



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Leonardo Maia Nogueira

**Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Sinais de Baixo Custo para
Análise de Vibração em Baixas Frequências**

Florianópolis, SC
2021

Leonardo Maia Nogueira

**Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Sinais de Baixo Custo para
Análise de Vibração em Baixas Frequências**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do título de mes-
tre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Arcanjo Lenzi, PhD.

Florianópolis, SC
2021

Ficha de identificação da obra

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor.

Orientações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Leonardo Maia Nogueira

**Desenvolvimento de um Sistema de Aquisição de Sinais de Baixo Custo para
Análise de Vibração em Baixas Frequências**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) xxxx, Dr(a).

Instituição xxxx

Prof.(a) xxxx, Dr(a).

Instituição xxxx

Prof.(a) xxxx, Dr(a).

Instituição xxxx

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Coordenação do Programa de
Pós-Graduação

Prof. Arcanjo Lenzi, PhD.
Orientador

Florianópolis, SC, 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus grandes amigos e colegas e, especialmente, a Dona Jane, minha genitora.

AGRADECIMENTOS

Inserir os agradecimentos aos colaboradores à execução do trabalho.

“O amigo dá jeito.”
(LENZI, 2019)

RESUMO

Os Sistemas de Aquisição de Dados (Data Aquisition System, DAQ) se apresentam como uma parte essencial de qualquer procedimento experimental, tanto na pesquisa quanto na indústria. Ainda que o mercado ofereça opções consideradas de baixo custo os DAQs, bem como os sensores e softwares que utilizam ainda são inacessíveis para grande parte da comunidade acadêmica e pequenas empresas. Este estudo surge com o intuito de desenvolver uma alternativa opensource de baixíssimo custo para a realização da aquisição e análise de sistemas vibratórios de baixa frequência. Como aplicação específica do presente trabalho o DAQ foi desenvolvido para ser implementado como uma instrumentação pouco invasiva de um compressor hermético alternativo, comumente encontrado em refrigeradores domésticos. Ainda que a aquisição e análise sejam limitadas quando comparadas aos Sistemas de Aquisição de fornecidos pelas empresas tradicionais no mercado o sistema desenvolvido apresenta precisão e qualidade satisfatórias para as finalidades propostas e testadas.

Palavras-chave: Sistema de Aquisição. Instrumentação; Análise de Sinais Vibratórios.

ABSTRACT

Resumo traduzido para outros idiomas, neste caso, inglês. Segue o formato do resumo feito na língua vernácula. As palavras-chave traduzidas, versão em língua estrangeira, são colocadas abaixo do texto precedidas pela expressão “Keywords”, separadas por ponto.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de Cubo Compacto (MARTIN <i>et al.</i> , 1998)	16
Figura 2 – Princípio Básico de Funcionamento	18
Figura 3 – Classificação de Acelerômetros	19
Figura 4 – Acelerômetros	19
Figura 5 – Esquema de Funcionamento do Acelerômetro MEMS	20
Figura 6 – Classificação de Giroscópios	20
Figura 7 – Caption	21
Figura 8 – Giroscópio MEMS	21
Figura 9 – Classificação Básica	22
Figura 10 –	22
Figura 11 – Corpo Rígido no Espaço	23
Figura 12 – Esquemas de Medição de Corpo Rígido	24
Figura 13 – Cubo de Calibração	25
Figura 14 – Esquema Viga	27
Figura 15 – Comparativo entre o Accelerômetro piezoelétrico e MEMS	28
Figura 16 – Configuração do Experimento de Validação dos Giroscópios	28
Figura 17 – Comparativos entre o IMU e sensores piezoelétrico	29
Figura 18 – Configuração do teste combinado comparativo entre os sensores piezoelétricos e IMU MEMS	29
Figura 19 – Comparativo da aceleração total entre piezo e IMU	30
Figura 20 – Tratamento de Sinais	30
Figura 21 – Interface Analógico-Digital	31
Figura 23 – Esquema de funcionamento dos protocolos de comunicação digital (a) - I2C, (b) - SPI e (c) - I3C	33
Figura 24 – Esquema do Circuito de comunicação entre os componentes	34
Figura 25 – Experimento de Validação Giroscópio	40
Figura 26 – Experimento de Validação Giroscópio	40
Figura 27 – Experimento de Validação Giroscópio	41
Figura 28 – Experimento de Validação Giroscópio	41
Figura 29 – Experimento de Validação Giroscópio	41
Figura 30 – Experimento de Validação Giroscópio	42
Figura 31 – Experimento de Validação Giroscópio	42
Figura 32 – Experimento de Validação Giroscópio	42
Figura 33 – Experimento de Validação Giroscópio	43
Figura 34 – Experimento de Validação dos IMU	44
Figura 35 – Experimento de Validação dos IMU	44
Figura 36 – Experimento de Validação dos IMU	44

Figura 37 – Experimento de Validação dos IMU	45
Figura 38 – Experimento de Validação dos IMU	45
Figura 39 – Experimento de Validação dos IMU	45
Figura 40 – Experimento de Validação dos IMU	46
Figura 41 – Experimento de Validação dos IMU	46
Figura 42 – Experimento de Validação dos IMU	46
Figura 43 – Experimento de Validação dos IMU	47
Figura 44 – Experimento de Validação dos IMU	47
Figura 45 – Experimento de Validação dos IMU	47
Figura 46 – Experimento de Validação dos IMU	48
Figura 47 – Experimento de Validação dos IMU	48
Figura 48 – Experimento de Validação dos IMU	48
Figura 49 – Experimento de Validação dos IMU	49
Figura 50 – Experimento de Validação dos IMU	49
Figura 51 – Experimento de Validação dos IMU	49
Figura 52 – Experimento de Validação dos IMU	50
Figura 53 – Experimento de Validação dos IMU	50
Figura 54 – Experimento de Validação dos IMU	50
Figura 55 – Experimento de Validação dos IMU	51
Figura 56 – Experimento de Validação dos IMU	51
Figura 57 – Experimento de Validação dos IMU	51
Figura 58 – Experimento de Validação dos IMU	52
Figura 59 – Experimento de Validação dos IMU	52
Figura 60 – Experimento de Validação dos IMU	52
Figura 61 – Experimento de Validação dos IMU	53
Figura 62 – Experimento de Validação dos IMU	53
Figura 63 – Comparativo de protocolos de comunicação digital	54

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	SENSORES	18
2.1	ACELERÔMETROS	18
2.2	GIROSCÓPIOS	19
2.3	UNIDADE DE MEDAÇÃO INERCIAL	21
2.3.1	Medições em Corpos Rígidos	22
2.3.2	Calibração	24
2.3.2.1	Validação	27
2.4	OUTROS SENSORES	30
2.4.1	Conversor Analógico-Digital	30
2.4.2	Sensor de Posição Angular do Rotor	31
2.5	SENSOR DE CORRENTE	32
3	CIRCUITO	33
3.1	CONTROLADOR	33
3.2	COMUNICAÇÃO	33
3.2.1	Componentes Eletrônicos	34
3.3	PRÉ-PROCESSAMENTO	34
3.3.1	Integração e Derivação dos Dados	34
3.3.2	Pré-processamento	34
4	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICE A – COMPARATIVOS GIROSCÓPIO	40
	APÊNDICE B – COMPARATIVO COMBINADO	44
	ANEXO A – INTERFACES DE COMUNICAÇÃO DIGITAL	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Um dos grandes dilemas da simulação numérica é a validação dos resultados perante dados obtidos de um modelo físico real. No caso dos compressores herméticos, comumente empregados em refrigeradores, o problema está na obtenção de dados de funcionamento dos componentes internos. Para tal é normalmente utilizada uma caixa rígida de aço cuja tampa possui uma "janela" espessa de policarbonato através da qual se poder observar o kit. Apesar da citada caixa de medições, localizada no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da UFSC, possuir conectores para instrumentação o número de canais é bastante limitado (4?) para medição do movimento de corpo rígido, especialmente fora do centro de massa do mesmo (MARTIN *et al.*, 1998). Esse tipo de medição também é feito, na EMBRACO, através da observação e processamento de filmagens realizadas na caixa de medição, tomando como referência 3 LEDs localizados em pontos conhecidos do bloco do kit. Esta metodologia permite apenas estimar o movimento planar do kit, não sendo possível computar o deslocamento vertical do mesmo. Um dispositivo que se mostrou interessante para a realização das medições desejadas foi o *Inertial Measurement Unit* (IMU), contendo acelerômetros e sensores de velocidade angular triaxiais. O IMU pode ser implementado no "Esquema de Cubo Compacto", como pode ser visto na Figura 1, dessa forma permitindo as correções de aceleração para o centro de massa como na Equação (1)

$$\vec{A}_P = \vec{A}_0 + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_P) + \vec{\omega} \times \vec{r}_P \quad (1)$$

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

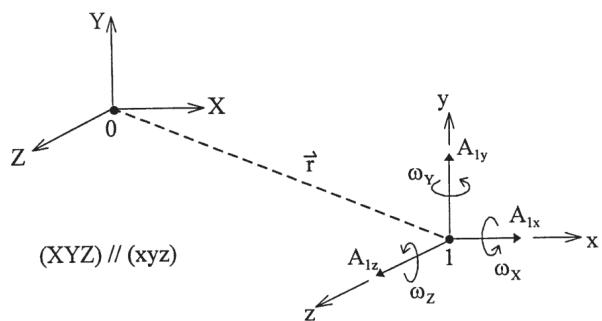


Figura 1 – Esquema de Cubo Compacto (MARTIN *et al.*, 1998)

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de aquisição e processamento de dados que seja de código aberto (Open Source) e de baixo custo para análise de vibrações de corpo rígido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver Software e configuração de Hardware OpenSource e de baixo custo
- Sistema de aquisição de dados pouco invasivo para instrumentação de compressores
- Processamento dos dados adquiridos para estimativa do comportamento dinâmico de corpo rígido
- Implementação do Sistema de Aquisição proposto em um compressor hermético alternativo típico

2 SENSORES

Nesta sessão serão apresentados os sensores utilizados e a razão de os mesmos terem sido escolhidos para a realização do presente trabalho. Também será descrito o processo de calibração dos sensores utilizados. Serão apresentados também os sensores mais comumente utilizados na medição de vibrações no setor industrial e científico.

2.1 ACELERÔMETROS

Os acelerômetros são comumente empregados no estudo de vibrações e acústica bem como em diversas áreas de pesquisa como Reabilitação Médica, Robótica, Esportes e Sistemas de Navegação (AHMAD *et al.*, 2013). Entre os diversos tipos de acelerômetro existentes no mercado se destacam os piezo-elétricos, piezo-resistivos e os capacitivos. Uma classe de sensores, dentre eles acelerômetros, que vem se popularizando cada vez mais no mercado mundial é o *Micro-eletro-mechanical System* (MEMS).

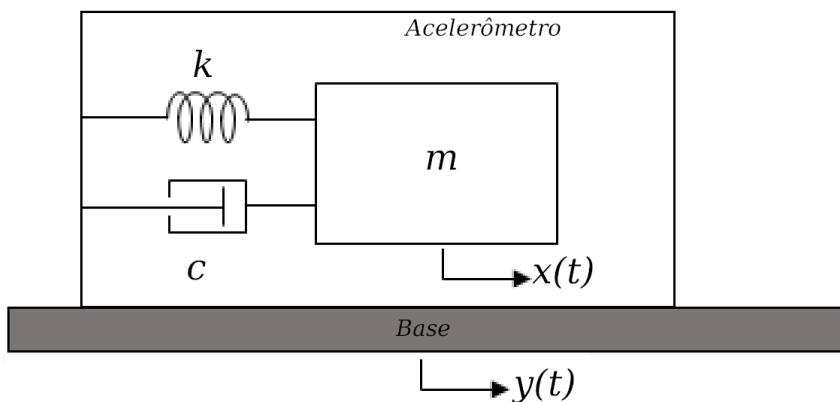


Figura 2 – Princípio Básico de Funcionamento

Os acelerômetros MEMS vêm se apresentando como uma ótima alternativa, em termos de tamanho, peso, custo e consumo de energia, aos tradicionais acelerômetros piezoelétricos, amplamente utilizados nas medições de sistemas vibratórios, inclusive apresentando uma melhor sensibilidade às baixas frequências (VARANIS *et al.*, 2018).

O princípio de funcionamento dos acelerômetros se dá na combinação de uma massa, uma mola e um amortecedor em que a base estaria fixamente acoplada ao corpo cuja aceleração se deseja medir, como pode ser visto na Figura 2. O deslocamento relativo da Massa Sísmica m é diretamente proporcional à aceleração que se deseja medir, o que é feito mensurando a a carga elétrica gerada pelo material piezoelétrico sob compressão.

Os acelerômetros *MEMS*, diferentemente dos piezoelétricos, adotam como elemento de rigidez hastes de silício que suportam uma massa sísmica. A Figura 4(a)

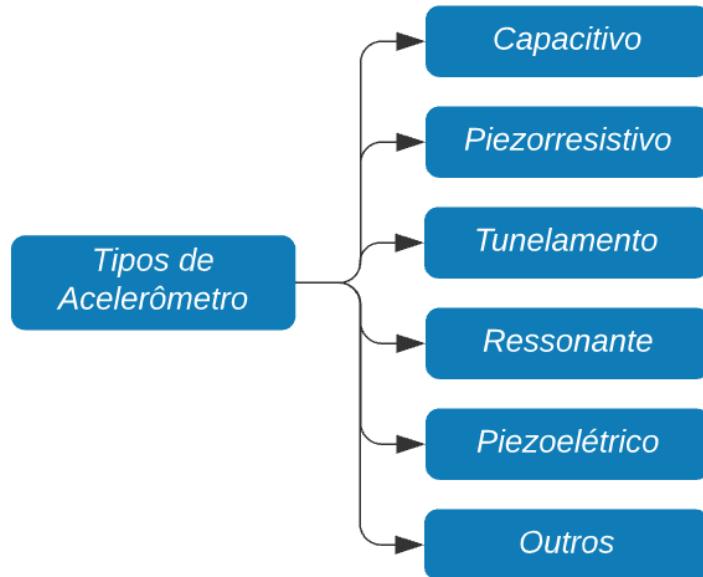


Figura 3 – Classificação de Acelerômetros

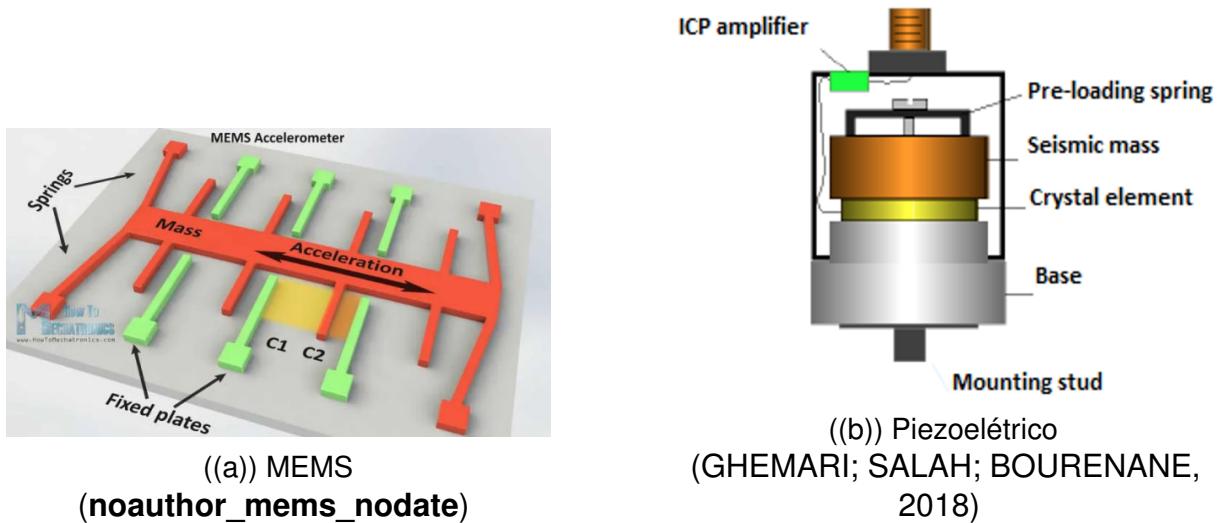


Figura 4 – Acelerômetros

ilustra internamente um acelerômetro MEMS desenvolvido por Jiangbo He (HE *et al.*, 2018). O capacitor em pente (do inglês *comb capacitor*) pode ser visto na Figura 5(b).

2.2 GIROSCÓPIOS

Os giroscópios MEMS, assim como os giroscópios ópticos (*FOG*, *RLG*) e outros tipos modernos, são dispositivos capazes de medir velocidade angular baseado na medição da força de Coriolis, diferentemente dos antigos giroscópios mecânicos, que indicavam uma orientação. A medição da velocidade angular é feita de maneira similar aos acelerômetros *MEMS*, integrando as variações de velocidade angular (VAROL, 2019). O Efeito Coriolis, que baseia o princípio de funcionamento dos giroscópios

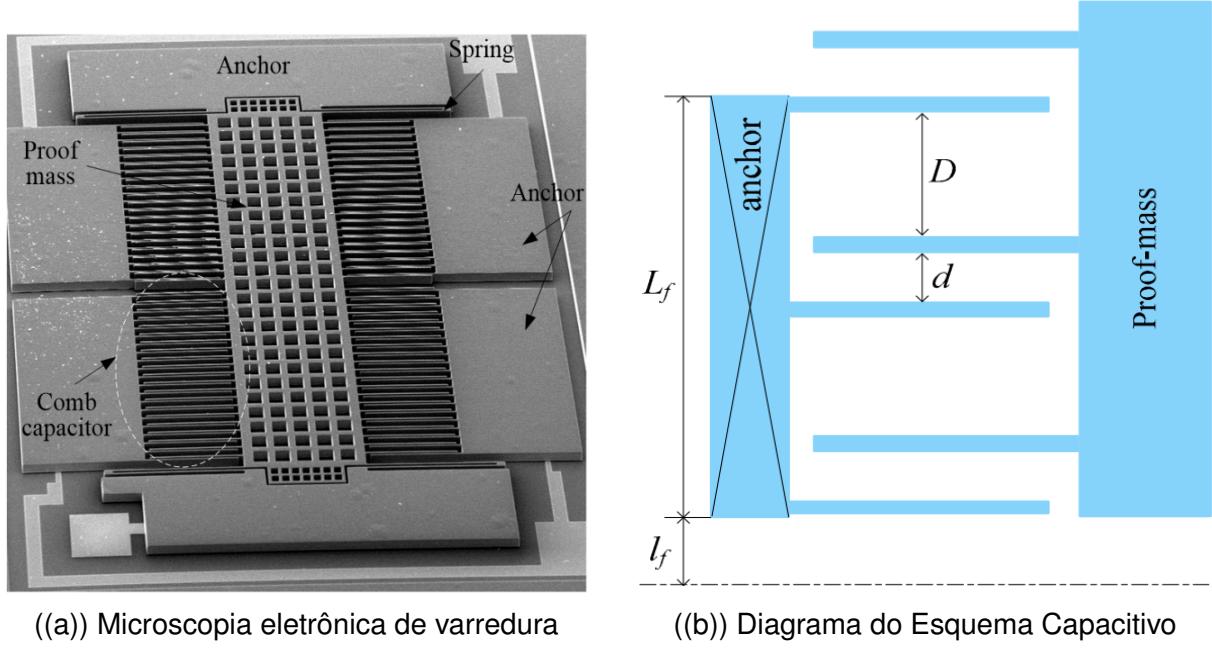


Figura 5 – Esquema de Funcionamento do Acelerômetro MEMS
(HE *et al.*, 2018)

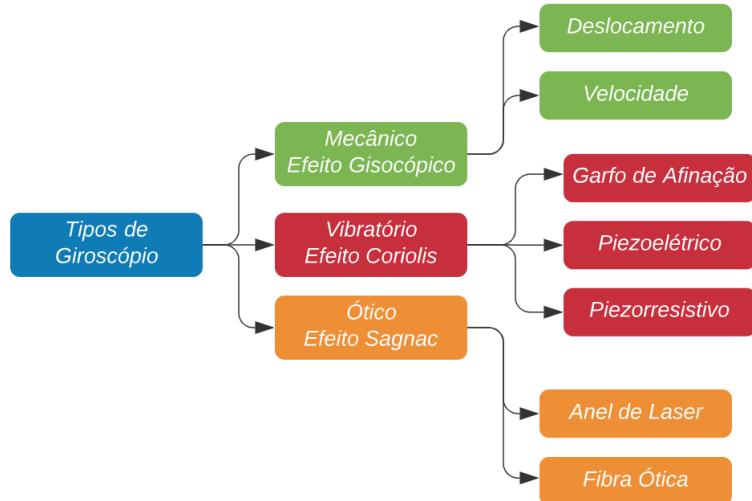


Figura 6 – Classificação de Giroscópios

modernos, compreende da determinação de uma força F_C sofrida por uma massa de prova m rotacionando com velocidade angular ω e possui velovidade v , como mostra a Equação (2).

$$F_C = -2m(\omega \times v) \quad (2)$$

, como ilustrado na Figura 8(a). Diversos são os tipos de giroscópio, como por exemplo o quântico, de fibra ótica, laser e até mesmo mecânico, porém este trabalho dará foco nos giroscópios eletrônicos micro-usinados (*MEMS*) e de baixo custo.

Na Figura 8(b) é possível observar um esquema da micro estrutura interna do giroscópio *MEMS*, cuja massa oscilante, em amarelo, se desloca continuamente na

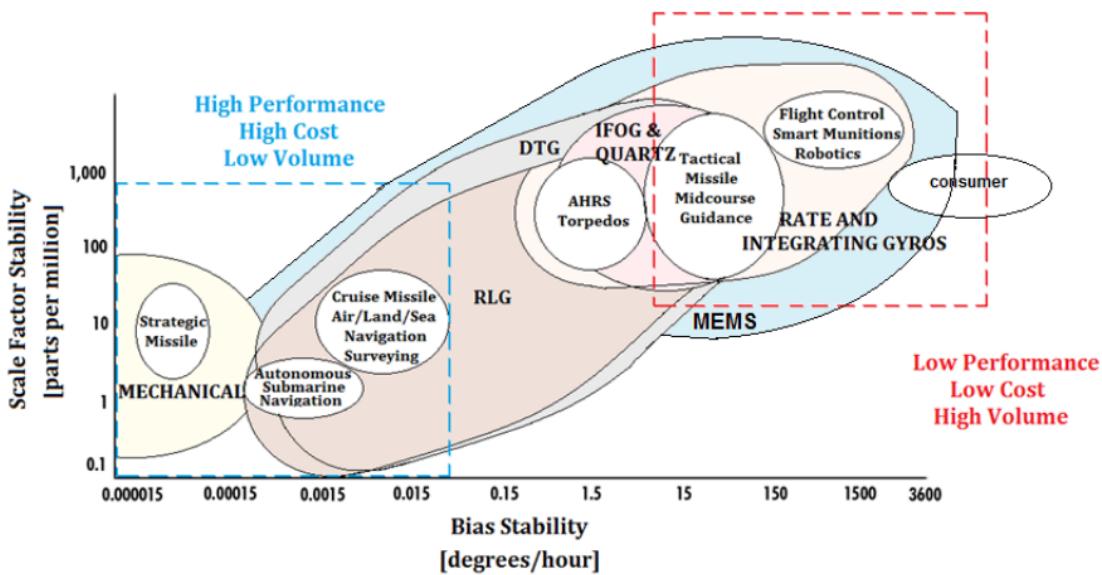
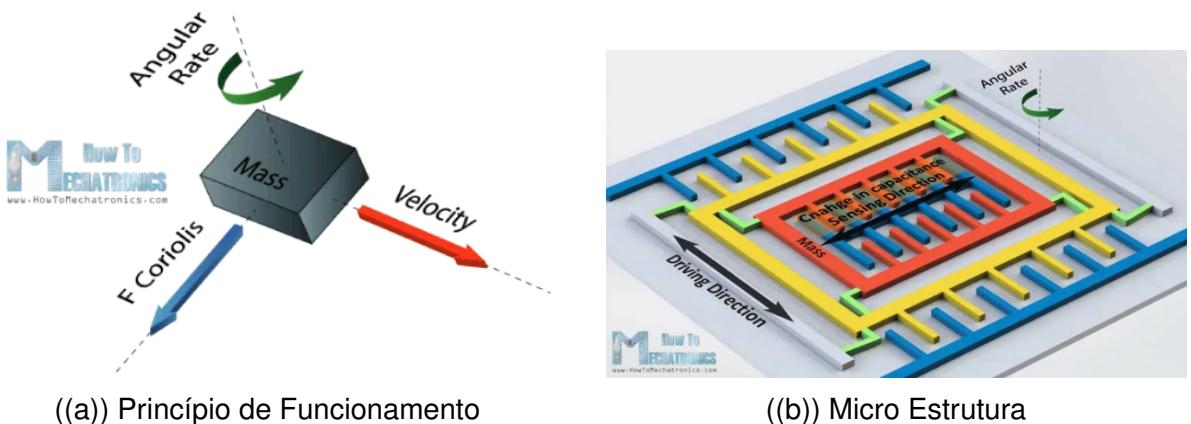


Figura 7 – Caption

Figura 8 – Giroscópio MEMS
(noauthor_mems_nodate)

direção indicada na figura. Uma vez aplicada uma rotação ao sensor a massa de prova, em vermelho, sofre o efeito da força de Coriolis, medindo então a aceleração centrífuga que em seguida é integrada e apresentada como velocidade angular.

2.3 UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL

A Unidade de Medição Inercial (do inglês *Inertial Measurement Unit* ou IMU) consiste na junção de 2 (Tipo 1) ou 3 (Tipo 2) sensores para realização de medições, registrando por consiguiente . Para o presente trabalho foi utilizado o IMU de Tipo 1, uma vez que a natureza do problema abordado no estudo de caso não envolve a medição do posicionamento absoluto no espaço, mas apenas a oscilação em torno de um ponto de equilíbrio. O Tipo 2, caracterizado pela adição de um magnetômetro, é amplamente utilizado no desenvolvimento de Sistemas de Navegação, nos quais a

medição do campo magnético terrestre é imprescindível para orientação de veículos (AHMAD *et al.*, 2013).

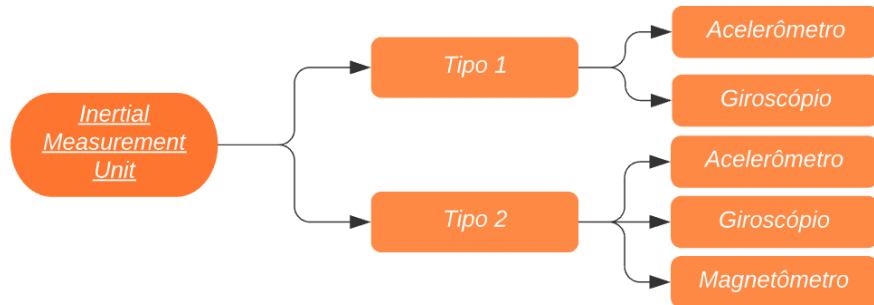


Figura 9 – Classificação Básica

Existem diversas opções de baixo custo no mercado internacional. TABELA COMPARATIVA DE MODELOS. O modelo selecionado para o presente trabalho foi o LSM6DSO da STEletronics JUSTIFICATIVAS.

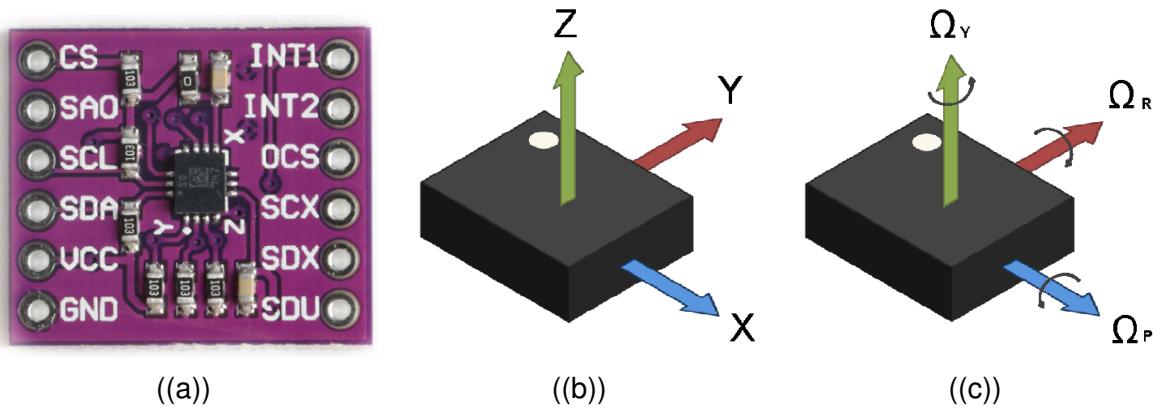


Figura 10

2.3.1 Medições em Corpos Rígidos

Corpos Rígidos podem ser definidos como massas distribuídas cuja configuração no espaço pode ser descrita através de 6 graus de liberdade (GDL) (SHABANA, nodate) como pode ser visto na Figura 11, onde 3 graus de liberdade são referentes à translação do corpo rígido e os outros 3 graus de liberdade indicam a sua orientação. A Equação (3) descreve vetorialmente os 6 GDL apresentados na Figura 11, onde $X_1X_2X_3$ representam um sistema de coordenadas de referência e $X'_1X'_2X'_3$ representam o sistema de coordenadas do corpo rígido i , rigidamente fixado ao ponto O^i . O ponto p^i denota um ponto qualquer no corpo rígido i cuja posição é rigidamente atrelada a O^i pelo vetor u^i .

$$\mathbf{r}^i = \mathbf{R}^i + \mathbf{u}^i \quad (3)$$

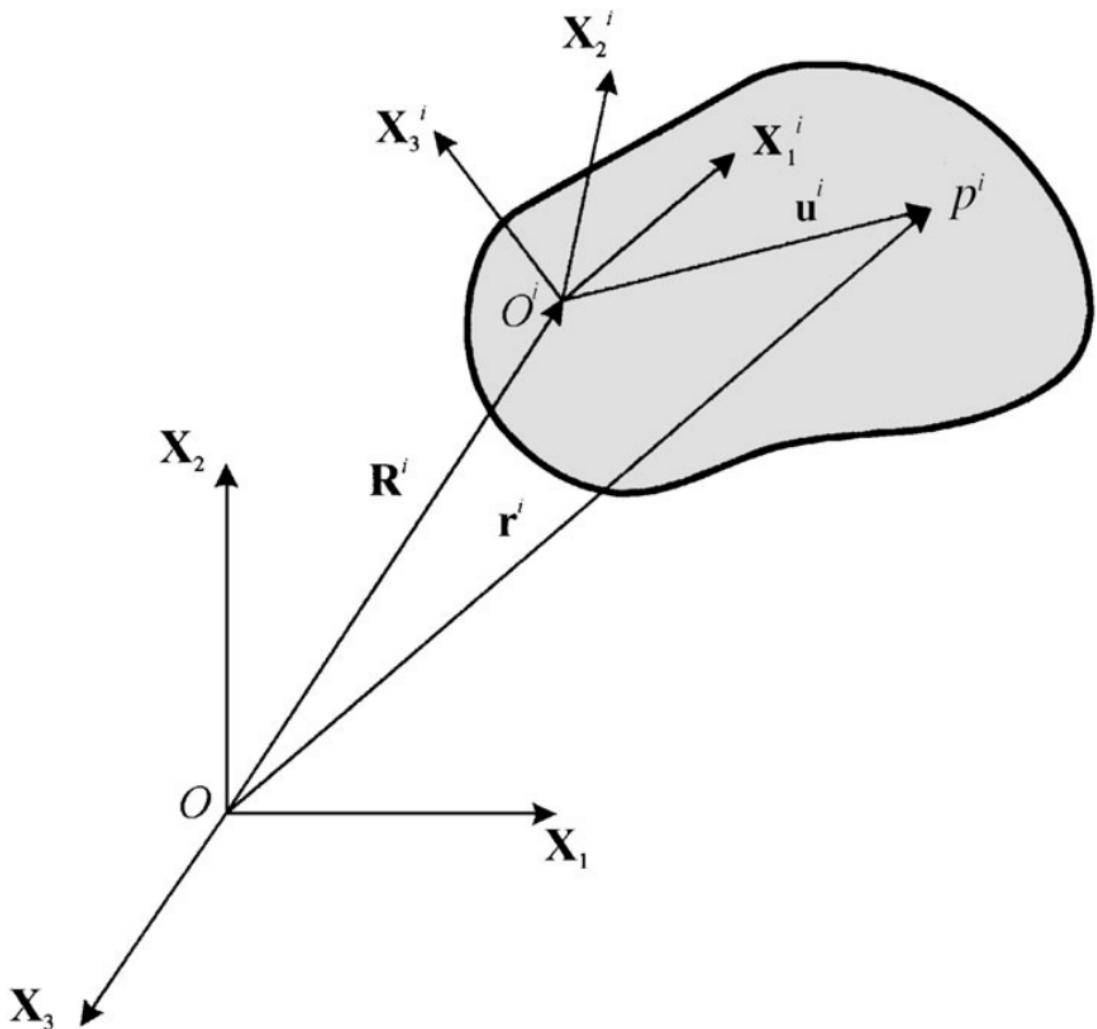


Figura 11 – Corpo Rígido no Espaço
(SHABANA, nodate)

Em seu estudo (MARTIN *et al.*, 1998) ressalta três formas de obter medições para os 6 GDL de um corpo rígido, como pode ser observado na Figura 12. A primeira (Figura 12(a)) através de 9 acelerômetros (3 acelerômetros triaxiais) posicionados arbitrariamente no corpo rígido. A segunda (Figura 12(b)) forma faz uso de 3 acelerômetros uniaxiais e um sensor de velocidade angular (também conhecido como giroscópio) triaxial. A ultima maneira (Figura 12(c)), nominada de Cubo Compacto, utiliza 1 acelerômetro triaxial e 1 giróscopio triaxial.

$$\vec{A}_P = \vec{A}_0 + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_P) + \vec{\omega} \times \vec{r}_P \quad (4)$$

Sendo as medições desejadas em um corpo rígido impossíveis de serem realizadas no centro de massa (CM) do mesmo as medidas são realizadas em um ponto arbitrário e correções relativas ao efeito das acelerações tangencial e centrípeta, advindas da rotação do corpo realizadas através da Equação (4), onde \vec{A}_0 é a aceleração no ponto desejado e \vec{A}_P a medição realizada a uma distância \vec{r}_P do CM (MARTIN *et al.*,

1998).

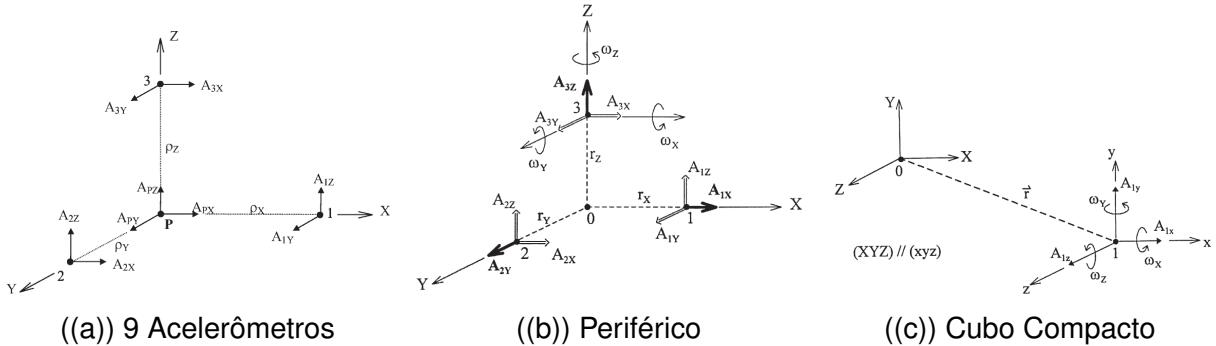


Figura 12 – Esquemas de Medição de Corpo Rígido
(MARTIN *et al.*, 1998)

2.3.2 Calibração

Um dos processos indispensáveis para a utilização dos *IMU* para um sistema de medição é a calibração, diferentemente de quando usados para aplicações mais simples como a orientação de telas em *smartphones*. Uma calibração bem executada permite a eliminação de erros sistemáticos, o que não ocorre de fábrica com os sensores de baixo custo por questões econômicas (FONG; ONG; NEE, 2008). Diversos autores, assim como Fong, desenvolveram metodologias para calibração de *IMUs* de baixo custo. Vargas-Valencia (2016) efetuou a calibração de sensores para captura da marcha humana, enquanto Zhao (2012) propôs uma auto-calibração continua, assistida por sensores ultrassônicos de posicionamento e magnetômetros. Na tentativa de manter o baixo custo para a utilização dos sistemas temos Lv (2016), Skog (2006) e Qureshi (2017) utilizando posicionamentos dos sensores relativos à gravidade e uma mesa rotativa controlada, enquanto Tedaldi (2014) fez uso de câmeras para calibração dos giroscópios.

Para dar início à rotina de calibração de sensores é essencial a determinação do modelo de erro a ser utilizado, visando corrigir a escala, tendência e não-ortogonalidade dos valores coletados diretamente dos *IMUs* (PRETTO; GRISETTI, 2014).

$$\mu = SK(u - b) \quad (5)$$

Na Equação (5) pode-se observar o modelo matemático do sensor, que leva em consideração para medições obtidas $u[\text{un.}]$ a correção da tendência $b[\text{un.}]$, a sensibilidade $K[\text{un./LSB}]$ e a correção de ortogonalidade $S[\text{un./un.}]$, obtendo então o valor

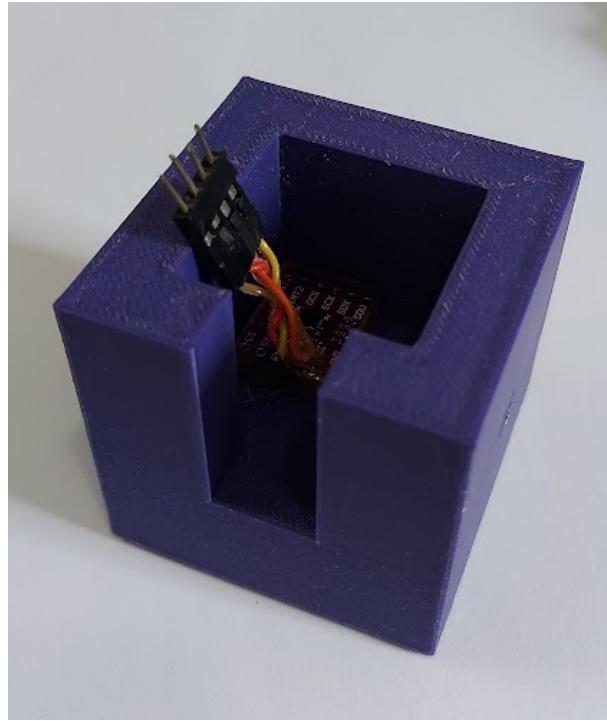


Figura 13 – Cubo de Calibração

desejado μ [un.] (MADGWICK *et al.*, 2013). Onde,

$$\mu = \begin{Bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{Bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & s_{xy} & s_{xz} \\ s_{yx} & 1 & s_{yz} \\ s_{zx} & s_{zy} & 1 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}, u = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix}, b = \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{Bmatrix}$$

Para o processo de calibração pode-se iniciar com a determinação da tendência b posicionando sucessivamente os eixos na direção da gravidade, para o sentido positivo e negativo, e então é feita a média dos valores médios coletados em cada sentido, como mostra a Equação (6), que pode ser empregada para ambos acelerômetro e giroscópio.

$$b_i = \frac{\bar{u}_i \uparrow + \bar{u}_i \downarrow}{2}, \quad i = x, y, z \quad (6)$$

Uma vez removidos os valores de tendência pode-se obter uma única matriz de transformação $M^a = T^a \cdot K^a$ relacionando os valores obtidos para as 6 posições de calibração com os seus respectivos valores ideais, o valor da própria gravidade.

$$\begin{aligned} [A^O] &= [M^a] \cdot [A^S] \\ [M^a] &= [A^O] \cdot [A^S]^\dagger \end{aligned} \quad (7)$$

Onde,

$$[A^O] = \begin{bmatrix} g & -g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & -g \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[A^S] = \begin{bmatrix} \bar{a}_x \uparrow & \bar{a}_x \downarrow & \bar{a}_x & \bar{a}_x & \bar{a}_x & \bar{a}_x \\ \bar{a}_y & \bar{a}_y & \bar{a}_y \uparrow & \bar{a}_y \downarrow & \bar{a}_y & \bar{a}_y \\ \bar{a}_z & \bar{a}_z & \bar{a}_z & \bar{a}_z & \bar{a}_z \uparrow & \bar{a}_z \downarrow \end{bmatrix} - \begin{Bmatrix} {}^a b_x^a \\ {}^a b_y^a \\ {}^a b_z^a \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Dessa forma, com os valores de $\{b^a\}$ e $[M^a]$, para cada sensor, pode-se converter os valores obtidos diretamente dos acelerômetros para valores calibrados em g ou m/s^2 .

Para a calibração dos giroscópios o processo proposto é similar porém, devido à dificuldade de implicar ao sensor uma velocidade angular controlada e conhecida como referência para a calibração sem instrumentos avançados como uma mesa rotativa instrumentada e calibrada, alguns passos a mais são necessários. Primeiramente, os valores de tendência podem ser obtidos durante as medições estáticas realizadas para os acelerômetros realizando-se a média dos valores registrados, vide Equação (10).

$$\{{}^g b\} = \begin{Bmatrix} {}^g b_x \\ {}^g b_y \\ {}^g b_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{s_{\omega_x}} \\ \overline{s_{\omega_y}} \\ \overline{s_{\omega_z}} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Faz-se essencial, então, a integração dos valores obtidos, obtendo o deslocamento angular para um determinado intervalo de tempo $[a, b]$, durante o qual será aplicada manualmente ao cudo de calibração uma rotação determinada, $\pi [rad]$, por exemplo.

$$\{\theta^g\} = \begin{Bmatrix} \theta_x^S \\ \theta_y^S \\ \theta_z^S \end{Bmatrix} = \int_a^b \left(\begin{Bmatrix} \omega_x^S \\ \omega_y^S \\ \omega_z^S \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} {}^g b_x \\ {}^g b_y \\ {}^g b_z \end{Bmatrix} \right) dt \quad (11)$$

Realizadas 3 rotações, uma para cada eixo, podemos então montar uma igualdade matricial semelhante ao que foi utilizado na Equação (7)

$$[\Theta^O] = [M^g] \cdot [\Theta^S]$$

$$[M^g] = [\Theta^O] \cdot [\Theta^S]^\dagger \quad (12)$$

Onde,

$$[\Theta^O] = \begin{bmatrix} \pi & 0 & 0 \\ 0 & \pi & 0 \\ 0 & 0 & \pi \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\left[\Theta^S \right] = \begin{bmatrix} \theta_x^S \curvearrowright & \theta_x^S & \theta_x^S \\ \theta_y^S & \theta_y^S \curvearrowright & \theta_y^S \\ \theta_z^S & \theta_z^S & \theta_z^S \curvearrowright \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.3.2.1 Validação

Com o intuito de validar a utilização dos sensores da IMU foram realizados dois procedimentos experimentais, para comparação entre os sensores do LVA (piezoelétrico) e os acelerômetros e giroscópios respectivamente.

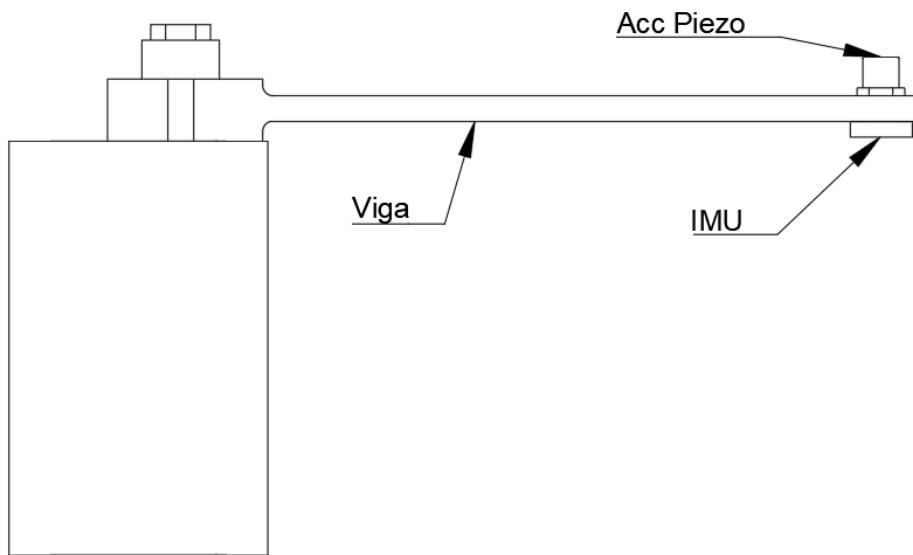


Figura 14 – Esquema Viga

Para validação dos acelerômetros os sensores foram posicionados como ilustrado na Figura 14 em uma pequena viga engastada, a qual foi impactada com um martelo de impacto. os valores medidos foram comparados tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, como visto na Figura 15

A validação dos giroscópios foi feita através da comparação entre os valores de de aceleração obtidos através dos sensores piezoelétricos e a velocidade angular obtida através dos IMU convertida em aceleração linear, combinando as Equações (15) e (16), segundo a configuração exibida na Figura 16.

$$a_t = \alpha \times r \quad (15)$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (16)$$

$$a_c = \omega \times (\omega \times r) \quad (17)$$

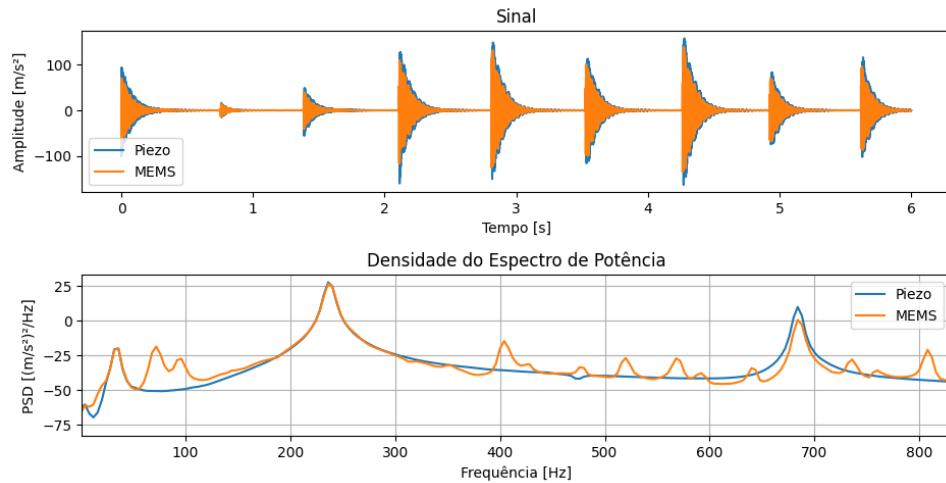


Figura 15 – Comparativo entre o Accelerômetro piezoelétrico e MEMS

Estando o IMU posicionado no centro da rotação e os sensores piezoelétricos fixados a uma distância de $r = 50mm$ podemos comparar os valores obtidos

$$\ddot{a}_p = \ddot{a}_0 + \ddot{a}_c + \ddot{a}_t \quad (18)$$

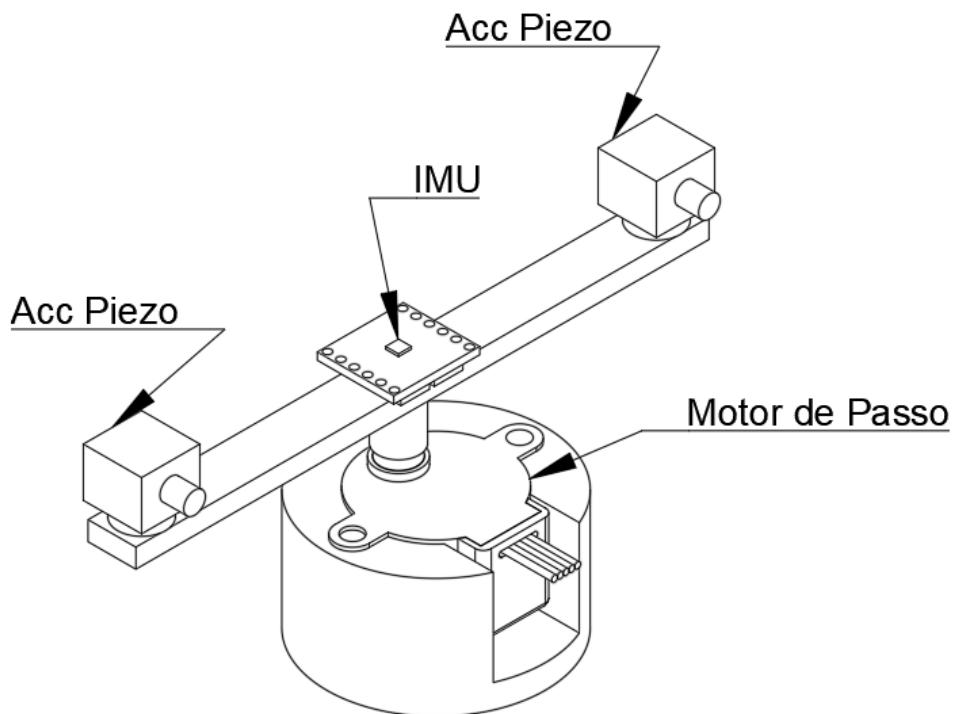


Figura 16 – Configuração do Experimento de Validação dos Giroscópios

Foram testados diversos movimentos angulares distintos, como pode ser visto

no Apêndice A, e comparados os sinais nos domínios do tempo e da frequência. A Figura 17 ilustra uma dessas comparações.

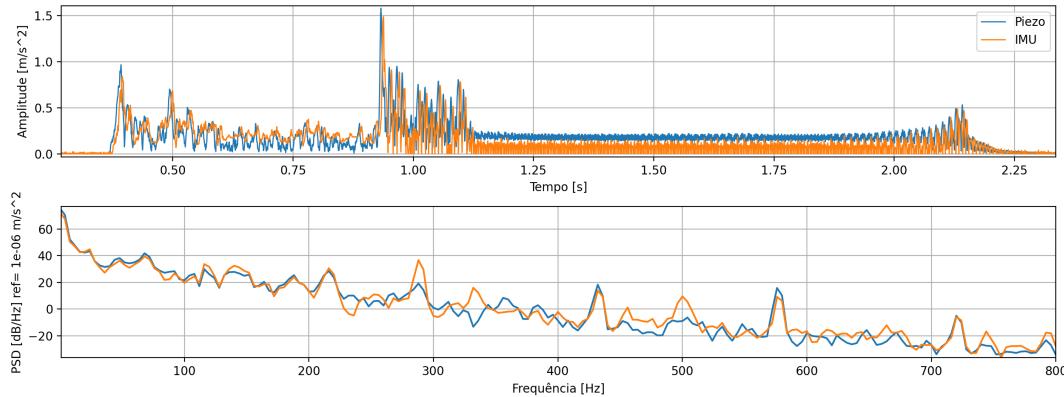


Figura 17 – Comparativos entre o IMU e sensores piezoelétrico

Finalmente foi comparada a aceleração medida usando o acelerômetro triaxial piezoelétrico, em um determinado ponto de um corpo rígido, com os dados obtidos através dos sensores do IMU transformados para a aceleração total naquele mesmo ponto

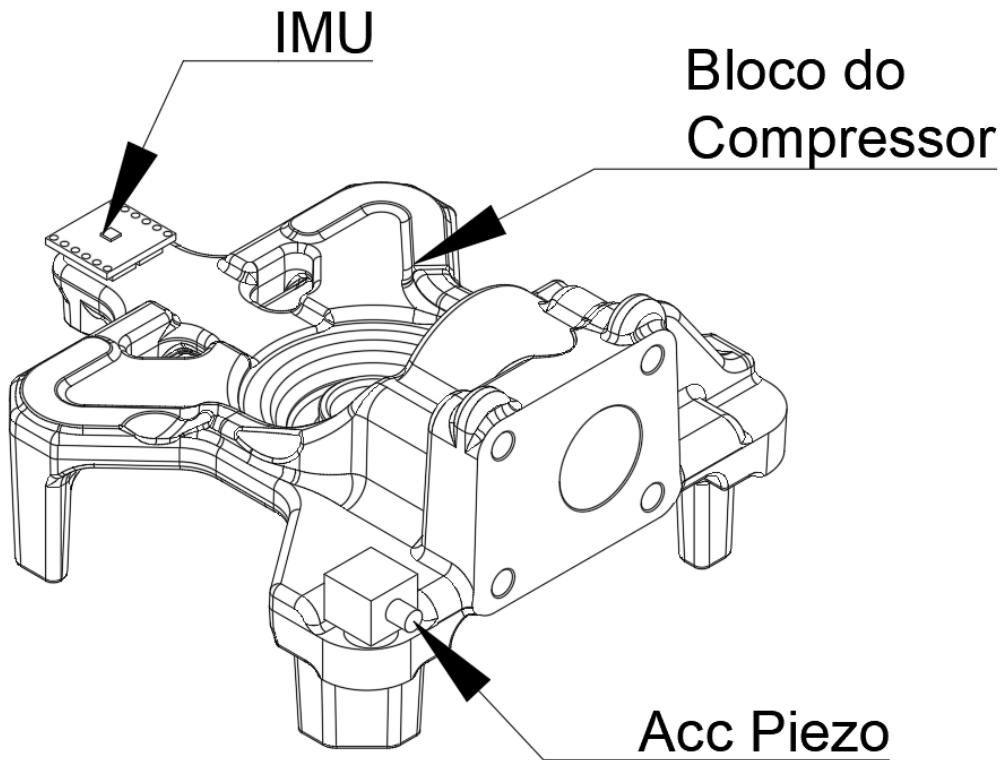


Figura 18 – Configuração do teste combinado comparativo entre os sensores piezoeletricos e IMU MEMS

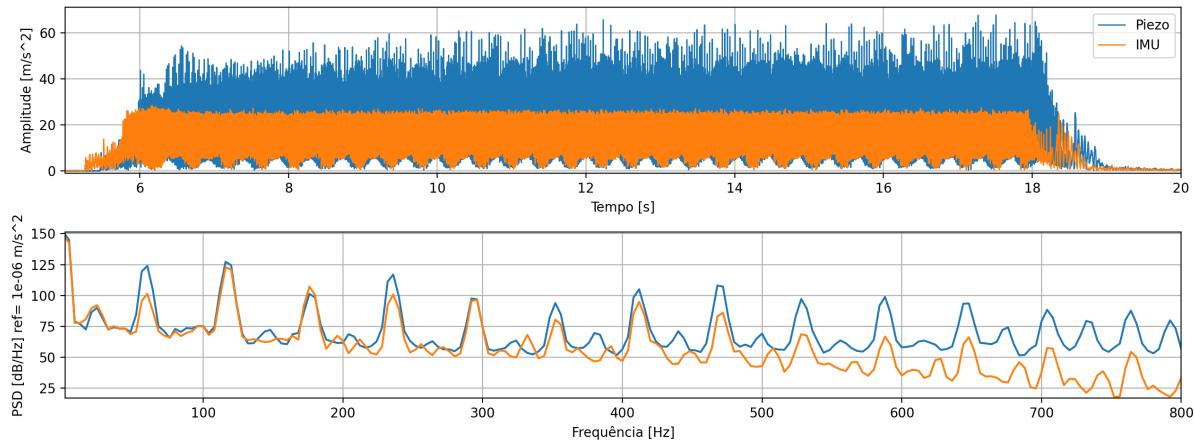


Figura 19 – Comparativo da aceleração total entre piezo e IMU

2.4 OUTROS SENSORES

2.4.1 Conversor Analógico-Digital

Os problemas de engenharia possuem uma natureza intrinsecamente analógica que, para os dispositivos eletrônicos modernos, deve ser traduzida para um formato digital, com o intuito de armazenamento e processamento dos dados. A popularização do processamento digital de sinais (*Digital Signal Processing* ou *DSP*) implica fortemente na necessidade de converter esses valores analógicos para um meio digital e isso é realizado através dos conversores de dados, mais especificamente do conversor A/D (*Analog to Digital Converter* ou *ADC*). Os sinais digitais são muitas vezes tratados através da utilização de processadores. A Figura 20 mostra um ciclo, desde a aquisição de dados até a reconstrução, de dados já processados digitalmente, para o mundo analógico.

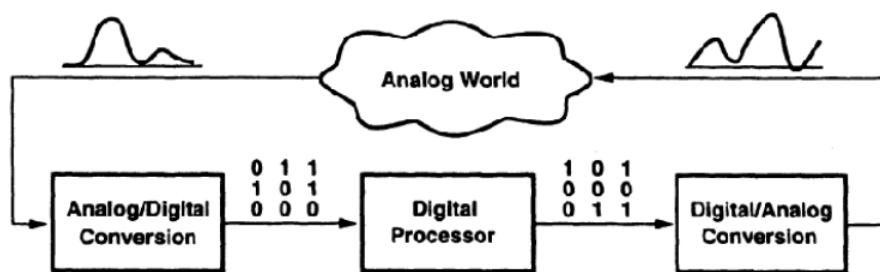


Figura 20 – Tratamento de Sinais
(RAZAVI, 1995)

Os conversores A/D “traduzem” os sinais elétricos analógicos que representam fenômenos do mundo real, como, por exemplo, luz, som, temperatura e pressão, para sinais digitais. Além dos sinais naturais serem analógicos, os seres humanos percebem e retêm informações em formato analógico, em escala macroscópica (RAZAVI, 1995).

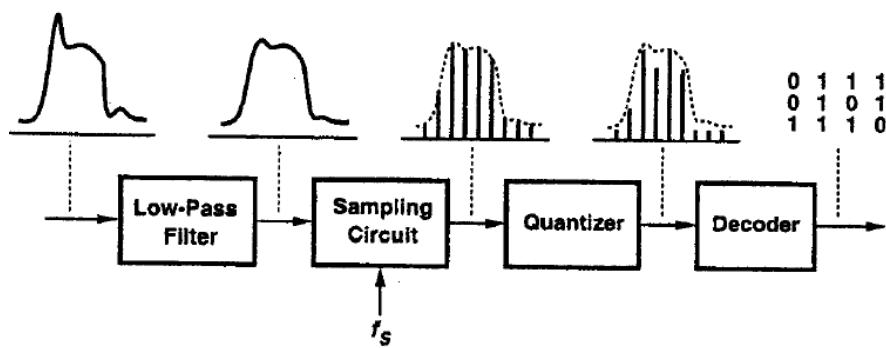


Figura 21 – Interface Analógico-Digital

Nota-se que o primeiro bloco presente é o filtro passa baixas, conhecido também neste caso como filtro anti-aliasing, e apresenta como função, limitar em frequência o sinal a ser amostrado. Este filtro de entrada é necessário para que o sinal amostrado possa posteriormente ser reconstruído sem que ocorra erro de aliasing. Para isso é necessário que a frequência de amostragem (f_s) seja pelo menos o dobro da máxima frequência do sinal analógico a ser convertido, conforme descreve o teorema da amostragem de Nyquist–Shannon (SCHREIER; PAVAN; TEMES, 2017).

A seguir, este sinal já filtrado deve passar pelo amostrador, onde é feita amostragem deste sinal em uma determinada frequência. Após a amostragem é realizada a quantização, onde os sinais amostrados são adequados aos níveis de referências predeterminadas, gerando desta forma um sinal que passa a ser discreto em amplitude. Posteriormente este sinal é processado por um decoder, que tem por saída a palavra digital referente ao sinal analógico presente na entrada(RAZAVI, 2006).

Em relação à frequência de amostragem, vale salientar que existem dois tipos de conversores, os que utilizam a “taxa de Nyquist”, ou seja, a frequência de amostragem é um pouco maior que duas vezes a largura de banda do sinal analógico e os conversores oversampling, que utilizam uma frequência de amostragem muito maior que a taxa de Nyquist, e realizam uma posterior filtragem digital para remover o ruído presente fora da faixa de frequência do sinal de interesse (SCHREIER; PAVAN; TEMES, 2017).

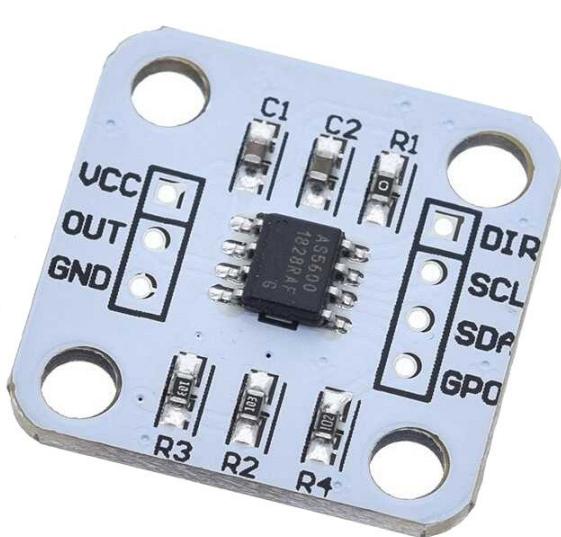
Este tipo de dispositivo de conversão está presente tanto no ADS1015, utilizado para captar o sinal analógico produzido pelo medidor de corrente SCT-013, e nos próprios IMUs, onde convertem o sinal analógico medido internamente nos sistemas micro eletromecânicos (MEMS) e os converte para um valor digital quantizado na forma de uma sequencia de 16 bits.

2.4.2 Sensor de Posição Angular do Rotor

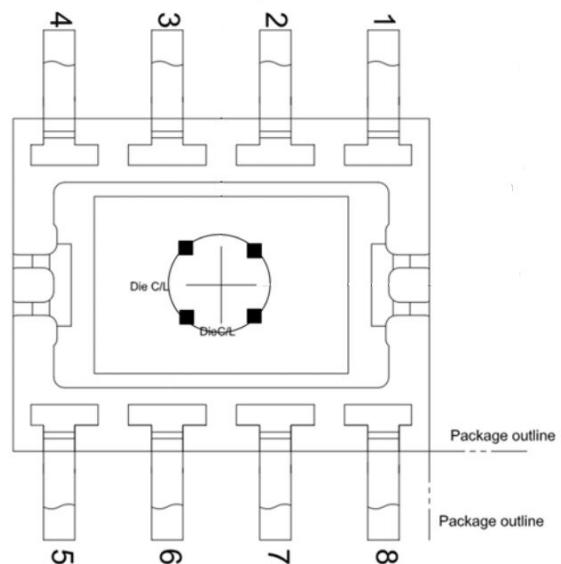
O AS5600 é um sensor magnético de posição angular com uma saída analógica ou digital de 12 bits de resolução. Este sistema sem contato mede o ângulo absoluto do campo magnético de um ímã. Utilizado em aplicações como potenciômetro sem

contato, este sensor baseado no efeito Hall possui interface I₂C através da qual pode-se configurar o sensor e coletar os dados desejados de posição angular. O intervalo padrão da saída é de 0 a 360 graus.

Este microcírcuito contém quatro sensores Hall dispostos?? em círculo. Os elementos Hall internos são colocados no centro do sistema em um círculo com raio de 1 mm, como pode observar na Figura 22(b).



((a)) Sensor Rotativo AS5600



((b)) Arranjo de sensores Hall

Neste trabalho o sensor acima foi utilizado para obtenção da posição angular absoluta do rotor do motocompressor avaliado.

2.5 SENSOR DE CORRENTE

SCT013-00

3 CIRCUITO

Neste Capítulo será tratado dos aspectos físicos dos sistema de Aquisição de Dados proposto neste trabalho. O dispositivo controlador/processador é um componente indispensável, visto que é através do mesmo partem que os comandos aos sensores para coleta dos dados, bem como o processamento, armazenamento e visualização dos dados mensurados.

3.1 CONTROLADOR

3.2 COMUNICAÇÃO

A escolha entre I2C e SPI para comunicação serial entre dispositivos é bastante comum tem projetos que envolvem comunicação digital síncrona. Os sensores selecionados para este trabalho, em sua maioria, são capazes de receber e enviar mensagens através destes dois protocolos de comunicação digital. Os principais critérios avaliados na escolha do protocolo a ser utilizado são a complexidade de construção do circuito e a taxa de transmissão de dados. Em termos de complexidade o protocolo SPI apresenta limitações, como o numero de vias necessário para sua comunicação e a alta sensibilidade do protocolo à comunicação entre componentes relativamente afastados entre si, que impedem a sua utilização neste estudo. O protocolo I2C, que foi empregado, possui enorme vantagem em termos e complexidade e construção e ainda que sua taxa de transferência de dados ser ordens de grandeza menor (cerca de 20 vezes) que o SPI mostra-se suficiente para o que se propõe este trabalho.

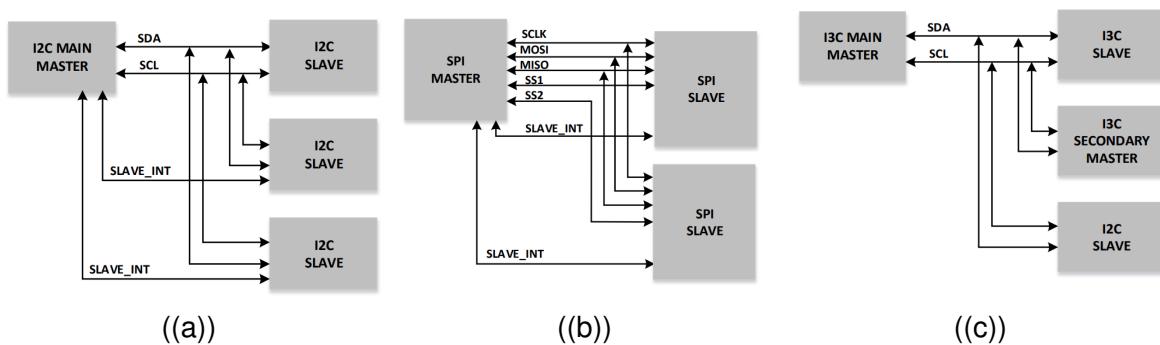


Figura 23 – Esquema de funcionamento dos protocolos de comunicação digital
(a) - I2C, (b) - SPI e (c) - I3C

Um outro Protocolo que em breve estará amplamente disponível para aplicações comerciais é o I3C, o qual pode ser comparado na tabela exibida na Figura 23. Unindo as melhores características entre os protocolos citados anteriormente, o protocolo I3C mostra-se uma interessante melhoria para trabalhos futuros, permitindo Taxas de aquisição dos sensores de até aproximadamente 7kHz. Mais informações disponíveis no Anexo A.

3.2.1 Componentes Eletrônicos

Para atingir uma frequência de amostragem o mais alta possível foram necessárias algumas alterações do funcionamento padrão de alguns componentes. Um exemplo disso é a utilização de uma velocidade de *clock* do barramento I2C de até 1.8MHz , como também a realização de um *overclock* do processador do Raspberry Pi para valores acima dos 2GHz , dessa forma possibilitando a aquisição de até 1666 amostras por segundo, utilizando 2 LSM6DSOs, 1 ADS1015 e 1 AS5600.

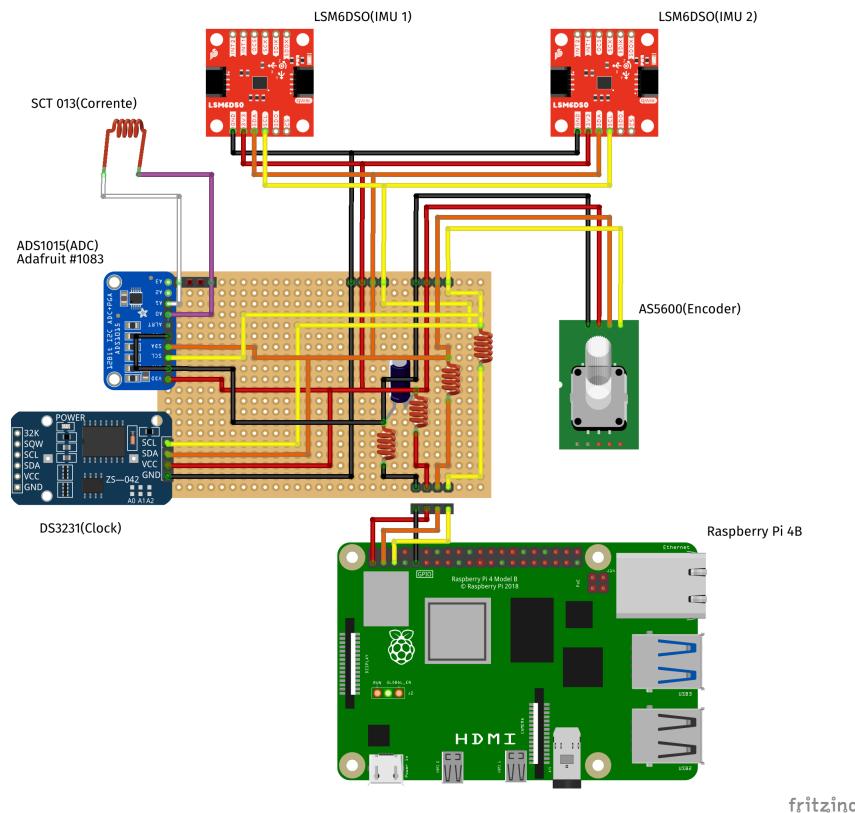


Figura 24 – Esquema do Circuito de comunicação entre os componentes

3.3 PRÉ-PROCESSAMENTO

3.3.1 Integração e Derivação dos Dados

3.3.2 Pré-processamento

Este *template* contém algumas seções criadas na tentativa de facilitar seu uso. No entanto, não há um limite máximo ou mínimo de seção a ser utilizado no trabalho. Cabe a cada autor definir a quantidade que melhor atenda à sua necessidade.

4 CONCLUSÃO

As conclusões devem responder às questões da pesquisa, em relação aos objetivos e às hipóteses. Devem ser breves, podendo apresentar recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

??

??

REFERÊNCIAS

AHMAD, Norhafizan; GHAZILLA, Raja Ariffin Raja; KHAIRI, Nazirah M.; KASI, Vijayabaskar. Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. en. **International Journal of Signal Processing Systems**, **pages** 256–262, 2013. ISSN 23154535.

FONG, W T; ONG, S K; NEE, A Y C. Methods for in-field user calibration of an inertial measurement unit without external equipment. en. **Measurement Science and Technology**, **volume** 19, **number** 8, **page** 085202, **august** 2008. ISSN 0957-0233, 1361-6501.

GHEMARI, Zine; SALAH, Saad; BOURENANE, Rabah. Resonance Effect Decrease and Accuracy Increase of Piezoelectric Accelerometer Measurement by Appropriate Choice of Frequency Range. en. **Shock and Vibration**, **volume** 2018, **pages** 1–8, **june** 2018. ISSN 1070-9622, 1875-9203.

HE, Jiangbo; ZHOU, Wu; YU, Huijun; HE, Xiaoping; PENG, Peng. Structural Designing of a MEMS Capacitive Accelerometer for Low Temperature Coefficient and High Linearity. en. **Sensors**, **volume** 18, **number** 2, **page** 643, **february** 2018. ISSN 1424-8220.

LV, Jixin; RAVANKAR, Ankit A.; KOBAYASHI, Yukinori; EMARU, Takanori. A method of low-cost IMU calibration and alignment. en. In: 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). Sapporo, Japan: IEEE, **december** 2016. **pages** 373–378.

MADGWICK, Sebastian O.H.; HARRISON, Andrew J.L.; SHARKEY, Paul M.; VAIDYANATHAN, Ravi; HARWIN, William S. Measuring motion with kinematically redundant accelerometer arrays: Theory, simulation and implementation. en. **Mechatronics**, **volume** 23, **number** 5, **pages** 518–529, **august** 2013. ISSN 09574158.

MARTIN, Peter G.; HALL, Gregory W.; CRANDALL, Jeff R.; PILKEY, Walter D. Measuring the Acceleration of a Rigid Body. en. **Shock and Vibration**, **volume** 5, **number** 4, **pages** 211–224, 1998. ISSN 1070-9622, 1875-9203.

PRETTO, Alberto; GRISETTI, Giorgio. Calibration and performance evaluation of low-cost IMUs. en, **page** 6, **september** 2014.

QURESHI, Umar; GOLNARAGHI, Farid. An Algorithm for the In-Field Calibration of a MEMS IMU. en. **IEEE Sensors Journal**, volume 17, number 22, pages 7479–7486, november 2017. ISSN 1530-437X, 1558-1748, 2379-9153.

RAZAVI, Behzad. **Fundamentals of microelectronics**. Preview ed. Hoboken, N.J: John Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-07292-9.

RAZAVI, Behzad. **Principles of data conversion system design**. New York: IEEE Press, 1995. ISBN 978-0-7803-1093-3.

SCHREIER, Richard; PAVAN, Shanthi; TEMES, Gabor C. **Understanding Delta-Sigma Data Converters**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., april 2017. ISBN 978-1-119-25830-8 978-1-119-25827-8.

SHABANA, Ahmed A. Dynamics of Multibody Systems. en, **page** 398.

SKOG, Isaac; HANDEL, Peter. CALIBRATION OF A MEMS INERTIAL MEASUREMENT UNIT. en, **page** 6, 2006.

TEDALDI, David; PRETTO, Alberto; MENEGATTI, Emanuele. A robust and easy to implement method for IMU calibration without external equipments. en. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China: IEEE, may 2014. **pages** 3042–3049.

VARANIS, Marcus; SILVA, Anderson; MERELES, Arthur; PEDERIVA, Robson. MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications. en. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, volume 40, number 11, **page** 527, november 2018. ISSN 1678-5878, 1806-3691.

VARGAS-VALENCIA, Laura; ELIAS, Arlindo; ROCON, Eduardo; BASTOS-FILHO, Teodiano; FRIZERA, Anselmo. An IMU-to-Body Alignment Method Applied to Human Gait Analysis. en. **Sensors**, volume 16, number 12, **page** 2090, december 2016. ISSN 1424-8220.

VAROL, Tolga. Comparison of Consumer- Grade MEMS IMUs in UBI Context. en, **page** 63, 2019.

ZHAO, He; WANG, Zheyao. Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers With Extended Kalman Filter for Data Fusion. en. **IEEE Sensors Journal**, volume 12, number 5, pages 943–953, may 2012. ISSN 1530-437X, 1558-1748.

GLOSSÁRIO

I2C	Inter Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
I3C	Improved Inter Integrated Circuit

APÊNDICE A – COMPARATIVOS GIROSCÓPIO

Dados obtidos dos ensaios para validação dos giroscópios em comparação aos sensores piezoelétricos.

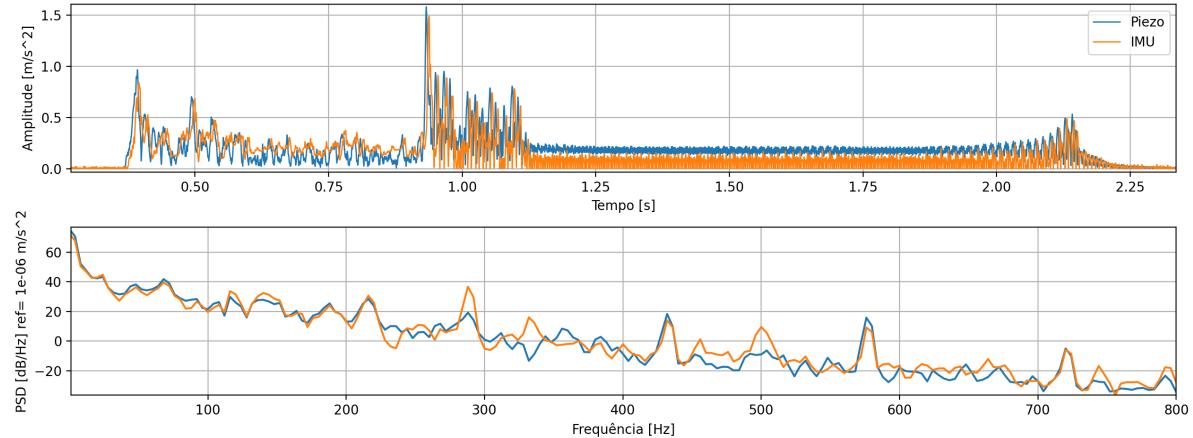


Figura 25 – Experimento 1 de Validação Giroscópio

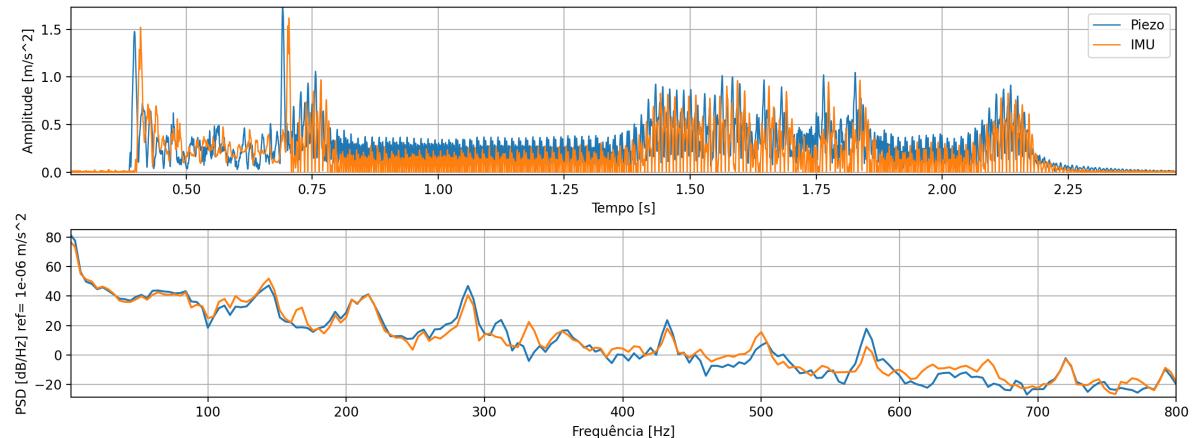


Figura 26 – Experimento 2 de Validação Giroscópio

??

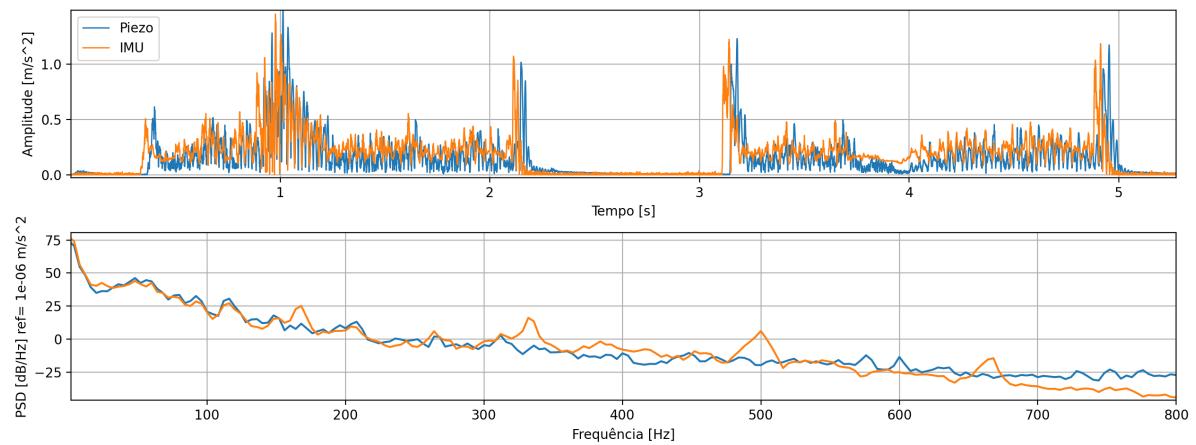


Figura 27 – Experimento 3 de Validação Giroscópio

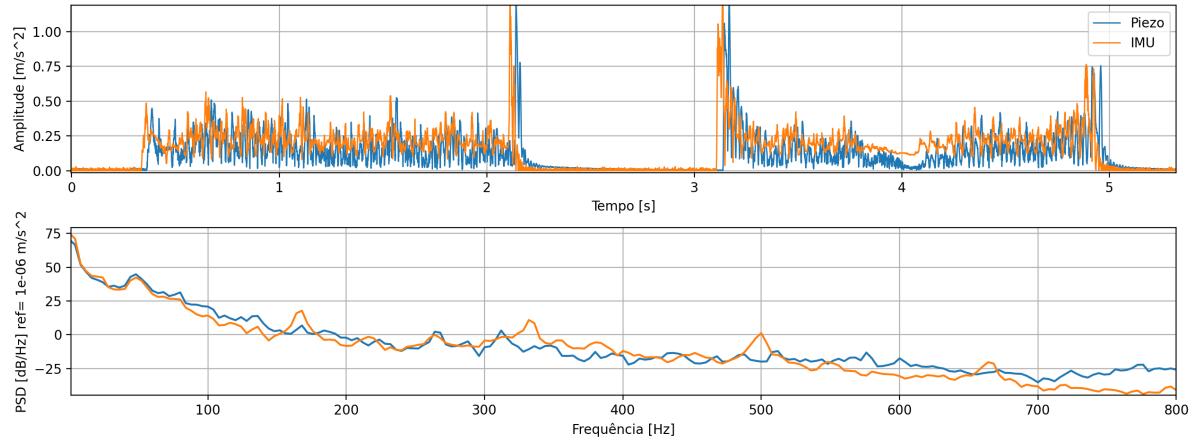


Figura 28 – Experimento 4 de Validação Giroscópio

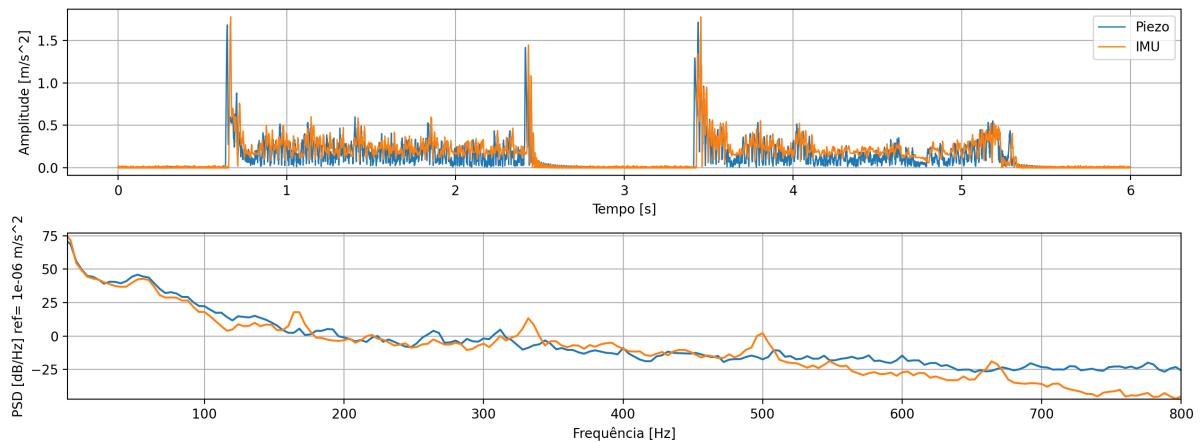


Figura 29 – Experimento 5 de Validação Giroscópio

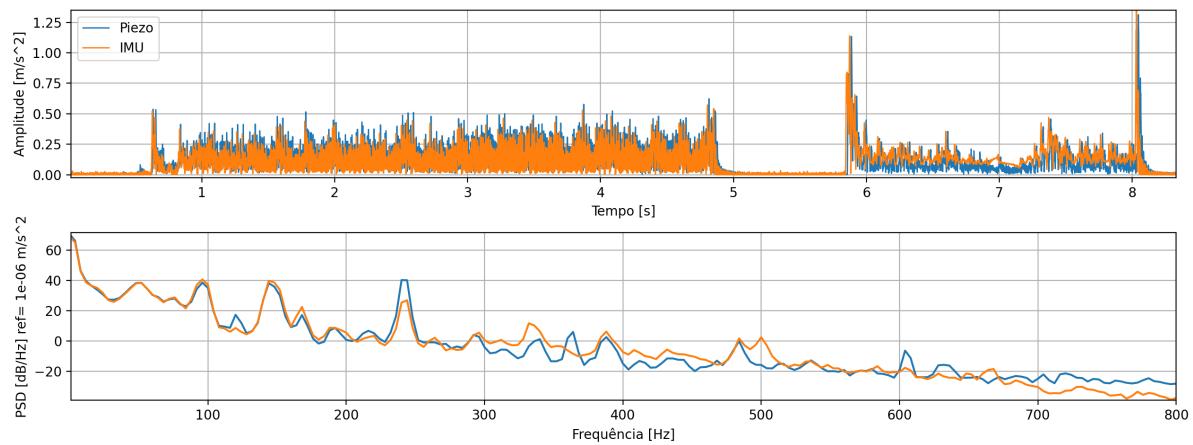


Figura 30 – Experimento 6 de Validação Giroscópio

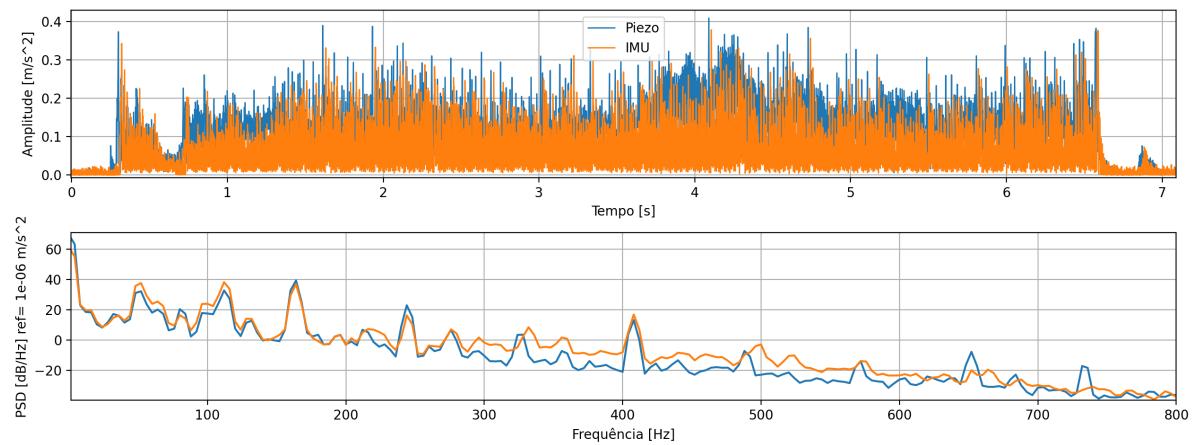


Figura 31 – Experimento 7 de Validação Giroscópio

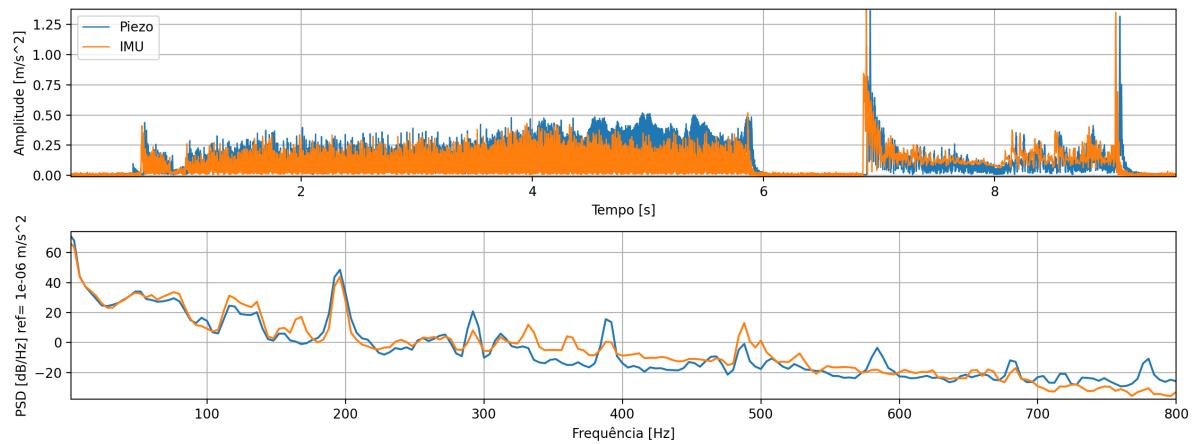


Figura 32 – Experimento 8 de Validação Giroscópio

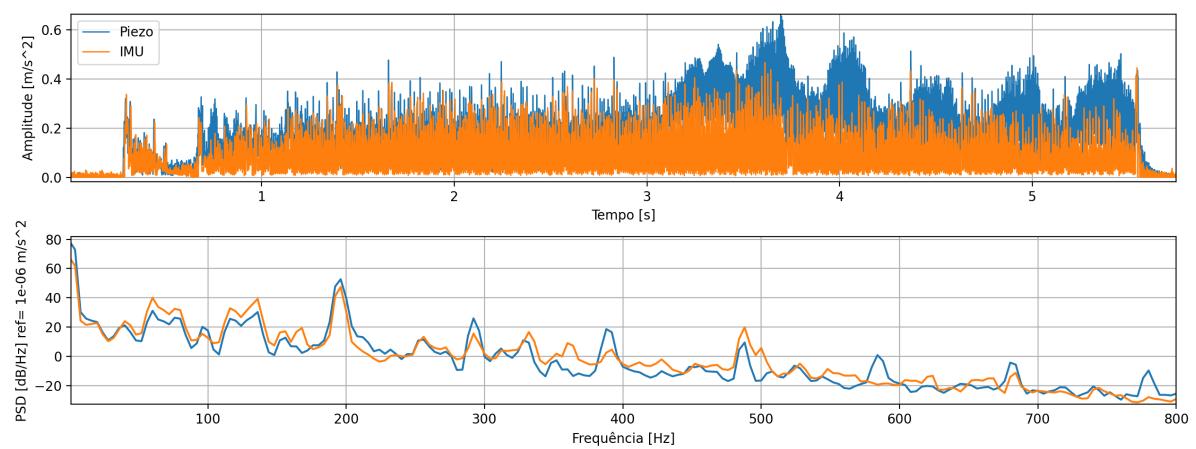


Figura 33 – Experimento 9 de Validação Giroscópio

APÊNDICE B – COMPARATIVO COMBINADO

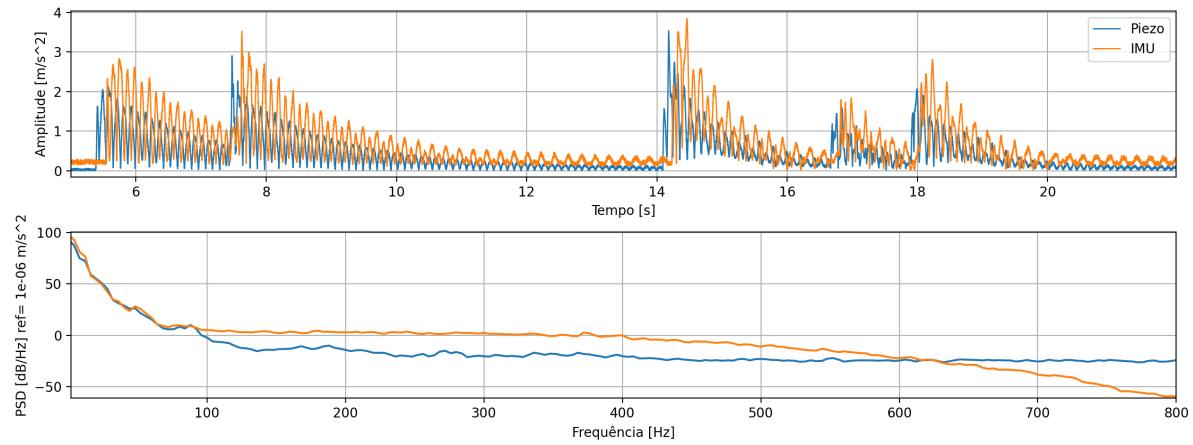


Figura 34 – Experimento 1 de Validação dos IMU

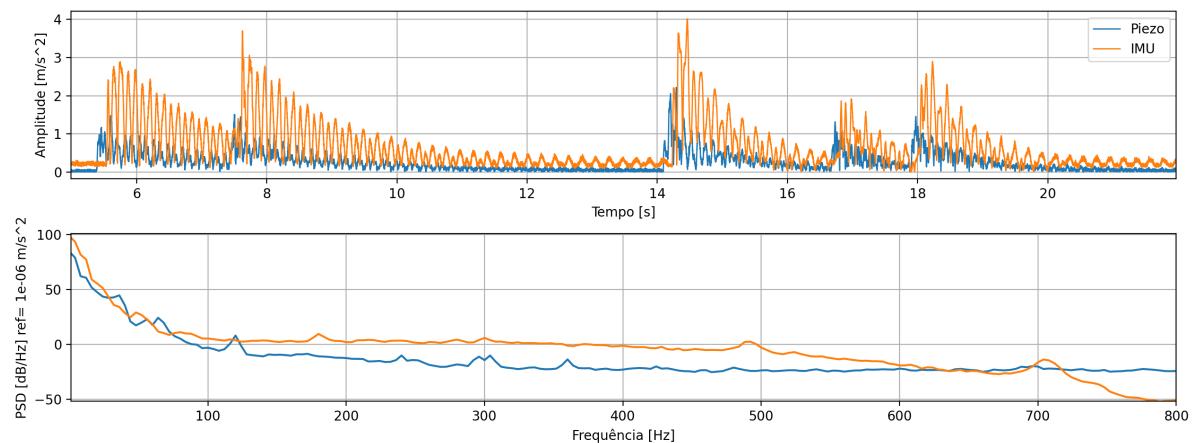


Figura 35 – Experimento 2 de Validação dos IMU

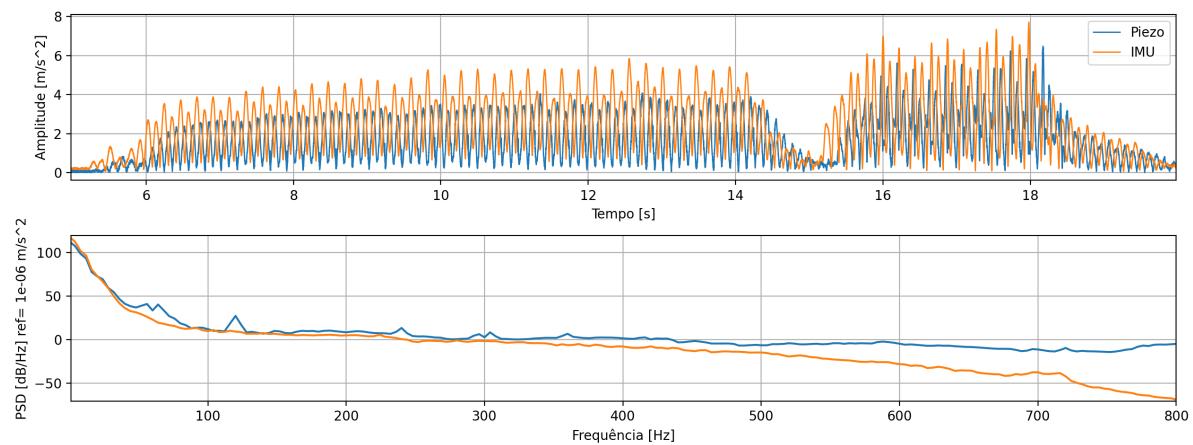


Figura 36 – Experimento 3 de Validação dos IMU

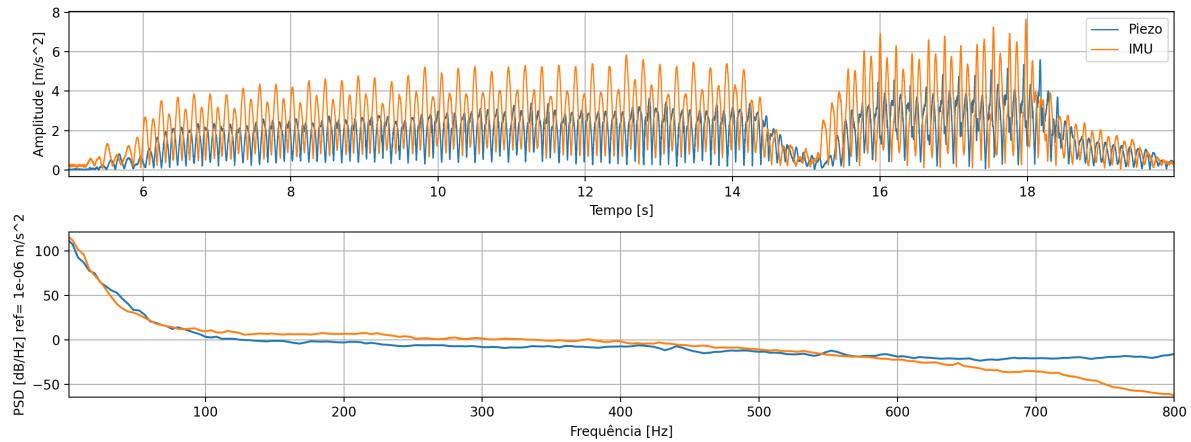


Figura 37 – Experimento 4 de Validação dos IMU

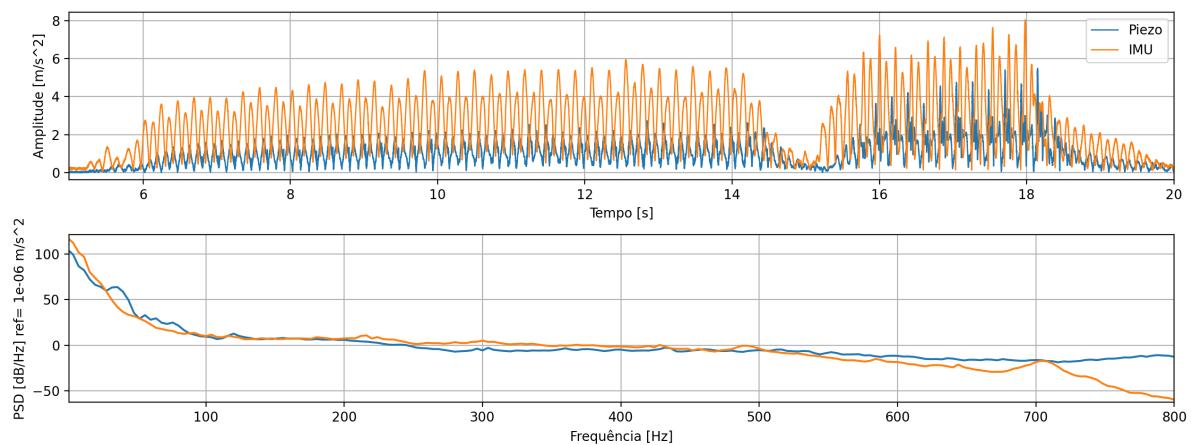


Figura 38 – Experimento 5 de Validação dos IMU

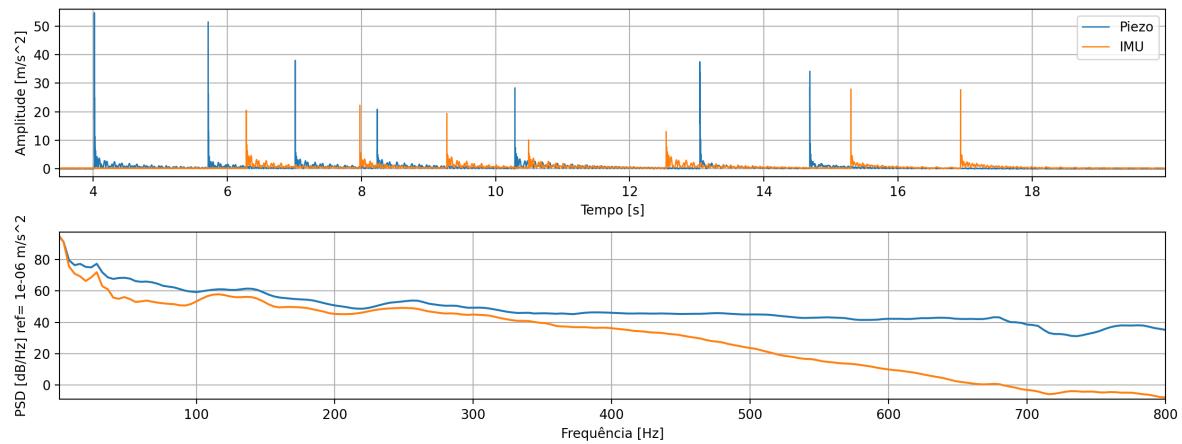


Figura 39 – Experimento 6 de Validação dos IMU

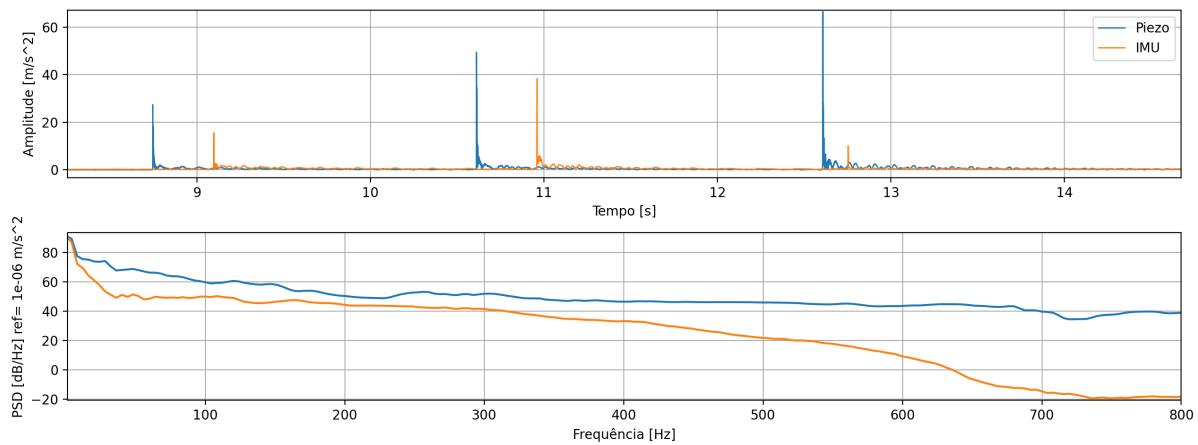


Figura 40 – Experimento 7 de Validação dos IMU

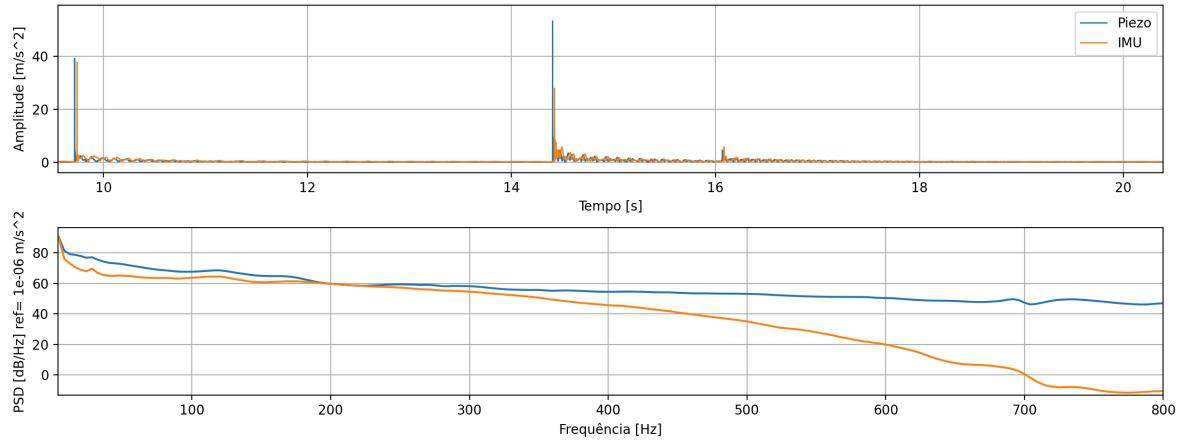


Figura 41 – Experimento 8 de Validação dos IMU

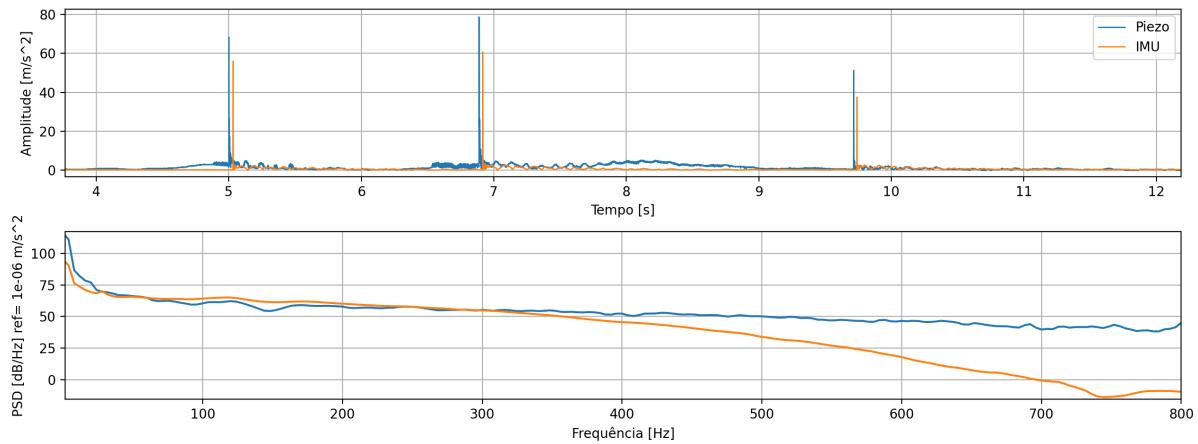


Figura 42 – Experimento 9 de Validação dos IMU

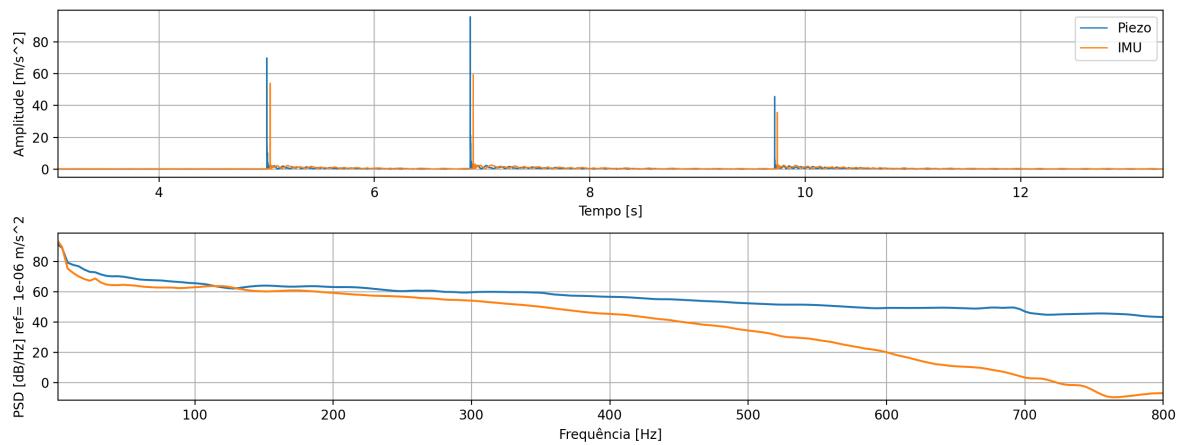


Figura 43 – Experimento 10 de Validação dos IMU

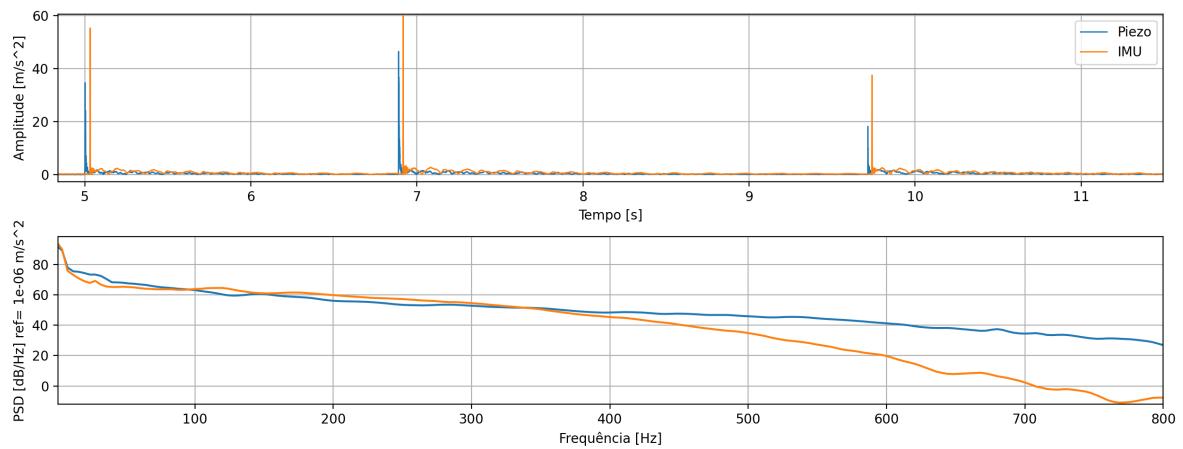


Figura 44 – Experimento 11 de Validação dos IMU

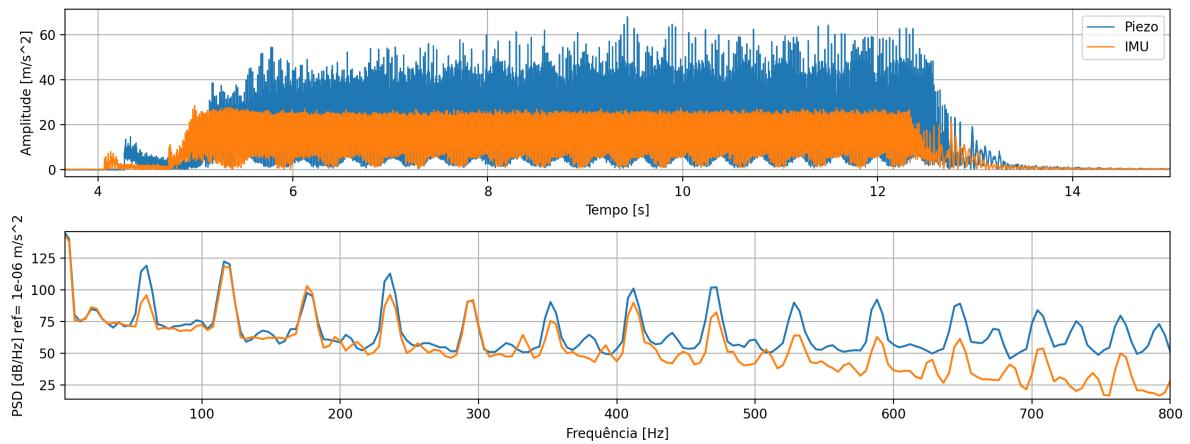


Figura 45 – Experimento 12 de Validação dos IMU

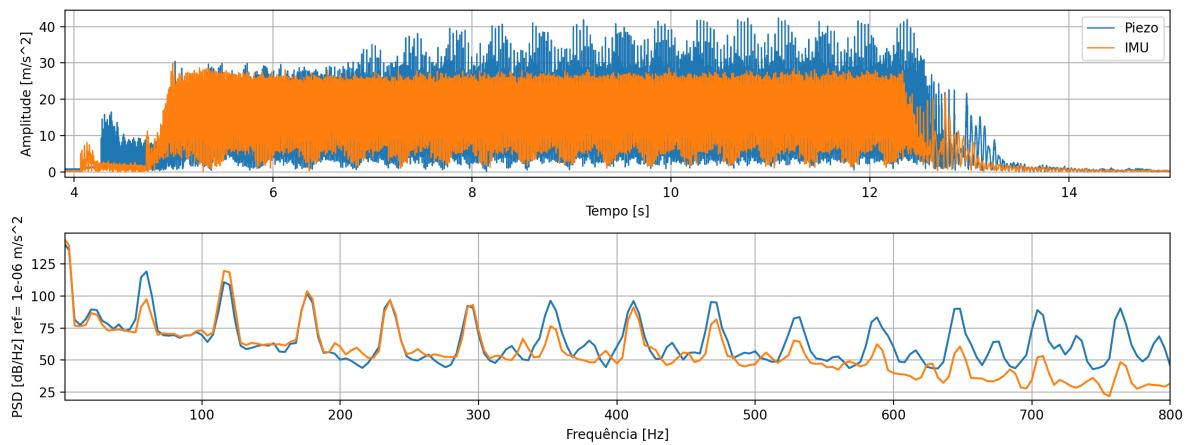


Figura 46 – Experimento 13 de Validação dos IMU

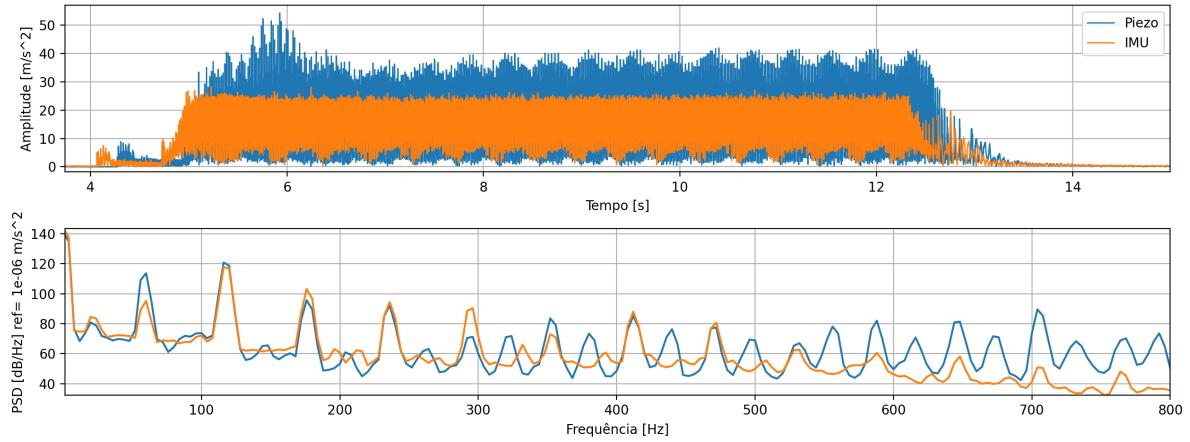


Figura 47 – Experimento 14 de Validação dos IMU

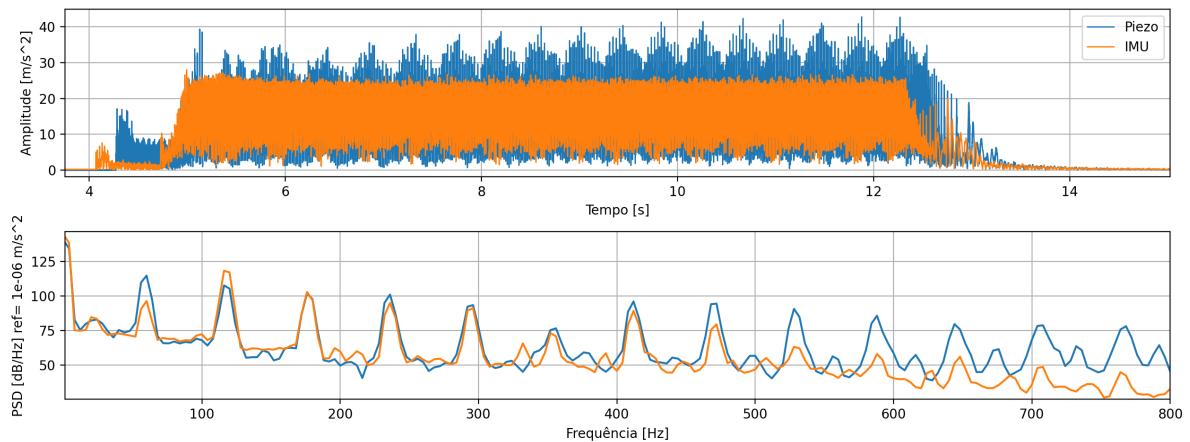


Figura 48 – Experimento 15 de Validação dos IMU

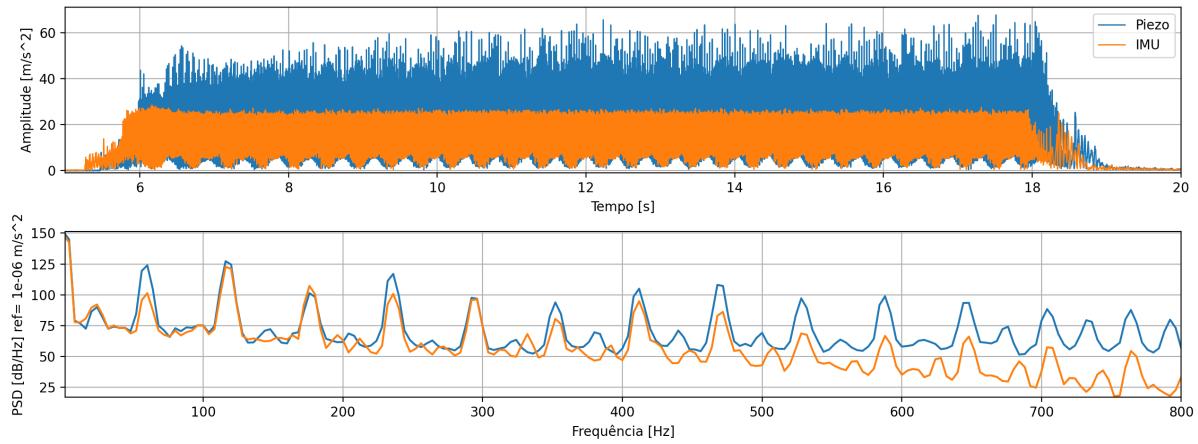


Figura 49 – Experimento 16 de Validação dos IMU

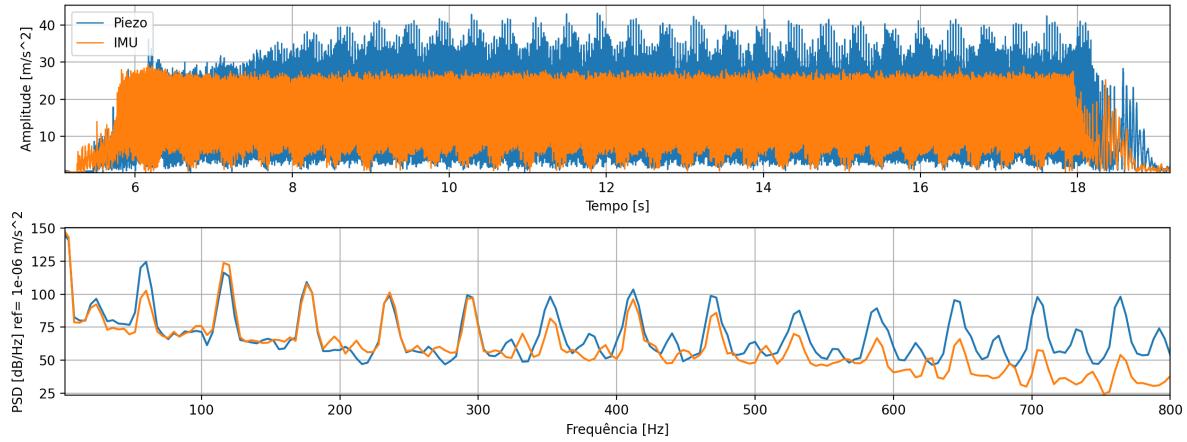


Figura 50 – Experimento 17 de Validação dos IMU

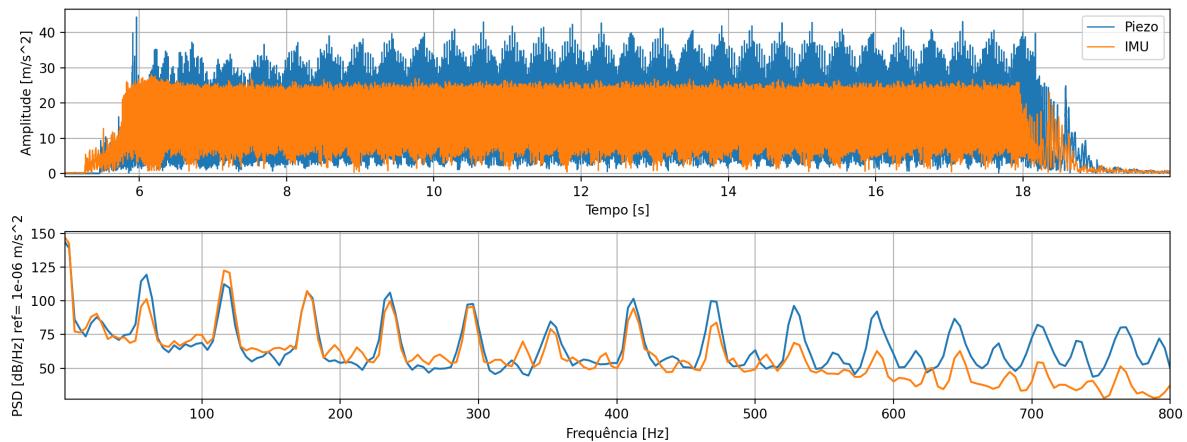


Figura 51 – Experimento 18 de Validação dos IMU

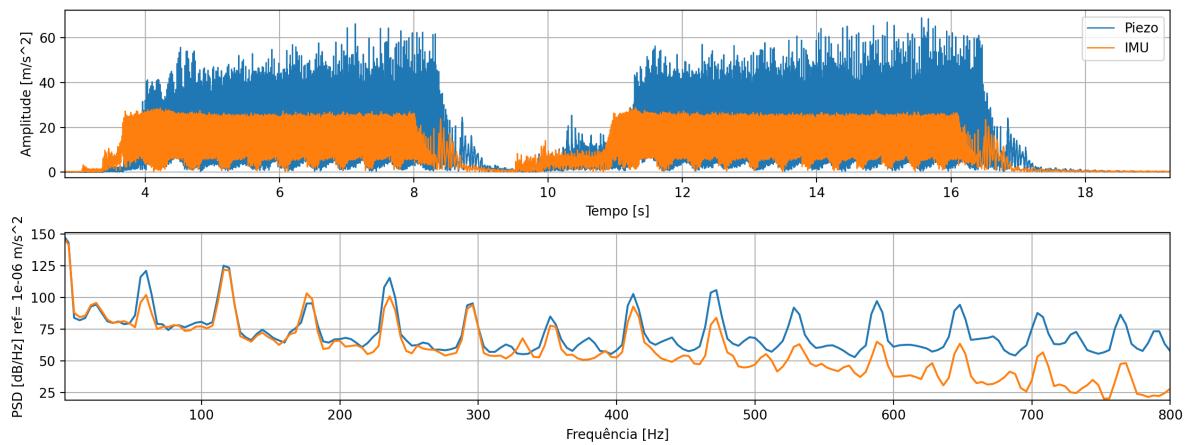


Figura 52 – Experimento 19 de Validação dos IMU

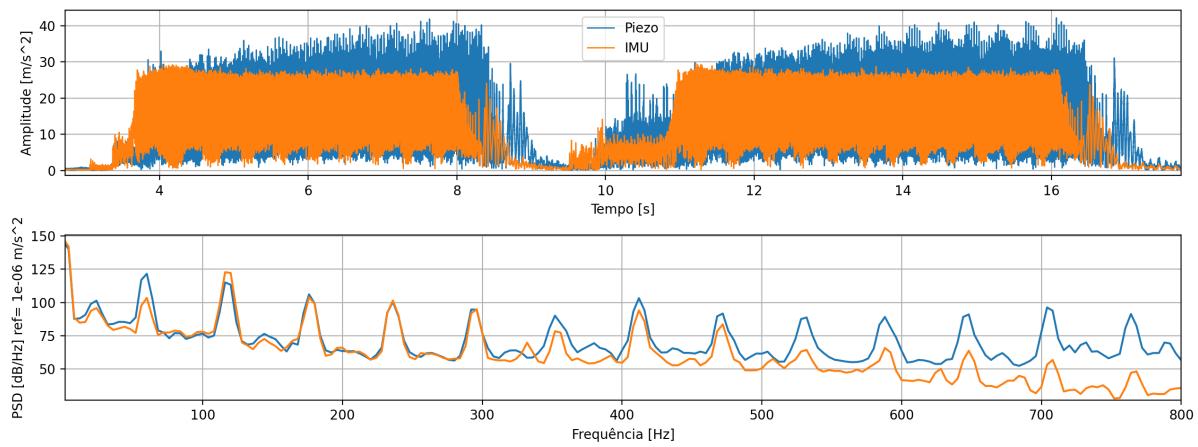


Figura 53 – Experimento 20 de Validação dos IMU

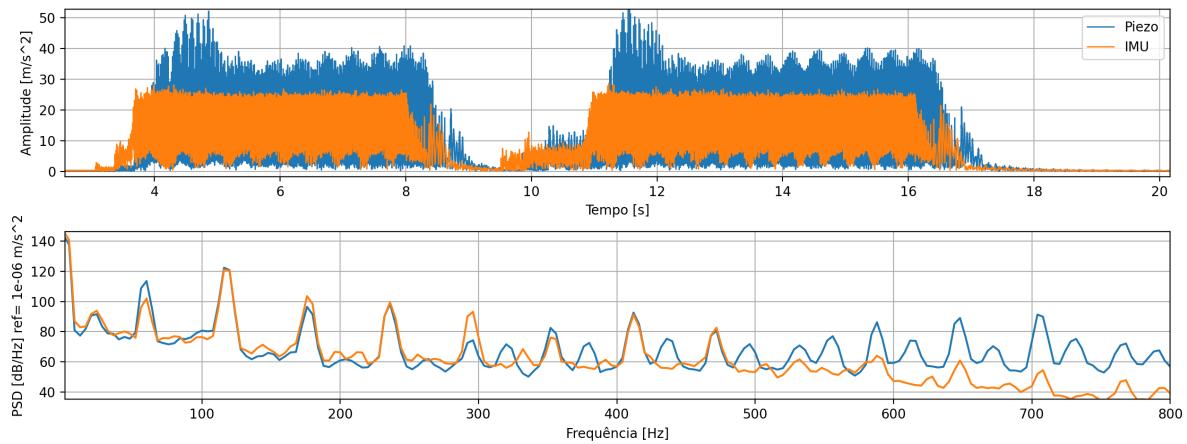


Figura 54 – Experimento 21 de Validação dos IMU

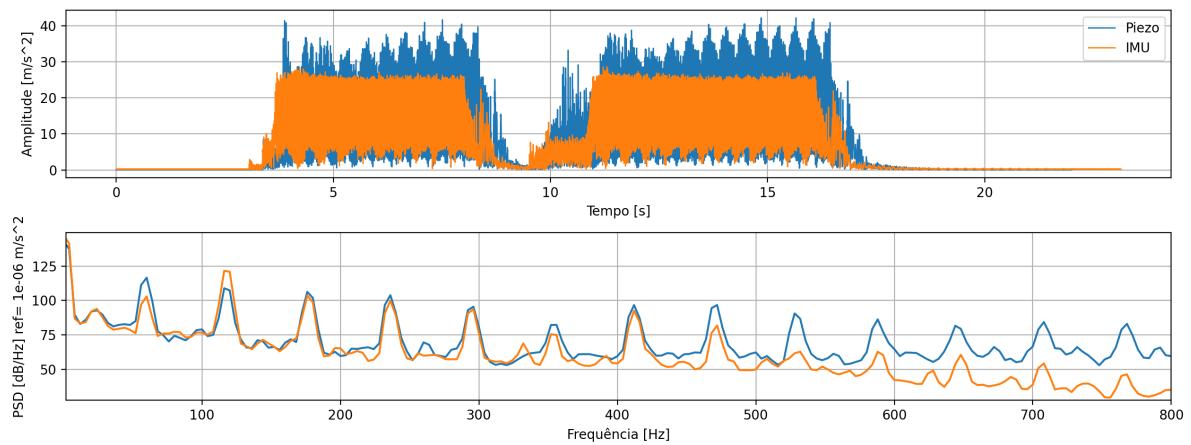


Figura 55 – Experimento 22 de Validação dos IMU

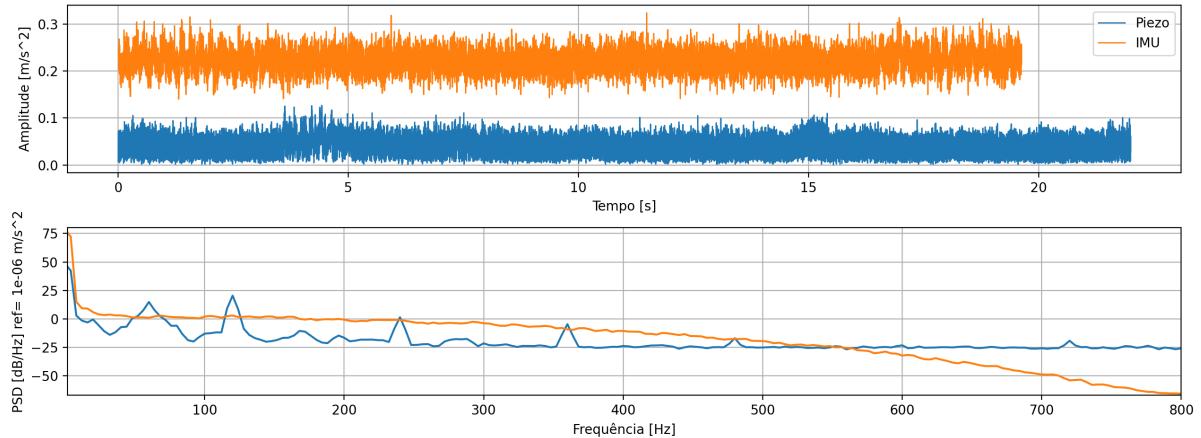


Figura 56 – Experimento 23 de Validação dos IMU

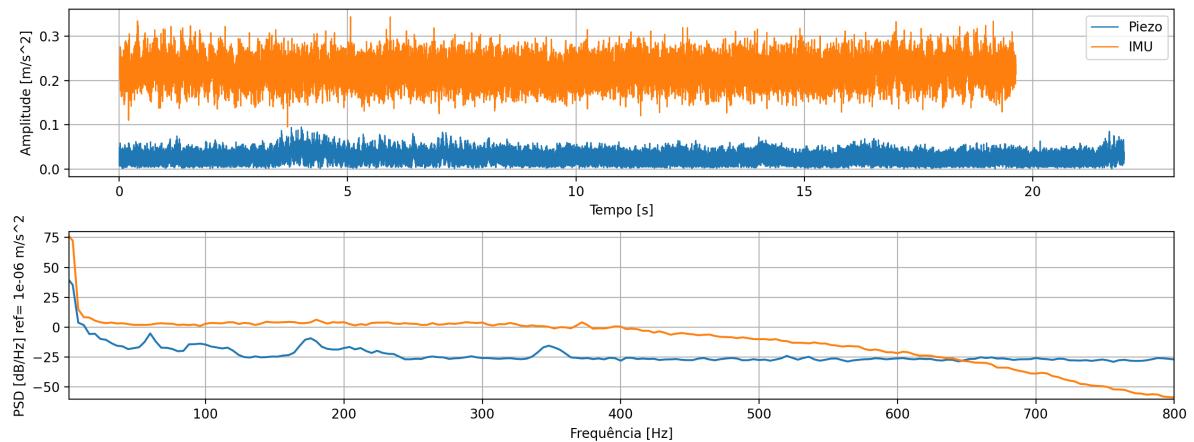


Figura 57 – Experimento 24 de Validação dos IMU

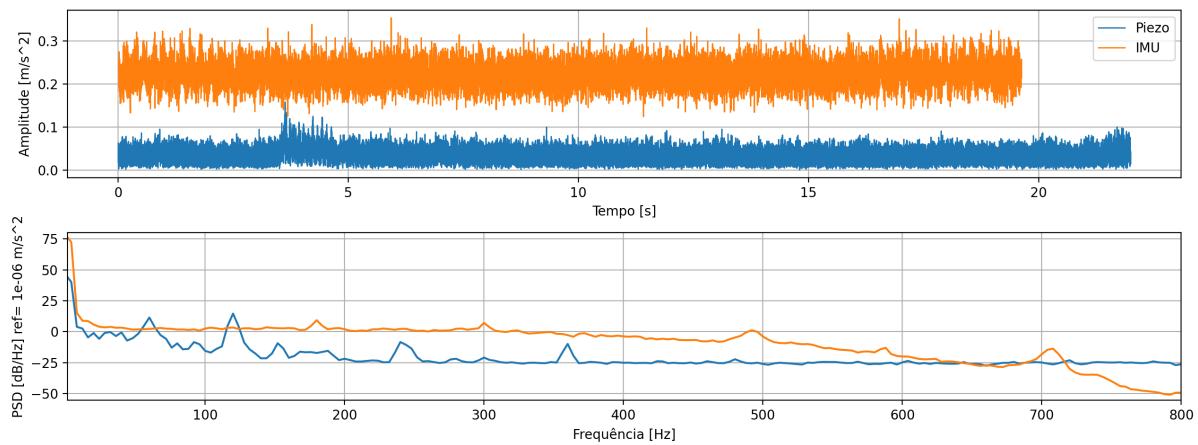


Figura 58 – Experimento 25 de Validação dos IMU

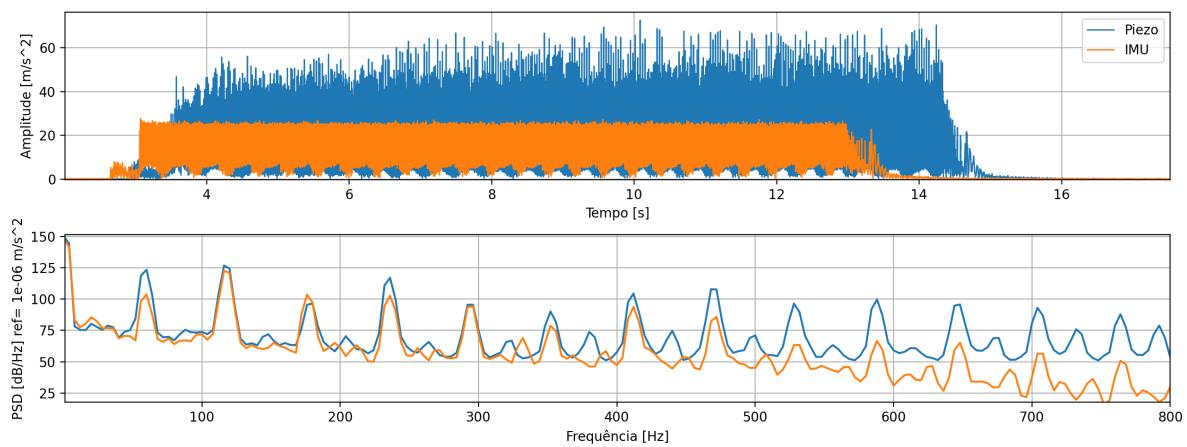


Figura 59 – Experimento 26 de Validação dos IMU

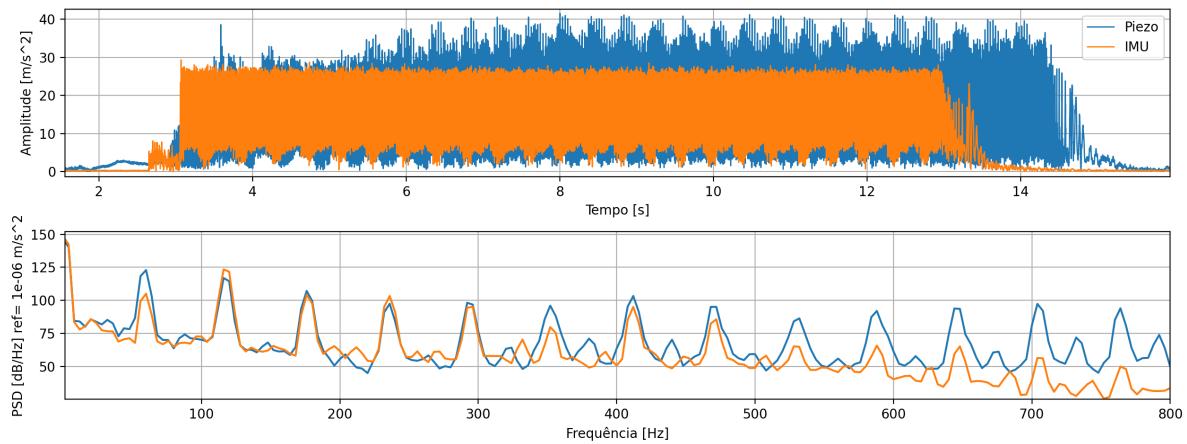


Figura 60 – Experimento 27 de Validação dos IMU

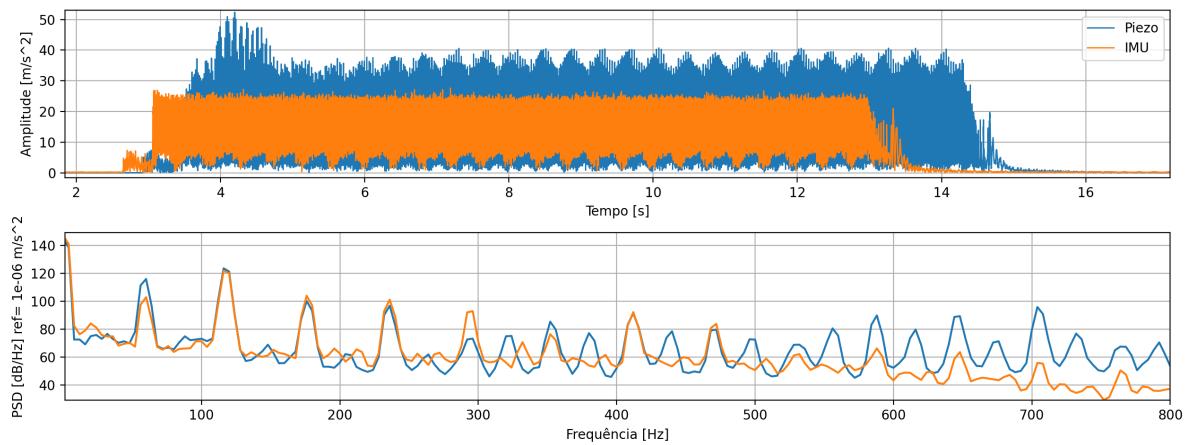


Figura 61 – Experimento 28 de Validação dos IMU

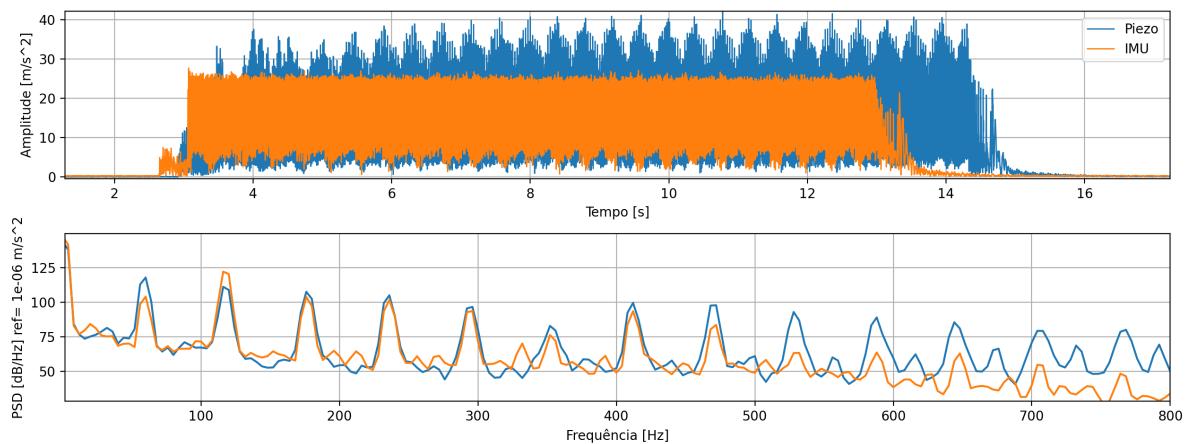


Figura 62 – Experimento 29 de Validação dos IMU

ANEXO A – INTERFACES DE COMUNICAÇÃO DIGITAL

São documentos não elaborados pelo autor que servem como fundamentação (mapas, leis, estatutos). Deve ser precedido da palavra ANEXO, identificada por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelo respectivo título. Utilizam-se letras maiúsculas dobradas quando esgotadas as letras do alfabeto.

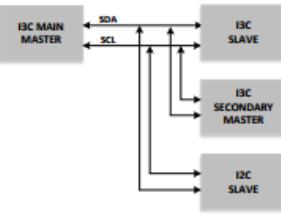
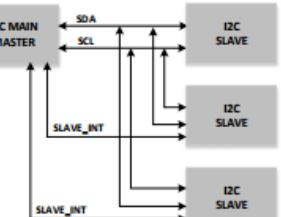
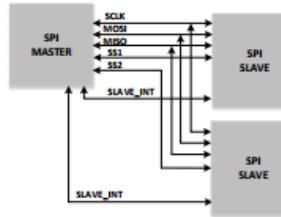
Parameter	MIPI I3C (Improved Inter Integrated Circuits)	I ² C (Inter Integrated Circuits)	SPI (Serial Peripheral Interface)
Overview			
Number of Lines	2-wire	2-wire (plus separate wires for each required interrupt signal)	4-wire (plus separate wires for each required interrupt signal)
Effective Data Bitrate	33.3 Mbps max at 12.5 MHz (Typically: 10.6 Mbps at 12 MHz SDR)	3 Mbps max at 3.4 MHz (Hs) 0.8 Mbps max at 1 MHz (Fm+) 0.35 Mbps max at 400 KHz (Fm)	Approx. 60 Mbps max at 60 MHz for conventional implementations (Typically: 10 Mbps at 10 MHz)
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> Only two signal lines Legacy I²C devices co-exist on the same bus (with some limitations) Dynamic addressing and supports static addressing for legacy I²C devices I²C-like data rate messaging (SDR) Optional high data rate messaging modes (HDR) Multi-drop capability and dynamic addressing avoids collisions Multi-master capability In-band Interrupt support Hot-join support A clear master ownership and handover mechanism is defined In-band integrated commands (CCC) Support 	<ul style="list-style-type: none"> Only two signal lines Flexible data transmission rates Each device on the bus is independently addressable Devices have a simple master/slave relationship Simple implementation Widely adopted in sensor applications and beyond Supports multi-master and multi-drop capability features 	<ul style="list-style-type: none"> Full duplex communication Push-pull drivers Good signal integrity and high speed below 20MHz (higher speed are challenging) Higher throughput than I²C and SMBus Not limited to 8-bit words Arbitrary choice of message size, content and purpose Simple hardware interfacing Lower power than I²C No arbitration or associated failure modes Slaves use the master's clock Slaves do not need a unique address Not limited by a standard to any maximum clock speed (can vary between SPI devices)
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> Only 7-bits are available for device addressing Slower than SPI (i.e. 20Mbps) New standard, adoption needs to be proven Limited number of devices on a bus to around a dozen devices 	<ul style="list-style-type: none"> Only 7-bits (or 10-bits) are available for static device addressing Limited communication speed rates and many devices do not support the higher speeds Slaves can hang the bus; will require system restart Slower devices can delay the operation of faster speed devices Uses more power than SPI Limited number of devices on a bus to around a dozen devices No clear master ownership and handover mechanism. Requires separate support signals for interrupts 	<ul style="list-style-type: none"> Need more pins than I²C/MIPI I3C Need dedicated pin per slave for slave select (SS) No in-band addressing No slave hardware flow control No hardware slave acknowledgment Supports only one master device No error-checking protocol is defined No formal standard, validating conformance is not possible SPI does not support hot swapping Requires separate support signals for interrupts

Figura 63 – Comparativo de protocolos de comunicação digital