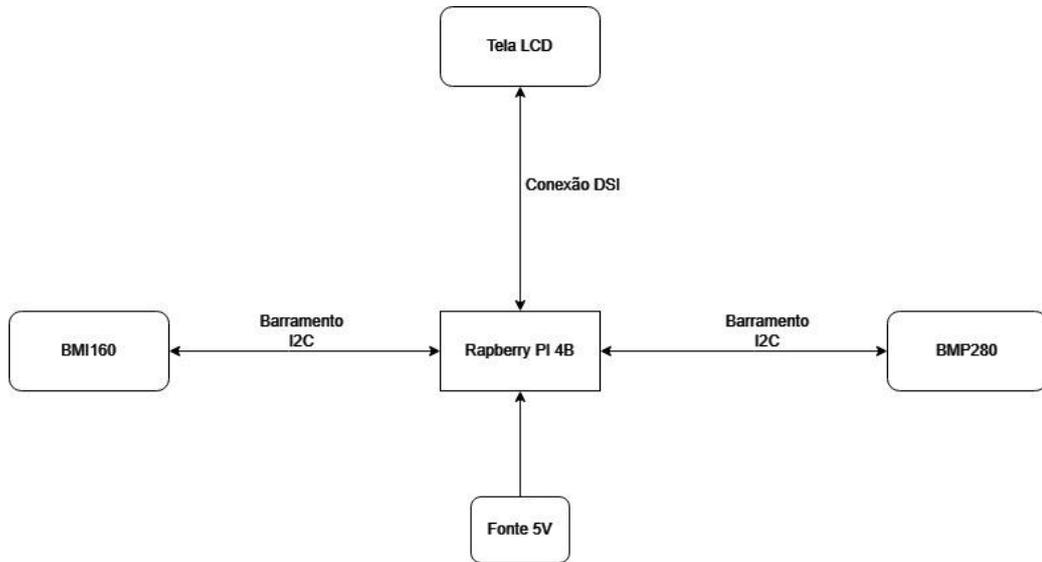
2.1 Dispositivos de Hardware

No desenvolvimento do protótipo foram utilizados os seguintes dispositivos de hardware:

- *Single Board Computer* Raspberry pi 4 8GB;
- Módulo Sensor BMI 160;
- Módulo Sensor BMP 280;
- Visor 4 polegadas, Touch Screen LCD, 480×800, *Display Serial Interface*, IPS;
- Cabos e jumpers;
- Matriz de contatos.

A Figura 6 mostra o diagrama de blocos do protótipo construído.

Figura 6 - Diagrama mostrando como os sensores e o visor LCD estão conectados ao raspberry pi. Através do barramento I2C, a placa pode se comunicar com os sensores para obter os dados necessários, para processá-los e apresentar as informações através do visor conectado por DIS, ao usuário. Todo o sistema é alimentado por uma fonte de 5V.



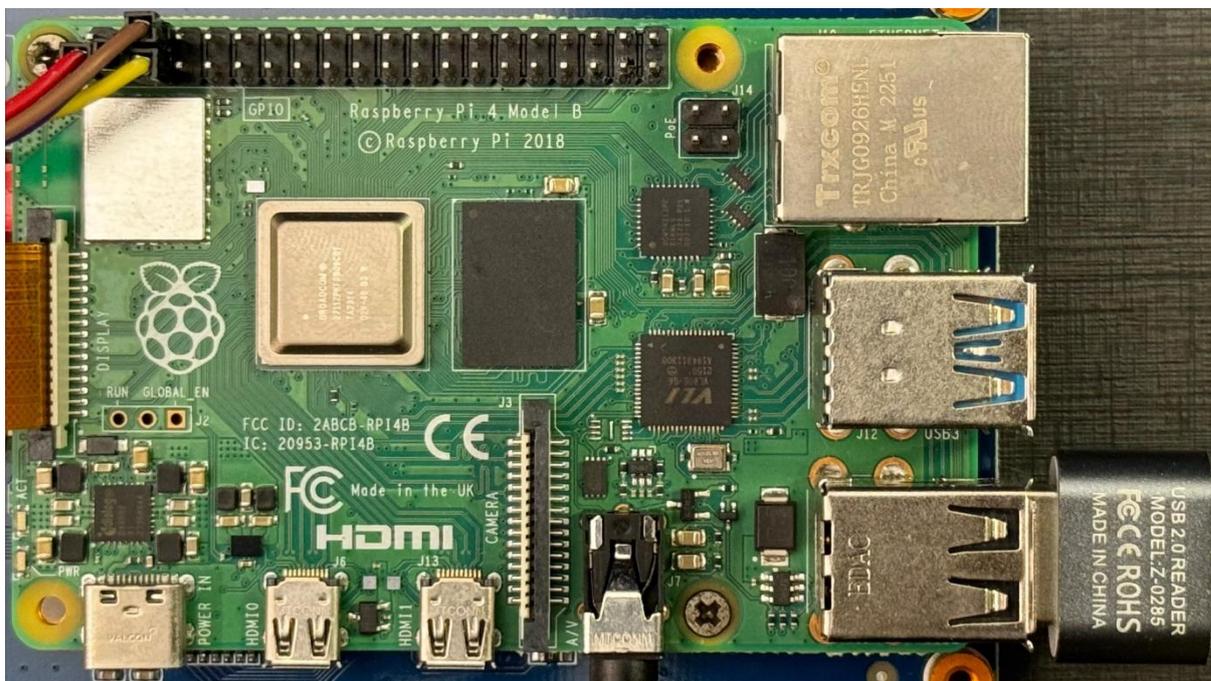
Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir cada dispositivo de hardware será descrito com mais detalhes.

2.1.1 Raspberry pi 4

O Raspberry pi 4 é um SBC, com um processador *Broadcom*, quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1,5GHz e 8GB de memória RAM, dotado de pinos GPIO que são multifuncionais, com compatibilidade à vários barramentos, nesse projeto, o barramento I2C (Figura 7).

Figura 7 – Visão superior de uma placa Raspberry pi 4 onde pode se ver todos os seus conectores e componentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Raspberry pi4 é alimentado por uma fonte de 5 volts, possui portas USB e de conexão com internet (não utilizada nessa aplicação). Durante a montagem e testes, foi utilizado um teclado para o processo de programação. Além das portas já mencionadas, dispõe de porta DSI (*Display Serial Interface*) que é uma interface de comunicação projetada para conectar displays, como telas LCD e OLED, a microcontroladores e processadores. Essa foi a conexão utilizada para o visor LCD. Esse SBC é relativamente barato, em torno de R\$ 250,00, e que possui muitos recursos e capacidade relativamente elevada de processamento de dados e gráficos.

O Raspberry pi4 possui dimensões relativamente pequenas, 105 mm x 68 mm x 40 mm, com massa de 161 g, o que o torna adequado para aplicações portáteis, como é o caso do instrumento de horizonte artificial desenvolvido.

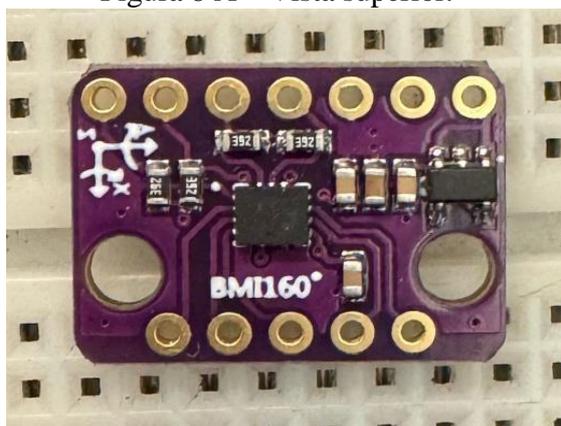
2.1.2 Módulo Sensor BMI 160

O módulo sensor BMI 160, desenvolvido pela Bosch, é dotado de um acelerômetro e um giroscópio, ambos de três eixos, sensores digitais de 16 bits, sendo que o acelerômetro possui uma taxa de atualização de até 1,6kHz e o giroscópio com uma taxa de atualização de até 6,4kHz

e fornece a velocidade da rotação em graus por segundo. A comunicação pode ser feita tanto por um barramento I2C (o protocolo escolhido para esta aplicação) quanto SPI (Figura 8). Os acelerômetros foram desenvolvidos para serem sensíveis a pequenas alterações nas forças Gs. Com isso foi possível utilizar os giroscópios juntamente com os acelerômetros, para medir com precisão o *pitch* (arfagem) e *roll* (rolagem), e assim apresentar essas informações ao usuário através da interface gráfica. O sensor está conectado ao Rapsberry PI através de 4 pinos GPIO, sendo dois dedicados a comunicação I2C e os outros dois a alimentação elétrica do sistema 3,3V.

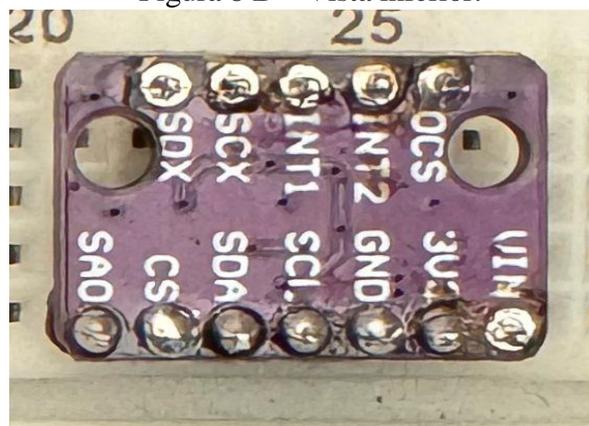
Figura 8 – Imagens do módulo BMI 160

Figura 8 A – Vista superior.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 B – Vista inferior.



2.1.3 Módulo Sensor BMP 280

O módulo sensor BMP 280 (Figura 9), também desenvolvido pela Bosch, e baseado em piezo-resistências que fornecem, primariamente, indicações de pressão atmosférica absoluta e temperatura. Ele também é capaz de comunicação através de barramento I2C. Este sensor é usado para se obter a altitude através da medida de pressão atmosférica absoluta e temperatura, cujos referenciais iniciais devem ser informados pelo piloto, após o cruzamento de informações com o altímetro de cada avião, para que ambos operem com o mesmo referencial.

Este sensor pode apresentar um erro considerável na inicialização. Por essa razão, durante os testes desse dispositivo, foi utilizado um aplicativo de altitude barométrica de um Iphone 15 Pro que possui um sensor de pressão com uma boa precisão. Após essas calibrações, também se optou por criar uma forma de configurar dois valores do sensor sempre que o dispositivo for inicializado. Ao se ajustar o valor do QNH (Pressão reduzida ao nível do mar pelo gradiente vertical da atmosfera padrão) e o valor da altitude média ao nível do mar no local onde está o dispositivo, o sensor forneceu uma boa exatidão na medição da altitude com variações de ± 10 pés em relação a referência (Iphone 15). Tendo uma resolução de 24bits e precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$ (0-65°C)

Figura 9 – Imagens do módulo sensor BMP280.

Figura 9 A - Vista superior.

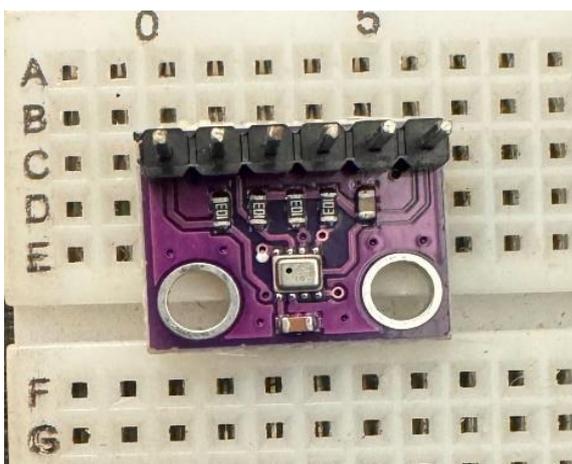
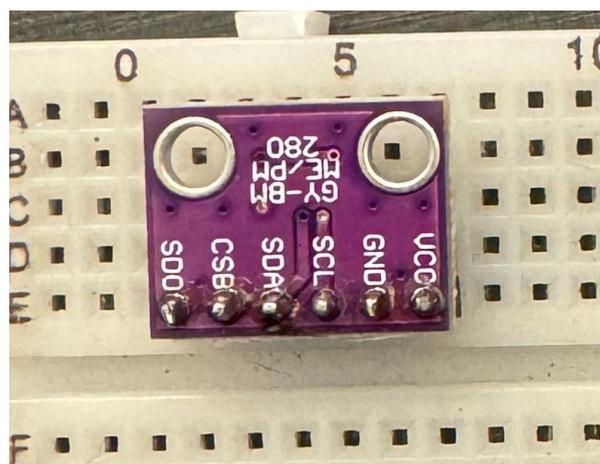


Figura 9 B – Vista inferior.

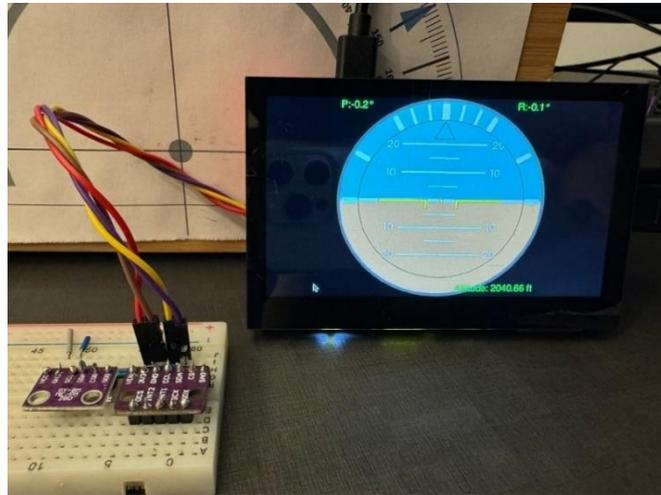


Fonte: Elaboradas pelo autor

2.1.4 Visor de Cristal Líquido

O visor de cristal líquido utilizado, *waveshare 4.3inch* DSI LCD, é de 4 polegadas, resolução de 480 x 800 pixels, interface DSI e tecnologia IPS, com *touch screen*, permitindo assim, mostrar botões na própria tela, para que as informações de altitude e de QNH, possam ser alteradas diretamente pelo usuário. A conexão com o Raspberry Pi é via porta DSI (Figura 10).

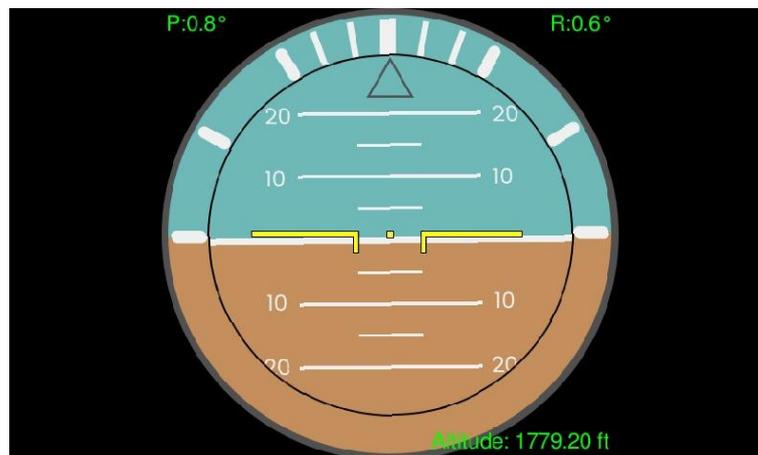
Figura 10 – Visor mostrando a imagem obtida após as calibrações iniciais, durante execução dos testes.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na figura abaixo é possível ver as informações apresentadas ao usuário. No canto superior esquerdo, denotado por “P” são mostrados os graus de arfagem. No canto superior direito, denotado por “R” são mostrados os graus de rolagem. No canto inferior direito, denotado por “Altitude” é indicada a altitude em pés. No círculo azul e marrom está representado a linha do horizonte onde o azul representa o céu e o marrom o solo. É através deles que o piloto obtém a sua referência.

Figura 11 – Imagem da interface gráfica vista pelo usuário durante a utilização.



Fonte: Elaborada pelo autor.

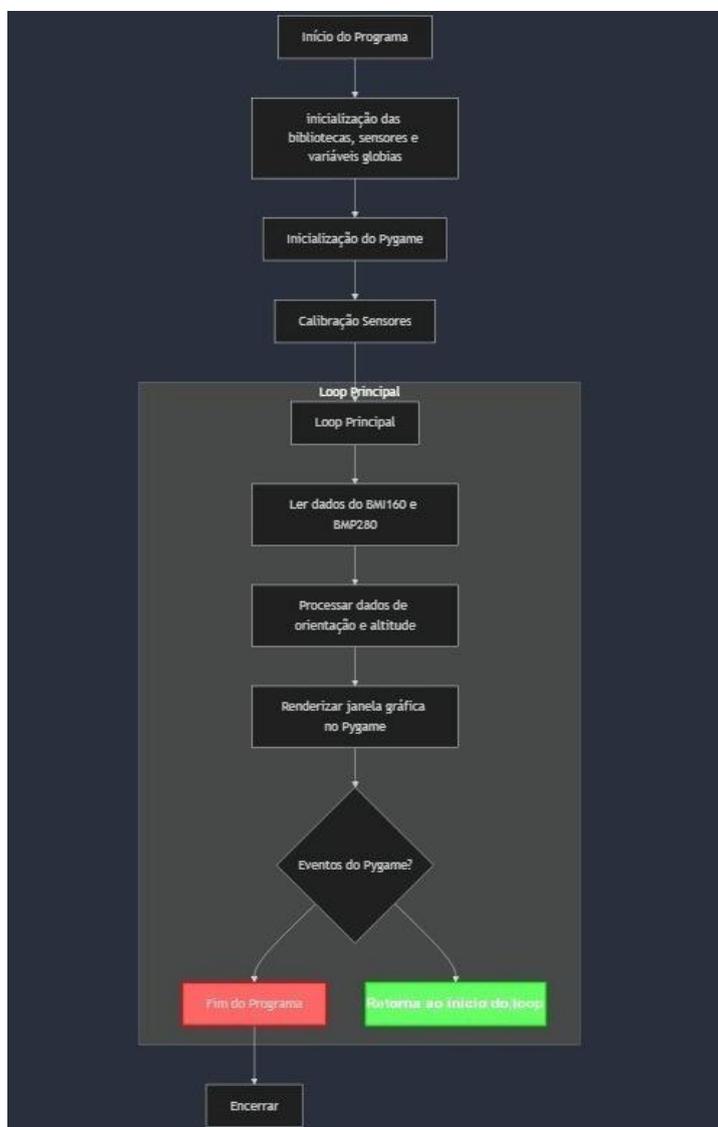
2.2 Software

O código foi desenvolvido em linguagem python 3 no próprio RBPi, no qual foi instalado o sistema operacional Linux. Em sua versão atual o código fonte possui 264 linhas.

A parte gráfica foi implementada utilizando a biblioteca PyGames, versão 2.6.0, e a parte do código responsável por processar as informações do sensor BMI160 utiliza a biblioteca *imufusion* que se baseia em quaternions para calcular os ângulos de arfagem e rolagem.

Na figura 12 é ilustrado o fluxograma do software.

Figura 12 – Fluxograma do Software



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.1 Quaternions

Quaternions são uma maneira compacta e eficiente de representar rotações em 3D, evitando problemas que outras representações, como ângulos de Euler, podem ter. Diferente dos ângulos de Euler, que sofrem com singularidades (também conhecidas como "*gimbal lock*"), quaternions não apresentam essas limitações, tornando-os ideais para sistemas de navegação e controle de *attitude*, como em um horizonte artificial.

A Representação de um Quaternion se dá através da equação 1 abaixo:

$$\text{Equação 1: } \mathbf{q} = w + x \mathbf{i} + y \mathbf{j} + z \mathbf{k}$$

$q = (w,x,y,z)$, onde: w é o componente escalar e x, y, z são os componentes vetoriais.

No contexto de rotações tridimensionais, o quaternion é utilizado para representar a rotação de um objeto em torno de um eixo específico no espaço 3D. No caso do sensor BMI160, ele mede as acelerações (acelerômetro) e as taxas de rotação (giroscópio) ao redor dos três eixos (x, y e z). O quaternion, então, descreve a *attitude* do objeto, ou seja, sua posição angular no espaço tridimensional, levando em consideração essas medições.

A biblioteca *IMUFusion*, que é usada para calcular a *attitude* do sistema, determina a orientação do objeto com base nos dados dos sensores de movimento. Ela combina os dados do acelerômetro e do giroscópio para fornecer uma estimativa precisa da orientação do sistema, sem a necessidade de um magnetômetro.

Como o Acelerômetro e o Giroscópio são Usados em Conjunto:

- Acelerômetro: O acelerômetro mede a aceleração linear em três direções (x, y, z). Para estimar a inclinação do dispositivo, ele usa a gravidade da Terra para calcular a posição angular em relação ao solo. O valor do acelerômetro é fundamental para corrigir a deriva do giroscópio, que ocorre devido ao acúmulo de erros nas medições de rotação ao longo do tempo.

- Giroscópio: O giroscópio mede a taxa de rotação ao redor dos três eixos. Ele fornece dados sobre a velocidade angular do dispositivo, permitindo a estimativa de sua rotação instantânea. No entanto, o giroscópio tende a acumular erros ao longo do tempo, fazendo com que sua estimativa de orientação se distancie da realidade, o que é conhecido como "deriva" que é o erro acumulativo em sua medição ao longo tempo, causado principalmente por ruído

eletrônica, variações de temperatura ou imperfeições no sensor. Isso faz com que o valor integrado da velocidade angular se desvie progressivamente da realidade mesmo na ausência de movimento.

A *IMUFusion* combina os Dados por meio da função *update_no_magnetometer* da biblioteca *IMUFusion*, que faz a fusão dos dados do giroscópio e do acelerômetro para gerar uma posição angular precisa do sistema.

Essa função ajusta continuamente a orientação do sistema com base nas medições de rotação fornecidas pelo giroscópio e nas informações de inclinação fornecidas pelo acelerômetro. O algoritmo de fusão de dados realiza a integração das taxas de rotação do giroscópio ao longo do tempo enquanto utiliza o acelerômetro para corrigir e estabilizar o cálculo da orientação, garantindo que o sistema mantenha uma estimativa precisa da *attitude* ao longo do tempo.

Esse processo gera um quaternion que representa a rotação do sistema no espaço 3D de maneira contínua e precisa, sem depender de um magnetômetro.

2.2.1.1 Passo a Passo do Cálculo da Altitude no Código

A altitude é calculada usando o sensor BMP280, que mede a pressão atmosférica. Esse sensor permite calcular a altitude com base na diferença entre a pressão medida e a pressão de referência ao nível do mar. A seguir são apresentadas as etapas para o cálculo da altitude.

- **Configuração da Pressão ao Nível do Mar:** no início, a pressão ao nível do mar é definida a partir de uma variável global e então atribuída ao método *bmp280.sea_level_pressure*. Isso é essencial para que o BMP280 possa estimar a altitude relativa ao nível do mar do dispositivo.

- **Ajuste da Altitude Local:** após a inicialização e aquecimento do BMP280, o código ajusta a altitude local em metros com base na constante *local_altitude_ft*, que é convertida para metros ($bmp280.altitude = local_altitude_ft / M_TO_FEET_CONST$). Isso ajuda a calibrar a altitude medida para que ela comece de uma altura específica, corrigindo eventuais desvios iniciais.

- **Cálculo Contínuo da Altitude:** dentro do loop principal, o código obtém a altitude a cada 0.5 segundos chamando *bmp280.altitude*. Essa altitude é convertida de metros para pés com a constante *M_TO_FEET_CONST* para exibição: $\text{altitude} = \text{bmp280.altitude} * \text{M_TO_FEET_CONST}$.

Internamente, o modulo BMP280 usa a fórmula barométrica para calcular a altitude a partir da pressão conforme equação 2:

Equação 2:

$$\text{altitude} = 44330 \times \left(1 - \left(\frac{\text{pressão}}{\text{pressão ao nível do mar}} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right)$$

Onde:

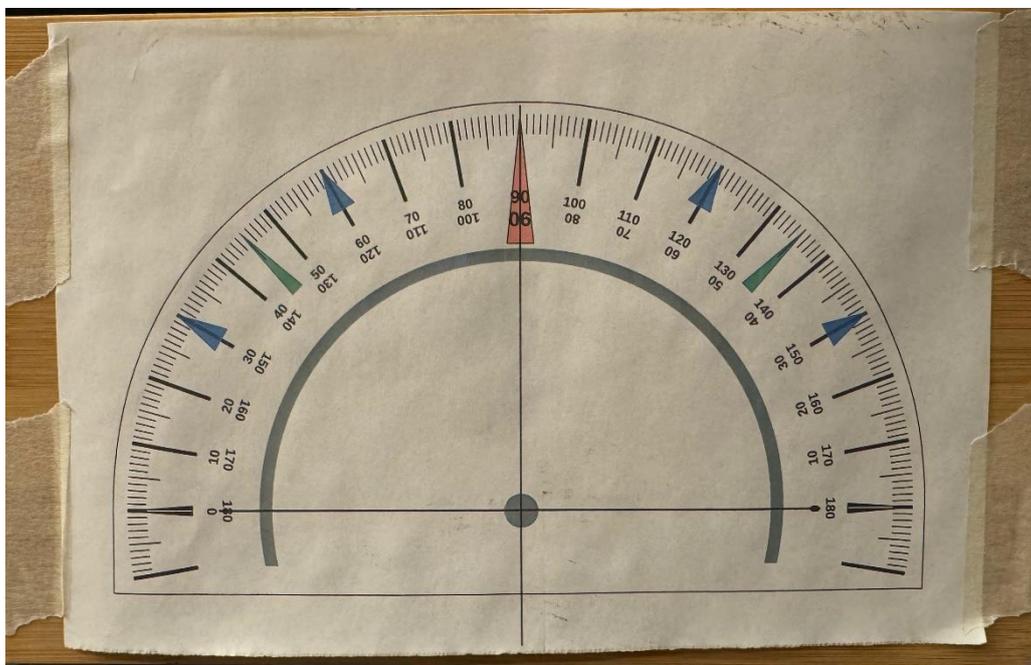
Pressão: é a pressão atmosférica atual medida pelo sensor.

Pressão ao nível do mar: é a pressão configurada na variável global (nome dela).

3. Testes e Resultados

Os testes para averiguar a acurácia do horizonte artificial desenvolvido foram realizados utilizando um transferidor de 180°, impresso em papel e fixado em uma estrutura rígida (Figura 13). O sensor foi posicionado em vários ângulos diferentes de arfagem e rolagem, e as informações apresentadas pelo dispositivo foram confrontadas com a marcação do transferidor.

Figura 13 – Imagem do transferidor de 180° construído para a realização dos testes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizados quatro testes: para rolagens à direita, rolagens à esquerda, arfagem positiva e arfagem negativa (Figura 14).

Figura 14 – Ilustração didática dos testes.

Figura 14 A – Imagem *Pitch Up*



Figura 14 B – Imagem *Pitch Down*



Figura 14 C – Imagem *Roll R*



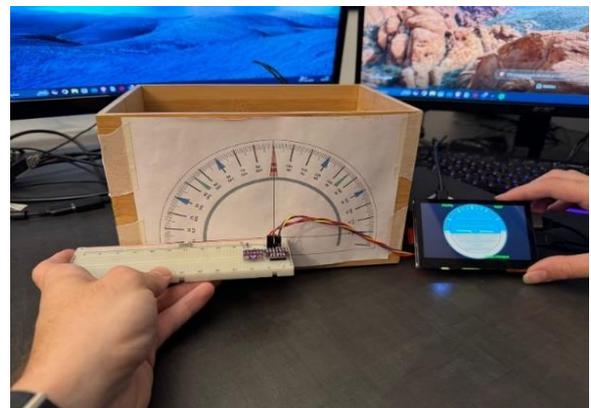
Figura 14 D – Imagem *Roll L*



Fonte: Elaboradas pelo autor.

Em cada um desses testes foram realizadas cinco medidas para cada ângulo (Figura 15).

Figura 15 – Imagens dos testes realizados.



Fonte: Elaboradas pelo autor.

Desses resultados, foram calculados o erro médio (EM), desvio padrão (PD), erro médio relativo (EMR) e o desvio padrão relativo (DPR).

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos nos testes de arfagem positiva.

Tabela 1 – Resultados dos testes de arfagem positiva (*Pitch UP*), quando o nariz da aeronave sobe e a cauda desce.

ref(°)	M1(°)	M2(°)	M3(°)	M4(°)	M5(°)	EM(°)	DP(°)	EMR(%)	DPR(%)
5	5,20	5,00	5,10	5,00	5,20	0,10	±0,10	2	±2
10	9,90	9,80	10,00	9,90	10,00	-0,10	±0,08	-1	±0,8367
15	15,00	14,80	15,20	15,00	15,10	0,00	±0,15	0	±0,9888
20	19,80	20,00	20,20	19,80	20,10	0,00	±0,18	0	±0,8944
25	25,00	25,00	24,80	25,10	25,20	0,00	±0,15	0	±0,5933
30	30,10	30,00	29,10	30,00	29,80	0,00	±0,41	0	±1,354
Média								0,167	±1,1112

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos testes de arfagem negativa.

Tabela 2 – Resultados dos testes de arfagem negativa (*Pitch DOWN*), quando o nariz da aeronave desce e a cauda sobe.

ref(°)	M1(°)	M2(°)	M3(°)	M4(°)	M5(°)	EM(°)	DP(°)	EMR(%)	DPR(%)
-5	-5,00	-5,00	-4,80	-5,20	-5,00	0,00	±0,14	0	±2,828
-10	-9,90	-9,70	-10,00	-9,90	-10,00	0,10	±0,12	-1	±1,225
-15	-14,80	-15,20	-15,00	-14,80	-15,00	0,00	±0,17	0	±1,116
-20	-20,00	-19,20	-19,80	-20,20	-20,00	0,00	±0,38	0	±1,924
-25	-25,00	-24,80	-25,20	-25,00	-25,10	0,00	±0,15	0	±0,593
-30	-30,00	-29,90	-30,10	-30,20	-30,10	-0,10	±0,11	0,333	±0,38
Média								-0,111	±1,344

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nos testes de rolagem à direita.

Tabela 3 – Resultados dos testes de rolagem à direita (*Roll R*), quando a asa direita desce e a asa esquerda sobe.

ref(°)	M1(°)	M2(°)	M3(°)	M4(°)	M5(°)	EM(°)	DP(°)	EMR(%)	DPR(%)
5	4,90	4,80	5,30	5,00	5,10	0,02	±0,19	0,4	±3,8471
10	9,70	9,90	9,60	10,00	10,00	-0,16	±0,18	-1,6	±1,8166
20	19,80	20,00	20,10	20,00	20,10	0,00	±0,12	0	±0,6124
30	29,40	30,00	30,20	29,80	30,10	-0,10	±0,32	-0,333	±1,0541
45	44,50	44,90	45,00	45,20	45,10	-0,06	±0,27	-0,133	±0,6004
60	59,50	60,10	60,00	59,80	59,90	-0,14	±0,23	-0,233	±0,3837
90	89,80	90,00	89,90	90,00	89,90	-0,08	±0,08	-0,089	±0,093
Média								-0,398	±0,76

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos nos testes de rolagem à esquerda.

Tabela 4 – Resultados dos testes de rolagem à esquerda (*Roll L*), quando a asa direita sobe e a asa esquerda desce.

ref(°)	M1(°)	M2(°)	M3(°)	M4(°)	M5(°)	EM(°)	DP(°)	EMR(%)	DPR(%)
-5	-5,30	-4,80	-5,10	-5,00	-5,10	-0,06	±0,18	1,2	±3,633
-10	-10,10	-10,00	-9,80	-10,00	-10,10	0,00	±0,12	0	±1,225
-20	-20,30	-20,10	-19,80	-20,00	-20,00	-0,04	±0,18	0,2	±0,908
-30	-29,90	-29,80	-30,00	-30,10	-29,80	0,08	±0,13	-0,267	±0,435
-45	-45,00	-45,20	-45,00	-45,10	-45,00	-0,06	±0,09	0,133	±0,199
-60	-59,90	-60,00	-60,10	-60,00	-60,10	-0,02	±0,08	0,033	±0,139
-90	-90,00	-89,90	-90,10	-90,00	-90,00	0,00	±0,07	0	±0,079
Média								0,017	±0,497

O altímetro foi testado utilizando o sensor de pressão do *Iphone 15Pro* através do aplicativo “*my altitude*”, tendo o dispositivo ficado entre as margens de erro indicadas por esse aplicativo e se mantiveram em ±10 pés entre o dispositivo e o aplicativo utilizado como referência.

4. Conclusão

Os resultados obtidos nos testes mostraram que os erros nos ângulos de arfagem (0,167% e -0,111%) e rolagem (-0,398% e 0,017%) medidos pelo protótipo construído são relativamente pequenos, assim como as dispersões das medidas (arfagem: 1,1112% e -1,344%, rolagem 0,76% e -0,497%). Esses erros não interferem na capacidade do equipamento em fornecer as informações necessárias para se conduzir um voo em condições de instrumento. Ou seja, o equipamento atendeu às expectativas, mostrando as informações com exatidão e precisão suficientes para que possa ser usado como um instrumento de voo.

Este projeto apresentou um protótipo de horizonte artificial eletrônico para ser usado em aeronaves não pressurizadas da aviação geral.

O equipamento desenvolvido não tem a intenção, nesse primeiro momento, de ser utilizado como instrumento primário, mas sim como um *backup* e equipamento de apoio para o cruzamento de algumas informações importantes contidas nos instrumentos já embarcados da própria aeronave. O protótipo pode atuar como um segundo horizonte artificial, o que pode ser uma enorme diferença entre um voo seguro e um acidente, quando a aeronave se encontra em situação de IMC (*Instrument Meteorological Conditions*) real, ao entrar inadvertidamente nessas condições adversas durante o voo.

A maior dificuldade enfrentada durante o desenvolvimento desse trabalho foi encontrar uma forma de integrar as informações dos acelerômetros e giroscópios que foi obtida através da biblioteca *IMUFusion* e o uso de quaternions para representar rotações, com o objetivo de fornecer, ao piloto, informações de *pitch* e *roll*. Uma vez superado esse desafio, o equipamento apresentou resultados satisfatórios, atendendo a proposta de sua concepção.

O dispositivo poderá ter acréscimos de melhorias, como um módulo de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que tornaria possível trazer a informação de velocidade em relação ao solo, e um módulo magnetômetro, que aumentaria a precisão dos acelerômetros e giroscópios. Além disso, na interface gráfica, é possível adicionar botões virtuais que permitam ao piloto inserir as informações de referência para o sensor de pressão. Ainda, para permitir a portabilidade ao transportar o equipamento para a aeronave, no momento da utilização, um estojo que contenha a tela, USB-C e sensores devidamente acondicionados.

4 - Conclusão

Nas próximas versões, recomenda-se realizar mais testes no sensor de altitude, levando a bordo das aeronaves para que os testes possam ser realizados em diferentes altitudes durante o voo.

Por fim, a adaptação dos instrumentos eletrônicos para aviação geral de pequeno porte envolve considerações de exatidão, custo e acessibilidade, características essas, oferecidas pelo protótipo aqui desenvolvido. Portanto, acredita-se que o presente trabalho trouxe uma contribuição significativa para a área de aviação geral.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. ANAC. **Regulamentação legal na aviação civil brasileira.** Artigo. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao>. Acesso em 30 de out de 2024.

BARROS, A. M. **Tecnologias Avançadas em Aviação:** Instrumentação e Controle. Porto Alegre: Sagra Luzzatto. 2020. Citado nas páginas 11 e 12.

BOSCH, **Power management with external geomagnet sensor.** BM1. 160. p. 17 . Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmi160-ds000.pdf>. Acesso em 30 de out de 2024.

BOSCH, **Supported magnetometer and accelerometer power modes.** p. 17 . Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP280-DS001-11.pdf>. Acesso em 30 de out de 2024.

FISHER, B. **Advances in Avionics for General Aviation.** Aviation Press. 2021. Citado na página 12.

LELAND, R. **Cost-effective Avionics for General Aviation.** Aero Publishers. 2022. Citado na página 13.

RASPBERRY PI, <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>. p. 16. Acesso em 30 de out de 2024.

STUHLER. Jackson. **Utilização de MEMS.** Micro-ElectroMechanical Systems – sistemas Micro eletromecânico, para aplicações de circuitos de baixo custo de movimentação e sensoramento. Revista de metodologia e pesquisas, v 5; 2022. Citado na página 11.

YAZDI, N, Ayazi, F., & Najafi, K. **Micromachined Inertial Sensors.** Proceedings of the IEEE, 86(8), 1640-1659. 2014. Citado na página 11.

REFERÊNCIAS

LEVESON, N. G. **Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety**. MIT Press. 2011. Citado na página 12.

ROMANSSINI, Marcelo & de Aguirre, Paulo & Severo, Lucas & Girardi, Alessandro. (2023). A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery. Eng. 4. 1797-1817. 10.3390/eng4030102. Citado na página 18.