

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VITOR DIEGO DIAS ENGERS

MODELAGEM DE RUÍDOS DE GIROSCÓPIOS MEMS COMERCIAIS PARA
APLICAÇÕES EM NAVEGAÇÃO INERCIAL

Joinville
2021

VITOR DIEGO DIAS ENGERS

MODELAGEM DE RUÍDOS DE GIROSCÓPIOS MEMS COMERCIAIS PARA
APLICAÇÕES EM NAVEGAÇÃO INERCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de
Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal
de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Joinville
2021

Dedico este trabalho a meus pais, Renato e Solange. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador Dr. Anderson Wedderhoff Spengler, por todo apoio durante a realização deste trabalho, por me responder em feriados e nos mais diversos horários e por todo conhecimento que me foi passado.

Sou muito grato a minha namorada, Maria, por todo o apoio pessoal e ajuda em todos os momentos que precisei. Sem você e seu companheirismo, a realização desse trabalho não teria sido possível. Muito obrigado.

Um grande obrigado aos meus amigos por todo o companheirismo ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu amigo Dener, por ler o texto integralmente em um domingo e a minha prima Flávia por se dispor a corrigir meu texto.

E finalmente, agradeço imensamente aos meus pais que sempre deram o seu melhor para que eu estivesse realizando meu sonho.

"Aquele que ousa perder uma hora de seu tempo não sabe o valor da vida." (Charles Darwin).

RESUMO

A utilização de unidades inerciais (IMU) está cada vez mais presente nas tecnologias de navegação inercial e só tende a crescer. Atualmente, as soluções com maior acurácia e precisão possuem um custo elevado e não podem ser aplicadas em todos os projetos que necessitam de uma unidade inercial. Por conta disso, projetos de baixo custo não são capazes de utilizar unidades com uma acurácia e precisão que satisfaçam os requisitos de medições mais precisas e algumas soluções de engenharia contribuem para compensar isso. Uma dessas possíveis soluções é a junção de diferentes unidades inerciais de baixo custo e uma fusão dos dados obtidos a fim de se aproximar dos resultados de outras unidades bem mais custosas. Será exposto o desenvolvimento de um modelo genérico no Simulink do MATLAB para a simulação de sinais de giroscópios MEMS que possibilite, futuramente, o projeto de sistemas com múltiplas IMU e fusão de dados para posicionamento inercial. Com o modelo é possível instanciar vários giroscópios diferentes e atribuir a todos o mesmo perfil de temperatura e ângulos de entrada. O modelo foi ajustado e validado em comparação a dados de três IMU físicas de baixo custo. Os ruídos foram quantizados através de uma análise pela Variância de Allan dos dados obtidos empiricamente e o modelo ajustado até produzir uma Variância de Allan semelhante a das aquisições.

Palavras-chave: Unidade inercial. Fusão de dados. Baixo custo. Simulação de IMU. Simulação de Giroscópio.

ABSTRACT

The use of inertial units (IMU) is increasingly present in the technologies used in inertial navigation and only tends to grow. Currently, solutions with greater accuracy have a high cost and cannot be applied to all projects that require an inertial unit. Because of this, these devices are not suitable for low cost projects, and the low-cost do not meet the precision and accuracy required for some applications, requiring engineer solutions to compensate for it. One of these possible solutions is fusing different low cost inertial units and a fusion of the data obtained in order to approximate the results of other much more expensive units. The development of a generic model in MATLAB's Simulink for the simulation of MEMS gyroscope signals will be exposed, which will enable, in the future, the design of systems with multiple IMUs and data fusion for inertial positioning. With the model it is possible to instantiate several different gyroscopes and assign them all the same temperature profile and entry angles. The model was adjusted and validated against data from three low-cost physical IMUs. The noises were quantized through an analysis by Allan's Variance of the data obtained empirically and the model adjusted until producing an Allan's Variance similar to that of the acquisitions.

Tags: IMU. Data fusion. Low-cost. IMU simulation. Gyroscope Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – IMU MEMS do modelo BNO055, com dimensões de 5.2x3.8 [mm]	15
Figura 2 – Estabilidade do fator de escala, deriva e os tipos de giroscópios	18
Figura 3 – Aceleração de Coriolis	19
Figura 4 – Diagrama de blocos do encapsulamento de um dispositivo MEMS	20
Figura 5 – Design de giroscópios MEMS	21
Figura 6 – Gráfico para instabilidade de polarização (para $f_0 = 1$)	23
Figura 7 – Gráfico para <i>angle random walk</i>	24
Figura 8 – Funções de Autocorrelação e Densidade Espectral para um Ruído Branco	26
Figura 9 – A curva gaussiana	27
Figura 10 – Gráfico de amostra dos resultados da análise da Variância de Allan	30
Figura 11 – Modelo de blocos implementado no Simulink	32
Figura 12 – Parâmetros do bloco de ruído branco	33
Figura 13 – Janela de configuração do bloco de ganho da deriva dinâmica	34
Figura 14 – Parâmetros dos blocos de ganho do sistema e da deriva estática	34
Figura 15 – Criação dos parâmetros do eixo genérico de um giroscópio.	35
Figura 16 – Sistema do <i>Simulink</i> referente ao BNO055 utilizando três eixos e a janela de configuração dos parâmetros do eixo x.	35
Figura 17 – Sistema do <i>Simulink</i> referente ao SCC2130 utilizando apenas o eixo x.	36
Figura 18 – Sistemas com os três giroscópios utilizados.	36
Figura 19 – Sistema representando uma placa definitiva.	37
Figura 20 – Janela de parâmetros para o bloco de perfil de temperatura	37
Figura 21 – As três PCB e as IMU utilizadas, sendo elas SCC2130, MPU9250 e BNO055, da esquerda para a direita	38
Figura 22 – TIVA acoplado na PCB durante uma aquisição	39
Figura 23 – Dados da aquisição do giroscópio da SCC2130	39
Figura 24 – A temperatura ao longo da aquisição	40
Figura 25 – Dados da aquisição da MPU9250	41
Figura 26 – Temperatura da MPU9250 durante a aquisição	41
Figura 27 – Dados da aquisição do giroscópio da BNO055	42
Figura 28 – Temperatura do giroscópio da BNO055 durante a aquisição	43
Figura 29 – A_{VAR} para a aquisição da SCC2130	44
Figura 30 – Quantização dos ruídos através da A_{VAR}	44
Figura 31 – A_{VAR} dos três eixos da MPU9250	45
Figura 32 – A_{VAR} dos três eixos da BNO055	46
Figura 33 – Janela de parâmetros do modelo para o eixo x da SCC2130	48

Figura 34 – Comparação entre os dados reais e simulação sem ajustes para a SCC2130	48
Figura 35 – Comparação entre os dados reais e simulação sem ajustes para a SCC2130 de forma ampliada	49
Figura 36 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição e da simulação sem ajuste	49
Figura 37 – Parâmetros do bloco do eixo x da SCC2130 após ajustes	50
Figura 38 – Comparação entre a rotação da aquisição e da simulação após ajustes	50
Figura 39 – Comparação entre a rotação da aquisição e da simulação após ajustes de forma ampliada	51
Figura 40 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição e da simulação após ajustes	51
Figura 41 – A_{VAR} para o giroscópio da SCC2130	52
Figura 42 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição, da simulação e com ruídos do <i>datasheet</i>	53
Figura 43 – Blocos de configuração dos eixos da MPU9250	53
Figura 44 – Blocos de configuração dos eixos da MPU9250	54
Figura 45 – A_{VAR} do eixo x real e simulado para a MPU9250	54
Figura 46 – A_{VAR} do eixo y real e simulado para a MPU9250	55
Figura 47 – A_{VAR} do eixo z real e simulado para a MPU9250	55
Figura 48 – A_{VAR} das aquisições e com valores do <i>datasheet</i> para a MPU9250	56
Figura 49 – Parâmetros finais após ajustes para o BNO055	56
Figura 50 – Dados dos eixos simulados após os ajustes manuais	57
Figura 51 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo x da BNO055	57
Figura 52 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo y da BNO055	58
Figura 53 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo z da BNO055	58
Figura 54 – A_{VAR} das aquisições e com valores do <i>datasheet</i> para a MPU9250	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos principais ruídos dos giroscópios utilizados no trabalho	31
Tabela 2 – Offset para a SCC2130.	40
Tabela 3 – Offset para a MPU9250	41
Tabela 4 – Offset para a BNO055	42
Tabela 5 – Ruídos quantizados através do A_{VAR} para a SCC2130	45
Tabela 6 – Ruídos quantizados através da A_{VAR} para a MPU9250	46
Tabela 7 – Ruídos quantizados através da A_{VAR} para a BNO055	47
Tabela 8 – Ruídos informados pelo <i>datasheet</i> da SCC2130	52

LISTA DE SIGLAS

A_{VAR} Variância de Allan

ARW Angle Random Walk

FFT Fast Fourier Transform

GNSS Sistema Global de Navegação por Satélite

GWN Gaussian White Noise

I2C Inter-Integrated Circuit

IMU Unidade de Medição Inercial

LISHA Laboratório de Integração de Software e Hardware

MEMS Sistemas Microeletromecânicos

NEMS Sistemas Nanoeletromecânicos

PSD Power Spectral Density

RPM Rotações por minuto

SPI Serial Peripheral Interface

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Momento angular	$[\frac{kgm^2}{s}]$
I	Torque	$[Nm]$
w_z	Velocidade angular	$[\frac{rad}{s}]$
Ω	Velocidade angular real	$[\frac{rad}{s}]$
α_c	Aceleração de Coriolis	$[\frac{m}{s^2}]$
$\Omega_g^b(t)$	Leitura do giroscópio do sensor	
s_g	Polarização do giroscópio	$[\frac{C}{m^2}]$
n_g	Ruído de alta frequência	$[\]$
τ_0	Tempo de amostragem	$[s]$
$\overline{\Omega_k}(t)$	Média do agrupamento de taxa de saída	$[\frac{\circ^2}{s}]$
$\xi_{k+1,k}$	Conjunto de agrupamento	$[\frac{\circ^2}{s}]$
$\sigma^2(T)$	Variância de Allan	$[\frac{\circ^2}{s}]$
$\theta(t)$	Variância de Allan	$[\frac{\circ^2}{s}]$
$\sigma(\%error)$	Erro percentual	$[\%]$
$S_{(\Omega)}(f)$	Taxa PSD	$[\frac{W}{Hz}]$
B	Coefficiente de instabilidade de polarização	$[\frac{\circ}{h}]$
f_o	Frequência de corte	$[Hz]$
ARW	Angle Random Walk	$[\frac{\circ}{\sqrt{h}}]$
σ	Desvio padrão do sinal	$[\frac{\circ}{\sqrt{h}}]$
BW	Largura de banda	$[Hz]$
$R_{wn}(\tau)$	Autocorrelação de GWN	$[W]$
$S_{wn}(jw)$	Autocorrelação de GWN	$[W]$
$f(V_R)$	Função Densidade de Probabilidade	$[V]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.0.1	OBJETIVOS	15
1.0.1.1	Objetivo Geral	15
1.0.1.2	Objetivos Específicos	15
2	GIROSCÓPIOS E OS IMPACTOS DOS RUÍDOS ATRELADOS	17
2.1	Giroscópio	18
2.1.1	GIROSCÓPIO MEMS	19
2.2	Ruídos e Análises	21
2.2.1	Deriva (<i>Bias Instability</i>)	21
2.2.2	<i>Angle Random Walk</i>	23
2.2.3	Ruído Gaussiano Branco	25
2.2.4	Variância de Allan	27
2.2.4.1	Definição matemática	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	Seleção das IMU	31
3.2	Modelo matemático do giroscópio	32
3.3	Modelo genérico para um eixo do giroscópio no <i>Simulink</i>	32
3.4	Associação de eixos no <i>Simulink</i> para representação de cada modelo dos giroscópios	35
3.5	Associação dos modelos no <i>Simulink</i> representando os três giroscópios	36
3.6	Criação de um modelo no <i>Simulink</i> simulando uma PCB contendo todos os giroscópios	37
3.7	Aquisição dos dados	38
3.7.1	SCC2130	39
3.7.2	MPU9250	40
3.7.3	BNO055	42
3.8	Medição dos ruídos através da Variância de Allan	43
3.8.1	SCC2130	43
3.8.2	MPU9250	45
3.8.3	BNO055	46
4	RESULTADOS	48
4.1	Ajustes finais dos modelos	48
4.1.1	SCC2130	48
4.1.2	MPU9250	53

4.1.3	BNO055	56
5	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

As ferramentas para navegação e, conseqüentemente, orientação espacial, são essenciais para a humanidade. Segundo NERIS, M. (2019), é evidente a evolução desses meios, tendo em vista a constante necessidade de sobrevivência e exploração de novos espaços. Além disso, é possível observar as mudanças que ocorreram desde os antigos humanos pré-históricos que faziam marcações em pedras e paredes para se orientar, passando pelas antigas civilizações que utilizavam astros para navegar, pela invenção da bússola no século XI, até as ondas de rádio utilizadas para orientação e diversos sistemas, como o GPS, entre outros.

Atualmente, os pesquisadores anseiam por soluções relacionadas a precisão, custo ou ao dimensionamento e desempenho de medições inerciais, que têm sido amplamente utilizadas para estimar movimentos de veículos em um espaço 3D, como aviões, helicópteros e automóveis (CHATFIELD, 2016). No centro da maioria dos Sistemas de Navegação Inercial (INS, *Inertial Navigation System*) está uma unidade de medição inercial (IMU, *Inertial Measure Unit*) que mede aceleração linear e velocidade angular. A IMU é ideal para rastrear o estado de um veículo em curtos períodos, quando passa por movimentos com perfil dinâmico alto. Desse modo, a tecnologia IMU está sendo cada vez mais utilizada e se tornará a tendência no desenvolvimento de satélites, pois possibilita atender requisitos de confiabilidade, segurança e alta precisão (KONIGSEDE; KUGI, 2016).

Ademais, nas últimas décadas, atribui-se uma atenção considerável aos dispositivos inerciais do sistema microeletromecânico (MEMS), como giroscópios e acelerômetros, tendo em vista o pequeno tamanho, baixo custo e alta sensibilidade. Após décadas de desenvolvimento e estudos, os dispositivos têm sido amplamente aplicado na indústria. Segundo a *Yole Development* (CHATFIELD, 2016), o mercado de MEMS cresce anualmente 2.7% e tem previsão de chegar a 3.8 bilhões de dólares até 2025. As aplicações estão saindo da indústria aeroespacial e se expandindo para o cotidiano, presentes em celulares, drones e automóveis. Entretanto, independentemente do objetivo com que as unidades inerciais sejam utilizadas, o princípio de funcionamento continua o mesmo e as características necessárias ficam sujeitas a critérios de projeto para obtenção de um desempenho eficiente e ainda assim um alto custo benefício.

As IMU utilizando a tecnologia MEMS podem conter um giroscópio (que medem velocidade angular), acelerômetro (que medem acelerações lineares) e um magnetômetro (intensidade de campos magnéticos em sua proximidade), com cada sensor medindo de um a três eixos de direção. Por serem dispositivos microeletrônicos, têm tamanho e peso inferiores aos outros tipos de IMU e, por esse motivo, são utilizados em aplicações que possuem esse requisito como prioridade. Tais aplicações podem variar desde dispositivos móveis até satélites, onde cada grama e cada centímetro fazem a diferença. Em contrapartida, o custo desses dispositivos costuma subir exponencialmente conforme a acurácia e confiabilidade, conseqüentemente,

impactando no orçamento do projeto ou na escolha do componente. Uma das IMU utilizada neste trabalho pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 – IMU MEMS do modelo BNO055, com dimensões de 5.2x3.8 [mm]



Fonte: Digikey (2020).

As principais características desse tipo de dispositivo são tamanho e peso reduzidos, com cerca de 5,2x3,8 [mm] de largura e profundidade, 1,13 [mm] de altura e pesando cerca de 150 [mg].

Devido a isso, há o potencial de associar diversas unidades em uma mesma placa para construir uma unidade inercial com maior nível de acurácia e precisão através de algoritmos de fusão de dados. Motivado por isso, este trabalho abordará o desenvolvimento de um modelo capaz de simular diversas unidades inerciais a fim de projetar a associação e implementação destinado a fusão desses sensores.

1.0.1 OBJETIVOS

Nos próximos itens serão discutidas as finalidades pretendidas por esse trabalho.

1.0.1.1 *Objetivo Geral*

O objetivo do trabalho é criar um simulador de sinais de giroscópios utilizando o *Simulink* do *MATLAB*, com intuito de em pesquisas futuras, avaliar diferentes algoritmos de fusão de dados de diversos giroscópios de dispositivos de médio desempenho de baixo custo e comparar os resultados em relação a um giroscópio certificado para satélites. Visando assim, melhorar a acurácia e precisão e diminuir o custo dos giroscópios MEMS, considerando a alta demanda do mercado.

1.0.1.2 *Objetivos Específicos*

- Caracterizar um modelo matemático que se aproxime do comportamento real de um giroscópio MEMS.
- Implementar o modelo matemático na ferramenta *Simulink* do *MATLAB*.

- Simular diferentes giroscópios com diferentes magnitudes de ruídos, utilizando o modelo desenvolvido no *Simulink*.
- Validar os modelos simulados em comparação aos giroscópios reais.

2 GIROSCÓPIOS E OS IMPACTOS DOS RUÍDOS ATRELADOS

Neste capítulo serão introduzidos conceitos essenciais para a compreensão dos resultados alcançados, apresentando o funcionamento básico dos instrumentos estudados e os parâmetros fundamentais para análise do processamento de sinal que relacionam seus dados em termos de velocidade angular.

Segundo HOU, H. (2003), uma unidade de medição inercial (IMU) é um dispositivo eletrônico que mede e relata a velocidade e orientação de um veículo usando combinação de acelerômetros e giroscópios, às vezes pode conter magnetômetros. O dispositivo fornece uma saída de aceleração e taxa angular, que são então integradas as posições, velocidade e altitude.

IMU são utilizadas para sistemas de navegação inercial que precisam do conhecimento de uma posição exata, mais frequentemente usadas para manobrar aeronaves, incluindo veículos não tripulados (UAVs), além de espaçonaves, incluindo satélites e landers (ZHI, R., 2016). Além de ampla aplicação em armas guiadas com precisão, navegação de navios e aeronaves, estimativa de orientação do corpo humano, telefones inteligentes, posicionamento de satélites entre outros. Atualmente, conforme BORESTEIN, J. (2009), há uma alta demanda por dispositivos de medição inercial, exigindo que estes apresentem cada vez maior precisão em suas medições.

As medições IMU são degradadas corrompidas por diferentes tipos de fontes de erro, como ruídos dos sensores, erros de fator de escala, não linearidade, sensibilidade cruzada, desalinhamento entre os seus eixos, entre outros. Ao integrar as medições da IMU nos algoritmos de navegação observa-se que o acúmulo de erros proporciona uma deriva significativa nas saídas de posição e velocidade. Portanto, é essencial que para projetar e ter um bom desempenho dos sistemas inerciais, faz-se necessário conhecer o modelo de ruído dos sensores (HOU, H., 2003). Vários métodos foram desenvolvidos para a modelagem estocástica desses ruídos. Alguns ruídos e seus procedimentos para resolução serão tratados na próxima seção.

Este estudo é orientado a pesquisa dos giroscópios, portanto esta revisão apenas abordará esse tipo de sensor. Uma vez que giroscópios medem taxa de rotação, eles exigem que seus sinais sejam integrados numericamente para produzir a informação desejada. Entretanto, a integração numérica tende a causar erros devido à deriva, esta que é produzida quando pequenos desvios do sinal são integrados ao longo do tempo. De acordo com BORESTEIN, J. (2009), a deriva é composta por dois componentes: um de mudança lenta, chamado de *Bias Instability*, e um de ruído de alta frequência idealmente com uma média de zero, chamado *Angle Random Walk*. O componente de alta frequência cria erros pequenos em relação ao cálculo da direção do giroscópio, já o componente de mudança lenta é influenciada pela variação da temperatura.

2.1 GIROSCÓPIO

Giroscópio é o dispositivo que determina a variação na orientação, este mede a taxa de variação de ângulo de rotação em torno de um eixo específico. Ao contrário dos acelerômetros, os giroscópios idealmente não deveriam ser afetados pela gravidade e sua unidade de rotação de velocidade angular é medida em rotações por minuto (RPM) ou graus por segundo ($^{\circ}/s$).

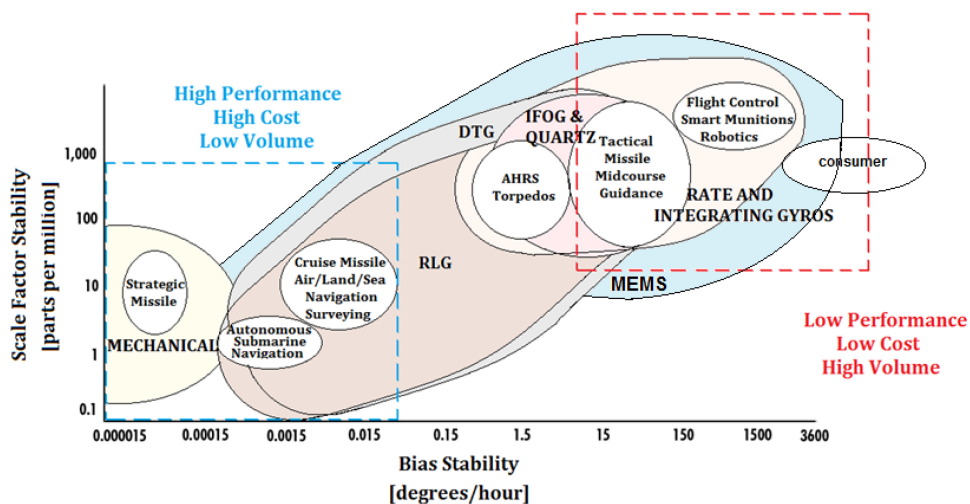
Todos os objetos giratórios têm propriedades giroscópicas, sendo que suas principais propriedades são rigidez no espaço e precessão. A rigidez no espaço descreve o princípio no qual o giroscópio permanece em posição fixa no plano em que está girando, sem ser afetado pela rotação da Terra. A precessão é induzida pelo torque, ou seja, a taxa de variação do momento angular e da velocidade angular que foi produzida pelo torque aplicado. Como pode ser descrito nas equações abaixo por HIBBELER, R.C (2016).

$$\Sigma M_x = -I\phi'^2 \sin\theta \cos\theta + I_z \phi' \sin\theta (\phi' \cos\theta + \psi'), \quad (1)$$

onde a velocidade angular é $w_z = \phi' \cos\theta + \psi'$, ϕ'^2 representa a precessão, ψ' representa o giro e θ o respectivo eixo.

Para todas as classes de giroscópios, os problemas estão relacionados aos erros na medição da velocidade angular, sendo assim o desempenho e os custos do giroscópio estão diretamente relacionados aos requisitos de aplicação. Na Figura 2, pode-se observar uma comparação entre os diversos tipos de giroscópios e seus desempenhos, desenvolvida por PASSARO, V.M. (2017).

Figura 2 – Estabilidade do fator de escala, deriva e os tipos de giroscópios



Fonte: PASSARO, V.M. (2017)

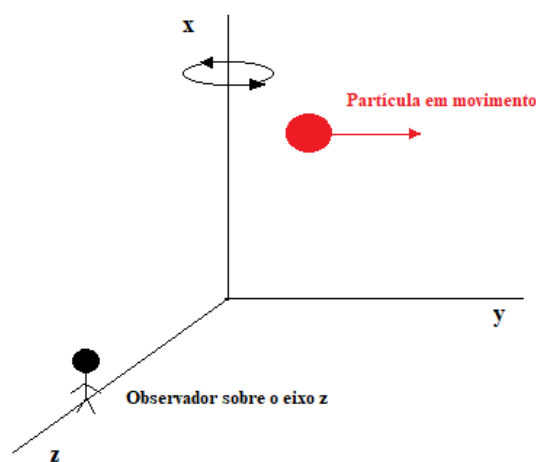
Melhor desempenho, com os custos mais altos e o menor volume de produção, estão relacionados às tecnologias de giroscópios colocadas no canto inferior esquerdo, enquanto que o desempenho baixo, assim como seu custo e alta quantidade, são colocados no canto superior à direita. Por sua vez, uma menor deriva está relacionada a aplicações que necessitam de uma

maior estabilidade ao longo do tempo, como o caso de submarinos e mísseis.

Segundo PASSARO, V.M. (2017), os giroscópios MEMS usam um elemento mecânico vibratório para detecção da velocidade angular e não possuem peças rotativas que necessitem de rolamentos, permitindo uma fácil miniaturização e uso de métodos de fabricação típicas de dispositivos MEMS. Todos os giroscópios MEMS com elemento vibratório são baseados na transferência de energia entre dois modos de vibração causados pela aceleração de Coriolis .

A aceleração de Coriolis é uma aceleração aparente observada em um referencial rotativo. Para melhor entendimento, observando a Figura 3, podemos considerar uma partícula de massa m movendo-se no espaço com uma velocidade v .

Figura 3 – Aceleração de Coriolis



Fonte: Adaptado de PASSARO, V.M. (2017)

Uma vez fixado ao sistema de referência, se a partícula estiver girando com uma velocidade angular $\Omega = \Omega_x$ em torno do eixo x , e um observador, fixado em z , pode-se ver a partícula movendo-se ao longo do eixo z com uma aceleração de Coriolis igual a $a_c = 2v\Omega$, embora a força real não seja aplicada ao longo do eixo z (PASSARO, V.M., 2017).

Para selecionar o giroscópio adequado para a aplicação desejada deve-se levar alguns fatores em consideração como: certificar que a velocidade angular máxima que espera-se medir não exceda o alcance máximo do giroscópio; prestar atenção em quais eixos o giroscópio irá medir; considerar a quantidade de energia que o giroscópio consumirá (SPARKFUN, 2020).

2.1.1 GIROSCÓPIO MEMS

De acordo com ZHI, R. (2016), novos dispositivos que demandam sensores de baixo custo desencadearam o desenvolvimento de sensores de sistema microeletromecânico. MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) são dispositivos muito pequenos, eles se fundem em escala nano em sistemas nanoeletromecânicos (NEMS) e nanotecnologia. MEMS são compostos de componentes entre 1 a 100 micrômetros em tamanho e variam em tamanho de 20 micrômetros a um milímetro .

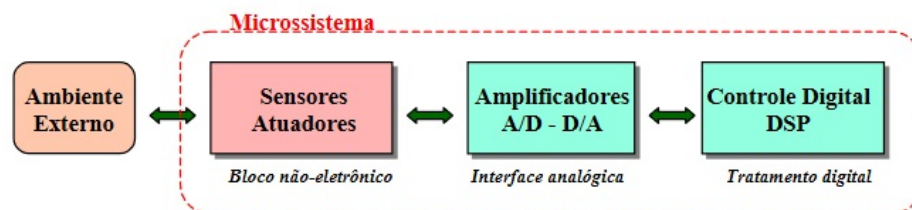
Os MEMS constituem um grande número de dispositivos mecânicos integrados a uma grande quantidade de componentes elétricos, sobre um substrato de silício. Podem ser de dois tipos: microssores e microatuadores.

Microssores coletam informações do ambiente pela medição de fenômenos mecânicos, térmicos, químicos, ópticos e/ou magnéticos, em seguida processam as informações coletadas e retornam decisões que direcionam as respostas dos microatuadores. Microatuadores incluem eixos, engrenagens, motores com apenas alguns micrômetros de tamanho.

Os MEMS são dispositivos microscópicos e são vulneráveis a muitos fatores. Seu funcionamento é geralmente tido como pobre em acurácia para certas aplicações devido à deriva e *Angle Random Walk*, natureza dos sensores inerciais (ZHI, R., 2016). Entretanto, são pequenos, leves e exibem uma tolerância a choques muito maior do que os giroscópios mecânicos tradicionais. Assim, esses dispositivos se tornaram fundamentais em aplicações onde custo, tamanho e menor consumo de energia são cruciais. Consequentemente, as pesquisas de tecnologia de sensores inerciais têm se concentrado quase exclusivamente no desenvolvimento e aprimoramento dos MEMS (PUPO, L.B., 2016).

A partir dessa evolução, é possível fabricar em apenas um bloco os sensores ou atuadores juntamente dos circuitos microeletrônicos responsáveis pelo funcionamento e sensoriamento do ambiente externo. Na Figura 4, é possível observar um diagrama de blocos exemplificando o encapsulamento de um dispositivo MEMS.

Figura 4 – Diagrama de blocos do encapsulamento de um dispositivo MEMS



Fonte: RIBAS, R. P. (2000)

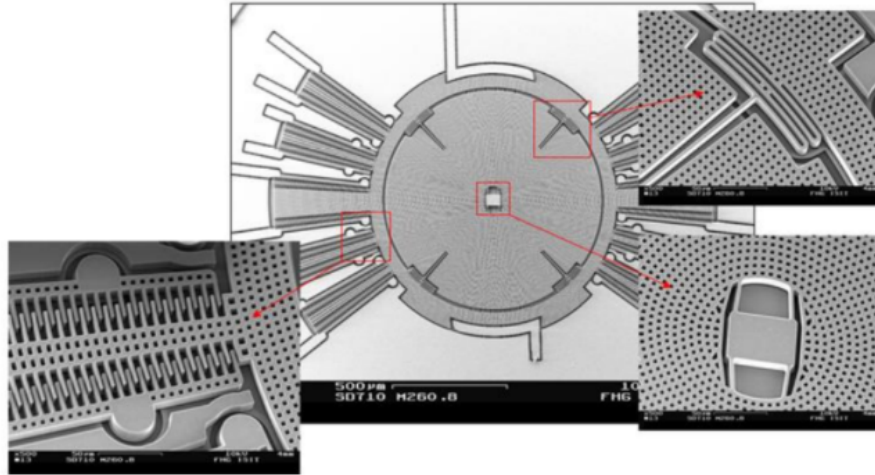
Esse sistema possui três blocos fundamentais: o bloco de comunicação com o meio externo que age como sensor e /ou atuador, o bloco de interface analógica para aquisição e/ou transmissão e amplificação dos sinais dos sensores e/ou atuadores e, por fim, o bloco de controle e tratamento matemático (RIBAS, R. P., 2000).

PUPO, L.B. (2016) define as propriedades dos sensores MEMS em: tamanho pequeno, baixo peso, construção robusta, baixo consumo de energia, curto tempo de inicialização, barato para produzir em alto volume, alta confiabilidade, baixa manutenção e operacional em ambientes hostis. Assim, proporcionam flexibilidade para qualquer projeto que utilize esses dispositivos.

Giroscópios MEMS são dispositivos não rotatórios e são usados sempre que a detecção de taxa de giro ($^{\circ}/s$) é necessária sem um ponto de referência fixo. O princípio físico de um giroscópio MEMS é que um objeto vibrando tende a continuar vibrando no plano original conforme seu suporte gira. Portanto, esses sensores detectam a força que atua sobre uma

massa que está sujeita a um movimento vibratório linear que está girando em torno de um eixo perpendicular (PUPO, L.B., 2016). Este dispositivo também é conhecido como Giroscópio Vibratório Coriolis, pois o plano de vibração é girado (ZHI, R., 2016). Um micrograma de um giroscópio MEMS é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Design de giroscópios MEMS



Fonte: ZHI, R. (2016)

Conforme ZHI, R. (2016), o giroscópio MEMS tem um problema de deriva na integração para pequenos erros, nas medições eles são radicalmente amplificados pela integração ao longo do tempo. Além disso, giroscópios MEMS são sensíveis a mudanças na temperatura, o que ocasiona desvios com alterações lentas. Portanto, a medição de um giroscópio MEMS pode ser modelada, de acordo com ZHI, R. (2016), conforme a Equação 2:

$$\Omega_g^b(t) = \Omega(t) + s_g(t) + n_g(t), \quad (2)$$

onde $\Omega_g^b(t)$ é a leitura do giroscópio na estrutura do sensor, $\Omega(t)$ é a velocidade angular real, $s_g(t)$ e $n_g(t)$ representam a polarização do giroscópio e o ruído de alta frequência em giroscópio, respectivamente.

Os giroscópios MEMs podem ser classificados como vigas vibratórias, diapasão, vibração, conchas e placas vibratórias. O princípio de funcionamento é o mesmo para todos (PUPO, L.B., 2016).

2.2 RUÍDOS E ANÁLISES

2.2.1 Deriva (*Bias Instability*)

A deriva pode ser definida como o desvio ou deriva que o sensor tem de seu valor médio da taxa de saída durante um tempo especificado medido em condições de operação específicas,

que não tem correlação com a rotação do sensor. Essencialmente, conforme KHAN, J. (2018), a medição informa o quão estável é a polarização de um giroscópio ao longo de um determinado período de tempo. KESHNER, M.S. (1982) indica que a principal origem deste tipo de ruído é na parte eletrônica, porém componentes suscetíveis a oscilações também podem originar este ruído.

Esse tipo de ruído tem características de baixa frequência que no sinal amostrado aparecem como flutuações lentas nos níveis medidos. A baixa instabilidade é vantajosa, tendo em vista, que resulta em um giroscópio produzindo menos desvios da taxa média. Principalmente levando em consideração que muito ruído no giroscópio resulta em perda de precisão da aplicação e exatidão na medição da taxa.

Além disso, existem duas características usadas para descrever a polarização do sensor: assimetria de polarização, que é a diferença entre polarização para entradas positivas e negativas; e a instabilidade da tendência, que é a variação aleatória da tendência calculada ao longo de uma amostra finita de tempo (PUPO, L.B., 2016).

Conforme IEEE Std 952-1997 (1997), a taxa PSD associada ao *bias instability*, também conhecido como ruído $\frac{1}{f}$, é

$$S_{(\Omega)}(f) = \begin{cases} \left(\frac{R^2}{2\pi}\right)\frac{1}{f}, & f \leq f_0 \\ 0, & f > 0 \end{cases} \quad (3)$$

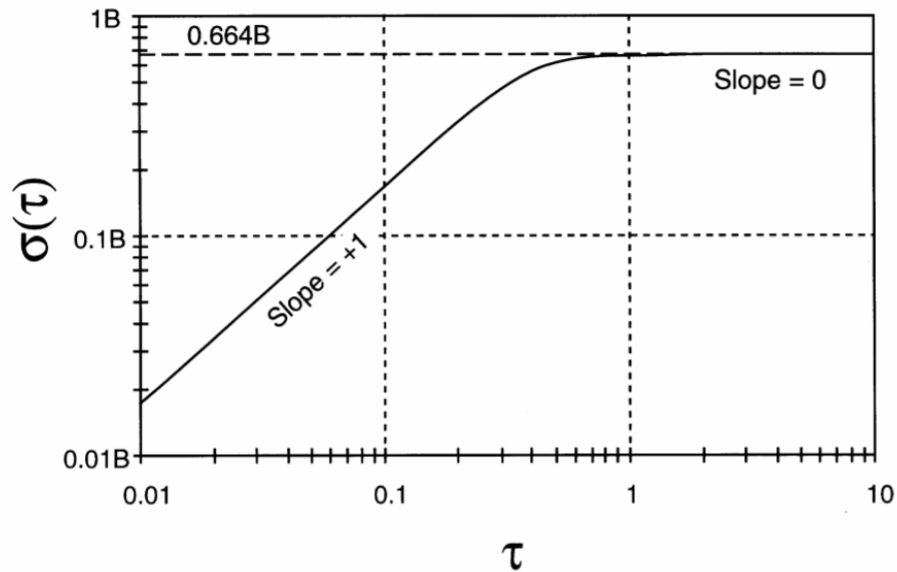
Sendo f_0 a frequência de corte e $S_{(\Omega)}(f)$ a taxa de densidade espectral em relação ao *bias instability*. O coeficiente de Deriva é calculado encontrando um valor mínimo na curva da Variância de Allan, momento de curvatura zero. O coeficiente pode ser calculado pela Equação 4 e é expresso em graus por hora [$^{\circ}/h$] ou radianos por segundo [rad/s] para giroscópios.

$$B(^{\circ}/h) = \frac{\sigma(\tau)}{0.662}, \quad (4)$$

em que B é o coeficiente de deriva e um τ em que $\sigma(\tau)$ tem inclinação nula. Portanto, aplicando a taxa PSD associada na Equação 23.

$$\sigma(t) \rightarrow \sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}} B \cong 0.664B \quad \text{para } T \gg \frac{1}{f_0} \quad (5)$$

A Figura 6 representa um gráfico log-log da Equação 5. Percebe-se que a A_{VAR} começa com uma inclinação de +1 para $f_0 \ll \frac{1}{T}$ e atinge o valor assintótico de 0,664B. Assim, a região plana do gráfico pode ser examinada para estimar o limite da instabilidade de polarização.

Figura 6 – Gráfico para instabilidade de polarização (para $f_0 = 1$)

Fonte: IEEE Std 952-1997 (1997)

Em aplicações de navegação, *bias instability* é um parâmetro de desempenho crítico, pois a taxa de saída do giroscópio é constantemente integrada matematicamente. Conseqüentemente, o erro é cumulativo ao longo do tempo de missão. Segundo KHAN, J. (2018), o ruído de polarização não se integra a zero, tornando o *bias instability* um grande contribuinte de erros em sistemas de orientação autônomos.

2.2.2 Angle Random Walk

No caso de sensores de taxa angular que medem a taxa de rotação sobre seu eixo sensível, que tem seu sinal de saída perturbado por um tipo de ruído termomecânico flutuante em uma taxa maior que a taxa de amostragem do sensor, este ruído se chama *Angle Random Walk* (PUPO, L.B., 2016).

O *Angle Random Walk* (ARW) é uma especificação de ruído, em unidade $^{\circ}/\sqrt{h}$, para giroscópios, que é diretamente aplicável a cálculos de ângulos. Conseqüentemente, as amostras obtidas são perturbadas por um ruído branco na saída da taxa do giroscópio, que é uma sequência de variáveis aleatórias não correlacionadas e média zero. O ARW descreve o desvio médio ou o erro que ocorre quando o sinal for integrado. Este erro aumenta com o tempo de integração e fornece uma limitação fundamental para qualquer medição de ângulo e velocidade com base apenas na integração de um sinal de variação de rotação, portanto este erro está profundamente atrelado à largura do ruído no sinal (STOCKWELL, W., 2000).

A principal fonte desse ruído é a emissão espontânea de fótons na saída da fonte, neste caso chama-se limite quântico. Outros termos de ruídos de alta frequência que possuem tempo de correlação muito menos do que o tempo de amostra, também podem contribuir para o *angle random walk* no giroscópio. No entanto, a maioria dessas fontes pode ser eliminada no projeto

de circuito eletrônico (IEEE STD 952-1997, 1997). De acordo com LAWRENCE, C. (1997), se o *angle random walk* não for modelado com precisão, pode ser uma grande fonte de erro que limita o desempenho de um sistema de controle de altitude.

Geralmente, os fabricantes citam especificações de ruídos de diferentes maneiras, podendo ser por ARW, PSD ou FFT e com uma ou três variações σ no sensor de saída. Os parâmetros são estabelecidos no (IEEE STD 952-1997, 1997), como:

$$ARW(^{\circ}/\sqrt{h}) = \frac{1}{60} \sqrt{PSD[(^{\circ}/h)^2/Hz]} \quad (6)$$

$$ARW(^{\circ}/\sqrt{h}) = \frac{1}{60} FFT(^{\circ}/h/\sqrt{Hz}) \quad (7)$$

$$ARW(^{\circ}/\sqrt{h}) = \frac{1}{60} \sigma(^{\circ}/h) \frac{1}{\sqrt{BW(Hz)}} \quad (8)$$

Onde σ é o desvio padrão do sinal e BW é a largura de banda efetiva do sensor em Hz. A taxa de ruído PSD ($S_{\Omega}(f)$) associado é representada por (IEEE STD 952-1997, 1997):

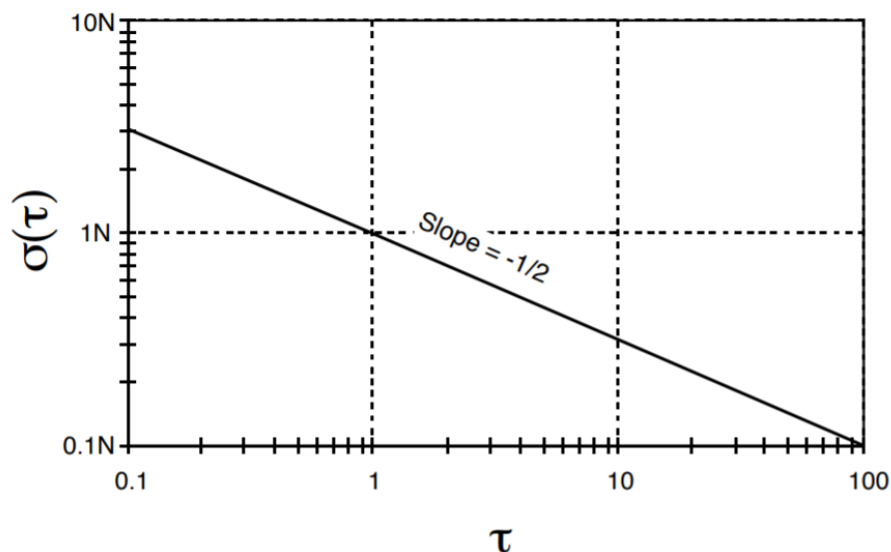
$$S_{\Omega}(f) = N^2 \quad (9)$$

Em que N é o coeficiente do *Angle Random Walk* (velocidade) . Substituindo a Equação 10 na Equação 23 e realizando a integração, obtemos:

$$\sigma^2(\tau) = \frac{N^2}{\tau} \quad (10)$$

Conforme a Figura 7, a Equação acima indica um gráfico log-log de $\sigma(\tau)$ versus τ com inclinação de $-\frac{1}{2}$. como evidenciado na Figura 10. O valor numérico de N pode ser obtido diretamente pela reta $\tau = 1$.

Figura 7 – Gráfico para *angle random walk*



Fonte:IEEE Std 952-1997 (1997)

Um exemplo típico do uso da estatística do ARW para descrever uma situação onde a saída de um sistema é produzido de forma aleatória seria o lançamento de uma moeda. O efeito do ARW é observado se integrarmos o resultado de múltiplos lançamentos onde se somaria 1, caso o lançamento resulte cara, e subtrairia 1, caso o lançamento resulte em coroa. Inconscientemente pensaríamos que o resultado da integração após 1000 lançamentos seja próximo de zero, porém estatisticamente é possível ocorrer que todos os lançamentos resultem em cara ou em coroa, forçando o resultado para 1000 ou -1000. Entretanto, esse resultado não é o mais provável (SPENGLER, A. W., 2014).

2.2.3 Ruído Gaussiano Branco

Segundo MARMARELIS, V.Z. (2004), o ruído branco Gaussiano (*Gaussian White Noise* - GWN) é um processo aleatório estacionário e ergódico com média zero, que é definido pela propriedade fundamental de quaisquer dois valores de GWN que são estatisticamente independentes, não sendo importante o quão próximos estão no tempo, com variância infinita. Logo, um ruído branco é um processo que está variando com amplitude infinita, infinitamente rápido (LAGES, W.F., 2004).

Segundo MARMARELIS, V.Z. (2004), a implicação direta da propriedade fundamental é que a função de autocorrelação de um processo GWN, $w(t)$ é zero para deslocamentos diferentes de zero, como pode se observar na Equação 11.

$$\phi_w(\tau) = E[w(t)w(t - \tau)] = E[w(t)]E[w(t - \tau)] = 0, \quad (11)$$

onde $\phi_w(\tau)$ representa a função de autocorrelação e $E[...]$ é o operador estatístico de valor esperado. A função de autocorrelação do GWN é definida por meio da função delta de Dirac como:

$$R_{wn}(\tau) = A\delta(t), \quad (12)$$

em processamento de sinal, o ruído é um sinal aleatório com igual intensidade em uma faixa limitada de frequências e zero fora desta faixa, o que lhe ocasiona em um PSD constante. Assim, tem-se o espectro de potência GWN através da transformada de Fourier de sua função de autocorrelação (LAGES, W.F., 2004):

$$S_{wn}(j\omega) = A \quad (13)$$

Em que A é um escalar positivo denominado “nível de potência” de GWN. Se a faixa de frequência inclui a origem, tem -se

$$S_{bwn}(j\omega) = \begin{cases} A, & |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (14)$$

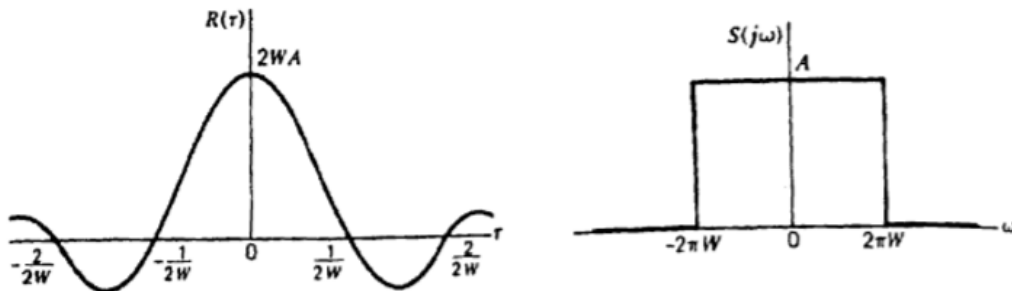
onde ω_c é a largura de banda. A função de autocorrelação correspondente é

$$R_{bwn}(\tau) = \frac{A\omega_c}{\pi} \frac{\sin(\omega_c\tau)}{\omega_c\tau} \quad (15)$$

Não estar correlacionado no tempo não restringe os valores que um sinal pode ter. Portanto, qualquer distribuição de valores é possível, desde que tenha uma distribuição contínua. O ruído que tem uma distribuição contínua, tal como a distribuição normal, pode ser naturalmente branco. Essa caracterização tem analogia à luz branca que contém todos os comprimentos de onda (visíveis) com a mesma potência. Para comprimentos mais altos, conforme previsto pela teoria quântica, a amplitude do ruído decresce. O adjetivo adicional “Gaussiano” indica que a distribuição de amplitude de sinal é Gaussiana, como as etapas independentes do movimento browniano (MARMARELIS, V.Z., 2004).

Gráficos com exemplo de autocorrelação e da função de densidade espectral estão esboçados na Figura 8. Neste caso, o ruído branco de banda básica limitado em frequência é zero para $\tau = \pi/\omega_c, 2\pi/\omega_c, 3\pi/\omega_c\dots$. Se o processo é amostrado com uma taxa de $2\omega_c$, ele se descorrelaciona (LAGES, W.F., 2004).

Figura 8 – Funções de Autocorrelação e Densidade Espectral para um Ruído Branco



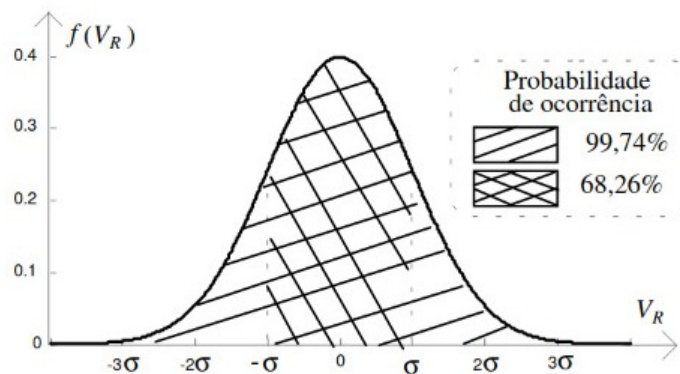
Fonte: LAGES, W.F. (2004)

Se os sinais de ruído são sinais de tensão V_R , significa que a distribuição desses sinais é dada pela Função Densidade de Probabilidade $f(V_R)$ vista na Equação 16.

$$f(V_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{V_R^2}{2\sigma^2}} \quad (16)$$

O gráfico contendo a curva referente ao Ruído Branco Gaussiano pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – A curva gaussiana



Fonte: NOCETI FILHO (2002)

Observa-se uma concentração das probabilidades maiores conforme a função se aproxima do centro (valor zero) e os valores são simétricos, gerando assim um valor médio nulo.

2.2.4 Variância de Allan

ALLAN, D. (1966) propôs uma técnica de análise de variância no domínio do tempo para o estudo de estabilidade de relógios atômicos e osciladores, conhecido como Variância de Allan (A_{VAR}). O estudo da técnica ocorreu após a observação que o ruído de fase não consistia apenas de um ruído branco, mas também de outras componentes, resultando em análises incoerentes (SPENGLER, A. W., 2014). A capacidade de analisar e quantizar outros ruídos, além do ruído gaussiano branco, caracteriza-se como o diferencial da variância em comparação com outras técnicas.

Esse método foi amplamente adotado para caracterização de instabilidade de fase e frequência de osciladores de precisão, tendo em vista que, permite expressar a estabilidade no domínio do tempo da fonte de frequência. Devido a analogias com sensores inerciais, a técnica foi adaptada para deriva aleatória (IEEE STD 952-1997, 1997). Em 1998, o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), em razão da sua capacidade de analisar separadamente cada fonte de ruído, introduziu a Variância de Allan como um método de identificação de ruído para análise de acelerômetro linear, único e não giroscópico (IEEE STD 1139-1999, 1999). Em 2003, HOU, H. (2003) aplicou o método pela primeira vez em Micro Identificação de Ruído do Sensor Mecânico Elétrico (MEMS).

A análise de A_{VAR} é uma ferramenta muito eficaz que ajuda a investigar as características dos ruídos na observação GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) para aplicações de posicionamento preciso (KAMIL, M., 2020). Levando em consideração a possibilidade de analisar cada fonte de ruído separadamente, a A_{VAR} pode ser aplicada como único método para analisar os dados ou como complemento para ferramentas de análise no domínio da frequência. Dentro dos padrões da IEEE, são cinco tipos de ruídos relativos aos giroscópios que são analisados aplicando a A_{VAR} , sendo esses: *quantization noise*, *angle random walk*, *bias*

instability, *rate random walk* e *rate ramp*, que compõem os ruídos necessários a realização deste estudo.

2.2.4.1 Definição matemática

A A_{VAR} é baseada no método de análise por agrupamento. Considera-se N o número de amostras consecutivas oriundas do giroscópio com um tempo de amostragem τ_0 . Em seguida, formam-se agrupamentos de pontos com tamanhos $\tau_0, 2\tau_0, \dots, k\tau_0$, em que $k < N/2$, onde para cada agrupamento obtêm-se as médias aritméticas dos pontos contidos, como apresentado na Equação 17 (HOU, H., 2003).

$$\bar{\Omega}_k(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_{k+T}} \Omega(t) dt \quad (17)$$

Tendo $\bar{\Omega}_k(t)$ representa a média do agrupamento da taxa de saída para um agrupamento que começa no ponto k^{th} e contém n pontos de dados. A definição da média do agrupamento subsequente $\bar{\Omega}_{next}(T)$ é determinada por:

$$\bar{\Omega}_{next}(T) = \frac{1}{T} \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+T} \Omega(t) dt \quad (18)$$

Com $t_{k+1} = t_k + T$. Realizando a operação média para cada dois agrupamentos adjacentes:

$$\xi_{k+1,k} = \bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T) \quad (19)$$

Assim, conforme HOU, H. (2003), para cada tempo de agrupamento T , a média de dois agrupamentos adjacentes (ξ) forma um conjunto de variáveis aleatórias.

Portanto, a A_{VAR} em função do tamanho T é definida pela Equação 20 (IEEE STD 952-1997, 1997).

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2} \langle [\bar{\Omega}_{next}(T) - \bar{\Omega}_k(T)]^2 \rangle \quad (20)$$

Sendo $\sigma^2(T)$ a Variância de Allan para a diferença das médias dos agrupamentos. Na Equação 20 o operador $\langle \rangle$ indica uma média infinita no tempo.

A variância de Allan (θ) também pode ser definida em termos de ângulo de saída ou velocidade:

$$\theta(t) = \int^t \Omega(t) dt \quad (21)$$

Segundo HOU, H. (2003), o limite de integração inferior não é especificado, pois apenas diferenças de ângulo e velocidade são empregadas nas definições. Assim, a Equação de média dos agrupamentos pode ser rearranjada pela Equação 22.

$$\bar{\Omega}_k(T) = \frac{\theta_{k+n} - \theta_k}{T} \quad (22)$$

A A_{VAR} pode também ser estabelecida relacionando com a densidade espectral de potência do processo aleatório intrínsecos (PSD - power spectral density) utilizando os mesmos pontos experimentais, como pode ser vista na Equação 23, como descrito por SPENGLER, A. W. (2014) .

$$\sigma^2(\tau) = 4 \int_0^{\infty} S_{\Omega}(f) \frac{\sin^4(\pi ft)}{(\pi ft)^2} df \quad (23)$$

Em que $S_{\Omega}(f)$ é a relação entre a A_{VAR} e a densidade espectral.

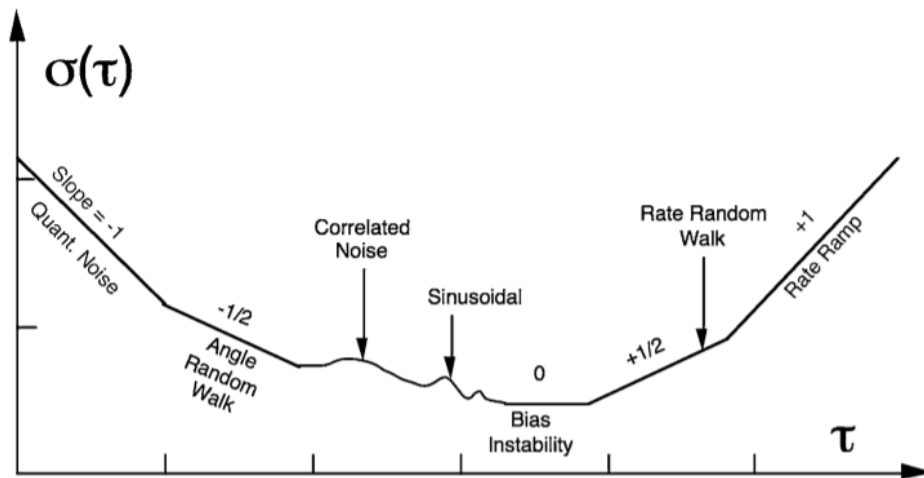
Estimar a precisão da A_{VAR} para um dado T, depende do número de agrupamentos independentes dentro do conjunto de dados (IEEE STD 952-1997, 1997). De acordo com PUPO, L.B. (2016), a precisão aumenta com o número de agrupamentos, em que σ é o erro percentual e k o número de agrupamentos .

$$\sigma(\%error) = \frac{100}{\sqrt{2(k-1)}} \quad (24)$$

Esta Equação pode ser usada para projetar um teste para observar um ruído particular com certas características para determinada precisão (IEEE STD 952-1997, 1997).

A Figura 10 demonstra um gráfico de A_{VAR} típico, as regiões que predominam os ruídos são caracterizadas pelas inclinações. Assim, diferentes termos de ruído aparecem em diferentes regiões para cada tamanho T de agrupamentos, permitindo fácil identificação dos vários processos aleatórios que existem nos dados.

Figura 10 – Gráfico de amostra dos resultados da análise da Variância de Allan



Fonte: IEEE Std 952-1997 (1997)

Na imagem apresentada, nota-se quatro regiões principais relacionadas aos cinco ruídos relativos aos giroscópios. O *quantization noise* predomina na região em que a inclinação corresponde a -1, o *angle random walk* prevalece na região com inclinação -1/2, o *bias instability* é caracterizado por uma região sem inclinação, o *rate random walk* predomina na região com inclinação +1/2 e o *rate ramp* na região com inclinação +1. Para quantizar o ARW, extrapola-se sua curva até o tempo de 1 hora SPENGLER, A. W. (2014) e a magnitude do ruído é dado pelo valor de y nesse ponto.

3 METODOLOGIA

A abordagem para as próximas sessões desde capítulo apresentam os materiais e métodos utilizados para cumprir os objetivos citados anteriormente. Além disso, será descrita a sequência de etapas necessária para projetar o sistema proposto.

3.1 SELEÇÃO DAS IMU

As IMU utilizadas foram selecionadas de acordo com os modelos disponíveis no laboratório de Integração de Software e Hardware (LISHA) (LISHA, 1992) do campus Joinville. Todas as IMU utilizadas neste trabalho são de baixo custo e possuem baixa acurácia e precisão se comparada com as IMU *high-end*, sendo assim, um caso ideal para validar o modelo que será utilizado futuramente para essa classe de IMU.

As IMU utilizadas são as seguintes:

- BNO055, com 9 eixos sensoreados (giroscópio, acelerômetro e magnetômetro) (BOSCH, 2020);
- MPU9250, com 9 eixos sensoreados (giroscópio, acelerômetro e magnetômetro);
- SCC2130, com um giroscópio apenas para o eixo x.

Os valores dos principais ruídos para os giroscópios de cada IMU, que possuem seus valores publicados em seus respectivos *datasheet*, podem ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação dos principais ruídos dos giroscópios utilizados no trabalho

IMU	PSD	Deriva fixa	Deriva dinâmica
SCC2130	$0.005 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$	$\pm 1^{\circ}/s$	$0.008 \frac{^{\circ}/s}{K}$
BNO055	$0.014 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$	$\pm 3^{\circ}/s$	$0.015 \frac{^{\circ}/s}{K}$
MPU9250	$0.01 \frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$	$\pm 5^{\circ}/s$	$0.05 \frac{^{\circ}/s}{K}$

Fonte: Autor (2021).

O ARW está na verdade sendo informado em Densidade espectral de ruído ou Densidade espectral de potência (Power Spectral Density - PSD). Nota-se que o giroscópio com os menores valores de ruídos é o SCC2130, enquanto o BNO055 possui apenas o ARW maior do que o MPU9250. Isso se reflete no preço, enquanto o SCC2130 é o mais caro da lista e mesmo assim possui medição angular apenas no eixo x, o MPU é bem mais barato e possui medição em todos os três eixos angulares.

3.2 MODELO MATEMÁTICO DO GIROSCÓPIO

Com o intuito de simular o sistema, é necessário quantificar os ruídos presentes nos modelos dos giroscópios escolhidos e caracterizá-los de forma matemática. Essencialmente, o giroscópio irá medir uma velocidade angular ω_g que é composta da real velocidade angular ω somado com os ruídos atrelados.

De acordo com Carrara, Pereira e Azevedo (2019), os ruídos podem ser divididos em três: uma deriva fixa, representado por β_g , uma deriva dinâmica variável com o tempo e a temperatura, representado por b_g , e um ruído gaussiano branco, representado por η_g . O modelo matemático característico do giroscópio é dado pela Equação 25.

$$\omega_g = \omega + \beta_g + b_g + \eta_g \quad (25)$$

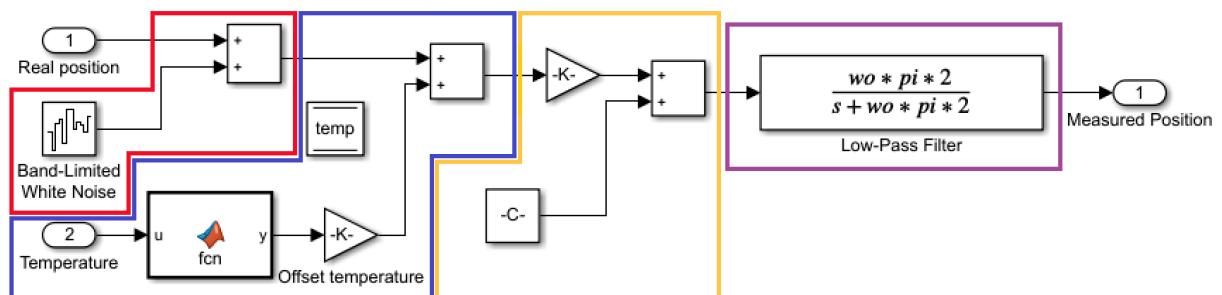
O ruído gaussiano branco, η_g , é um sinal com um desvio padrão definido como σ_η . Já a deriva dinâmica é uma variável randômica gaussiana com média zero e desvio padrão σ_b .

3.3 MODELO GENÉRICO PARA UM EIXO DO GIROSCÓPIO NO *SIMULINK*

O próximo passo a fim de simular os giroscópios é desenvolver um modelo no software *MATLAB*. Para isso, foi utilizado a ferramenta *Simulink* para implementar um diagrama de blocos que represente a caracterização matemática encontrada anteriormente.

Para representar o modelo matemático, alguns blocos previamente disponíveis no *Simulink* foram utilizados de forma a somar os ruídos ao ângulo real. O modelo de um eixo para um giroscópio genérico pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Modelo de blocos implementado no Simulink



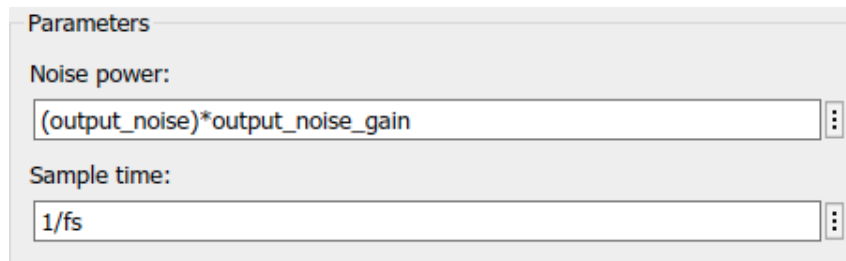
Fonte: Autor (2021).

Primeiramente, foram definidos a entrada e a saída do sistema. Para a entrada, chamada de *Real Position*, foi atribuído um valor vindo de fora do encapsulamento e a saída, por sua vez, chamada de *Measured Position*, se dará por um vetor contendo os valores ao longo do tempo e será trabalhado futuramente na análise dos ruídos.

O restante do diagrama de blocos foi dividido em quatro partes, evidenciadas com cores diferentes na Figura 11.

Em vermelho, um bloco gerador de ruído branco está conectado a um somador, juntamente da entrada do sinal. Essa parte do diagrama é responsável por gerar o ruído η_g e é possível visualizar sua janela de configuração na Figura 12.

Figura 12 – Parâmetros do bloco de ruído branco



Fonte: Autor (2021).

Os valores das variáveis são parametrizados nesse e em todos os outros blocos através de uma máscara do conjunto de blocos que encapsula todo o modelo genérico, sendo assim possível utilizar o mesmo modelo para os diferentes giroscópios. O *Noise power* é o valor representado por σ_η e pode ser encontrado nos *datasheets* dos giroscópios como valor de *Angle Random Walk*. Esse valor é passado como *output_noise* e é então multiplicado por outra variável chamada de *output_noise_gain* e o mesmo acontece para o parâmetro *Sample time*, chamado de *fs*. O *output_noise_gain* foi inserido para uma possível correção nos valores do modelo sem alterar os valores dos ruídos lidos experimentalmente e isso foi feito de forma semelhante para as outras partes a serem explicadas a seguir.

Já a parte destacada em azul, foi implementado um *script* em um *function block* do *Simulink*. Esse bloco recebe como entrada uma temperatura referente ao respectivo tempo da simulação e seu funcionamento pode ser visto no Algoritmo 1.

Algorithm 1 Pseudocódigo do *function block* do *MATLAB*

```

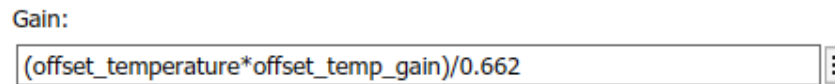
if TemperaturaGlobal = 0 then
    TemperaturaGlobal ← TemperaturaEntrada
    RuídoSaida ← 0
else
    RuídoSaida ← TemperaturaEntrada – TemperaturaGlobal
end if=0

```

Caso a temperatura global seja 0, definida como um valor de inicialização, a temperatura global recebe o primeiro valor da temperatura de entrada e o ruído de saída ainda é nulo. A partir disso, sempre que houver variação na temperatura de entrada, o valor do ruído de saída sofrerá mudança de magnitude positiva caso a temperatura aumente ou negativa caso a temperatura diminua. A interferência do ruído, gerado por esse bloco, passa então por um bloco de ganho com um valor referente ao *Temperature sensitivity*, quantização da deriva dinâmica, informado nos *datasheets* dos giroscópios e inserido na máscara de encapsulamento do *Simulink*. O código em *script* do *MATLAB* referente ao pseudocódigo acima pode ser acessado, junto de todos os

outros códigos implementados para este trabalho, no GitHub (ENGERS, V.D., 2020) e a janela de configuração do bloco de ganho da deriva dinâmica pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Janela de configuração do bloco de ganho da deriva dinâmica

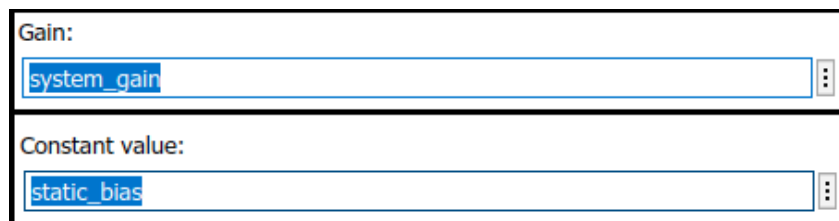


Fonte: Autor (2021).

O bloco de ganho também recebe uma variável referente a um multiplicador do valor de *Temperature sensitivity*, possibilitando ajustes de maneira facilitada. O valor do ruído é então dividido por 0.662 (SPENGLER, A. W., 2014) internamente no bloco para a quantização correta através do gráfico de A_{VAR} .

Seguindo com o destaque em amarelo, observa-se a presença de dois blocos distintos. O primeiro em formato de triângulo é um multiplicador para todo o sistema anterior, também para permitir um melhor ajuste manual do modelo. O segundo é um bloco com valor constante, referente a um valor médio medido na aquisição prática dos giroscópios, referente a uma deriva estática (ou *offset*). É importante notar que essa constante não influencia em nada na análise de variância, mas altera o valor de saída da simulação. A configuração de ambos os blocos - ganho e constante, respectivamente - podem ser vistos na Figura 14.

Figura 14 – Parâmetros dos blocos de ganho do sistema e da deriva estática



Fonte: Autor (2021).

Por fim, no último destaque em verde, foi construído um filtro passa-baixas de primeira ordem, a fim de atenuar o sinal de forma semelhante ao explicitado nos *datasheets* das IMU utilizadas, através de uma função de transferência característica para o seu tipo. A variável w_o é a frequência de corte em *Hz* e é recebida por parâmetro.

Os valores dos ruídos foram parametrizados de forma genérica utilizando a ferramenta *Mask* do *Simulink* e parte da janela de configuração, referente aos parâmetros, pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 – Criação dos parâmetros do eixo genérico de um giroscópio.

	Parameters	ParameterGroupVar
#1	Offset Temperature	offset_temperature
#2	Offset Temperature Gain	offset_temp_gain
#3	Output Noise	output_noise
#4	Output Noise Gain	output_noise_gain
#5	System Gain	system_gain
#6	Static Bias	static_bias
#7	Cut Off Frequency (Hz)	wo
#8	Sample Frequency (Hz)	fs

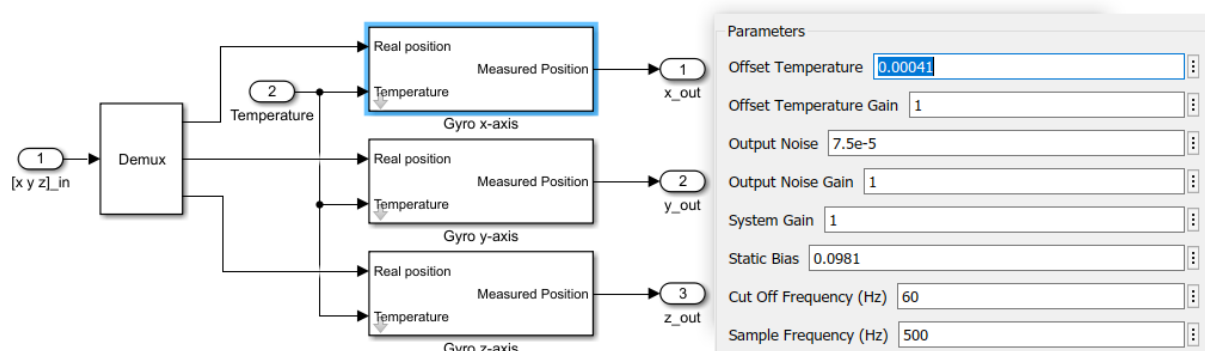
Fonte: Autor (2021).

Feito isso, o sinal foi direcionado para a saída *Measured Position* e será a saída do bloco desse subsistema.

3.4 ASSOCIAÇÃO DE EIXOS NO *SIMULINK* PARA REPRESENTAÇÃO DE CADA MODELO DOS GIROSCÓPIOS

Tendo construído um modelo que representa genericamente o comportamento de um eixo de um giroscópio, foi feito então uma associação desses subsistemas para compor todos os eixos de cada giroscópio utilizado. Para o BNO055 e para o MPU9250 foram construídos três eixos e para o SCC2130 manteve-se apenas um eixo. Na Figura 16, observa-se a associação dos três eixos para criar o BNO055 e a janela de configuração dos parâmetros de seus ruídos (com alguns valores ilustrativos).

Figura 16 – Sistema do *Simulink* referente ao BNO055 utilizando três eixos e a janela de configuração dos parâmetros do eixo x.



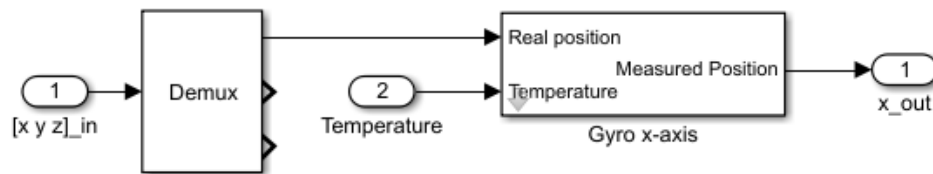
Fonte: Autor (2021).

Como exposto na Seção 3.3, o subsistema do modelo genérico do giroscópio recebe duas entradas, três parâmetros referente aos ruídos e gera uma saída, que representa o ângulo de saída após passar pelos efeitos dos ruídos. As duas entradas são, respectivamente o ângulo real

(vindo do vetor $[x\ y\ z]_{in}$) contendo o valor dos três eixos que passam por um demultiplexador para separação) e a temperatura do ambiente simulado. Os três parâmetros, que são inseridos em cada eixo, são os valores dos ruídos e podem ser observados a direita da Figura 16. O modelo do MPU9250 foi construído de forma semelhante ao do BNO055.

Já para o modelo do SCC2130, que pode ser observado na Figura 17, utilizou-se apenas um subsistema do modelo de giroscópio representando o eixo x, sendo este o único existente.

Figura 17 – Sistema do *Simulink* referente ao SCC2130 utilizando apenas o eixo x.

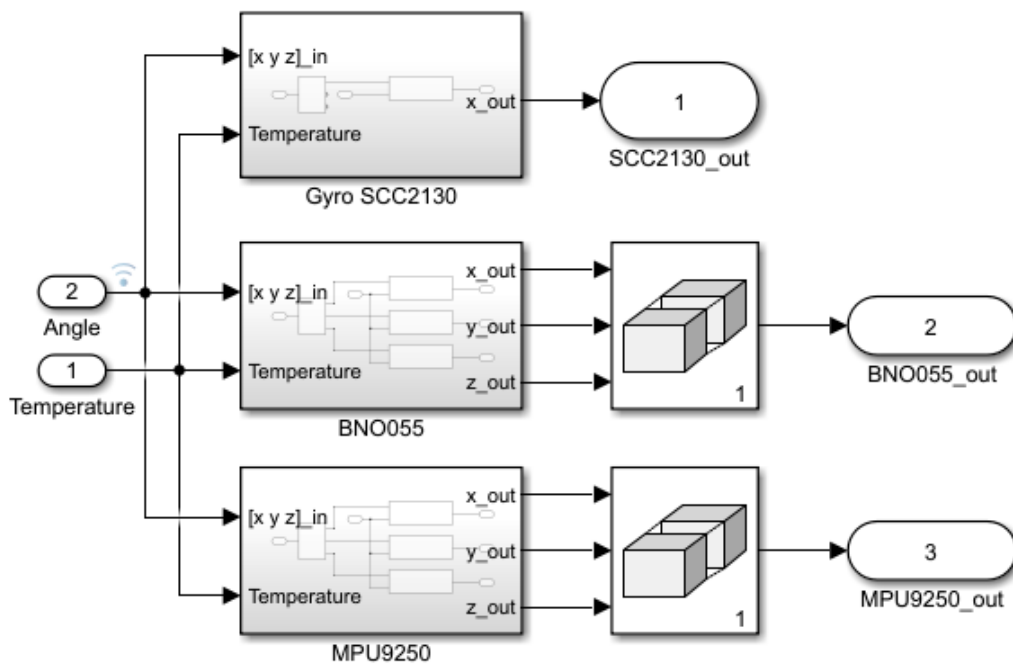


Fonte: Autor (2021).

3.5 ASSOCIAÇÃO DOS MODELOS NO *SIMULINK* REPRESENTANDO OS TRÊS GIROSCÓPIOS

Foram construídos os três modelos referentes aos modelos de giroscópio utilizados para comparação e sua construção pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 – Sistemas com os três giroscópios utilizados.



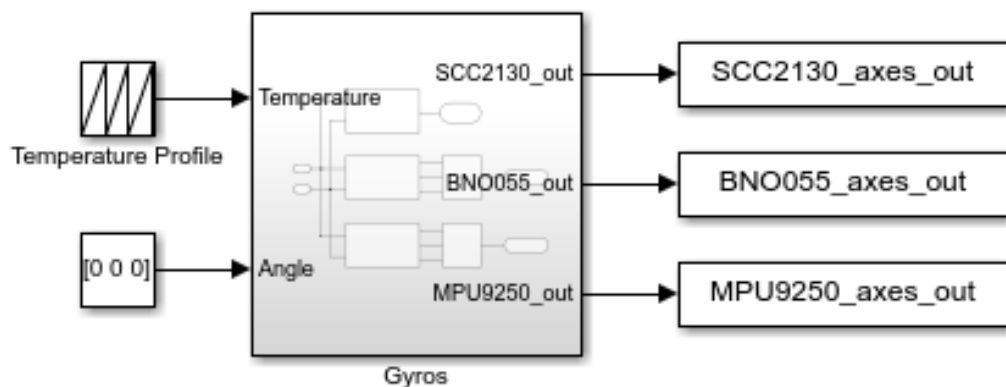
Fonte: Autor (2021).

Na saída do bloco do SCC2130 há apenas a saída do eixo x somado dos ruídos e para o BNO055 e o MPU9250 há três saídas, uma para cada eixo de orientação, e seus valores são concatenados em um vetor de eixos. Após a concatenação cada vetor é direcionado para uma saída desse subsistema.

3.6 CRIAÇÃO DE UM MODELO NO *SIMULINK* SIMULANDO UMA PCB CONTENDO TODOS OS GIROSCÓPIOS

Como todos os giroscópios estão soldados em uma mesma placa de circuito impresso (PCB), eles sofrem efeito de um mesmo movimento angular a ser mensurado e de uma mesma temperatura. Sendo assim, todos os subsistemas de giroscópios precisam receber como entrada o mesmo ângulo e a mesma temperatura. Dessa forma, o sistema na Figura 19 foi construído.

Figura 19 – Sistema representando uma placa definitiva.

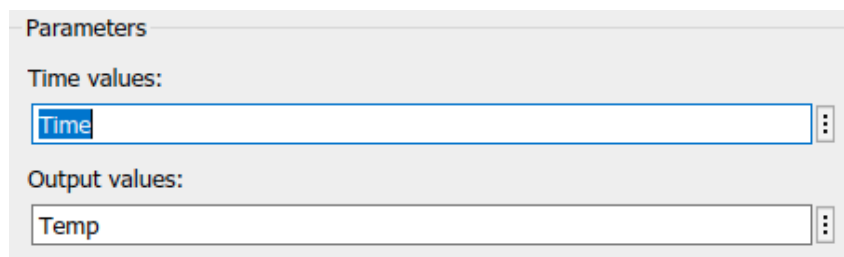


Fonte: Autor (2021).

O bloco do sistema com os três giroscópios recebe duas entradas, sendo, a primeira, um valor de temperatura referente ao tempo de simulação, e, a segunda, um vetor contendo os ângulos de entrada atual para os três eixos.

As configurações do bloco *Temperature Profile* pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 – Janela de parâmetros para o bloco de perfil de temperatura



Fonte: Autor (2021).

Este bloco recebe dois parâmetros para fins de simulação, sendo esses dois vetores, um com os valores de temperatura e outro com os de tempo referente a essas temperaturas. Isso pode

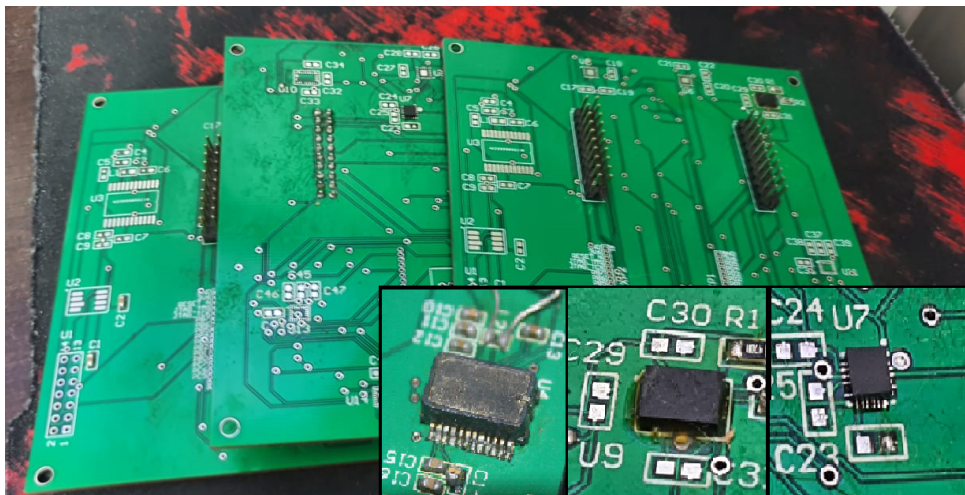
ser usado de duas maneiras: para utilizar algum perfil de temperatura com o intuito de observar o comportamento do sistema em determinado ambiente ou para inserir os valores de temperatura medidos durante a aquisição dos valores do giroscópios na prática e, portanto, adequar o modelo da forma mais fiel possível. O mesmo vale para os valores de ângulo por tempo de entrada no sistema, referentes ao segundo bloco.

Levando em conta os intuítos desse trabalho, serão inseridos valores de temperatura adquiridos empiricamente e zero para todos os eixos, já que para mensurar os ruídos através de A_{VAR} o giroscópio precisa estar em repouso.

3.7 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Com o intuito de validar o comportamento do modelo construído no *Simulink*, as aquisições dos giroscópios selecionados se fizeram necessárias. Para isso, utilizou-se três placas de circuito impresso (PCB) - previamente projetadas pelo LISHA - com os respectivos giroscópios soldados e uma placa da serie TIVA C Series com um microcontrolador TM4C123G da *Texas Instruments* (INSTRUMENTS, T., 2013). Na Figura 21 é possível observar as três placas utilizadas no experimento com seus respectivos giroscópios soldados.

Figura 21 – As três PCB e as IMU utilizadas, sendo elas SCC2130, MPU9250 e BNO055, da esquerda para a direita

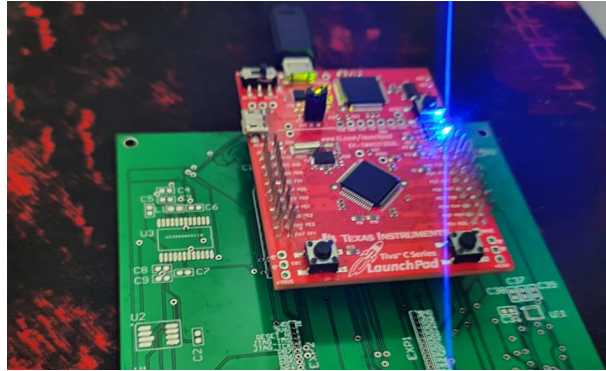


Fonte: Autor (2021).

As aquisições devem ser feitas com a IMU totalmente em repouso, por um tempo suficientemente necessário para a A_{VAR} atingir a deriva e a uma frequência igual ou superior a frequência configurada no giroscópio. Dessa forma, três horas de aquisição a uma frequência de 500 Hz se mostrou o suficiente. Logo, esses parâmetros foram atribuídos aos três giroscópios.

Na Figura 22 é possível visualizar o TIVA acoplado na PCB do giroscópio MPU9250 em repouso enquanto uma aquisição é feita.

Figura 22 – TIVA acoplado na PCB durante uma aquisição



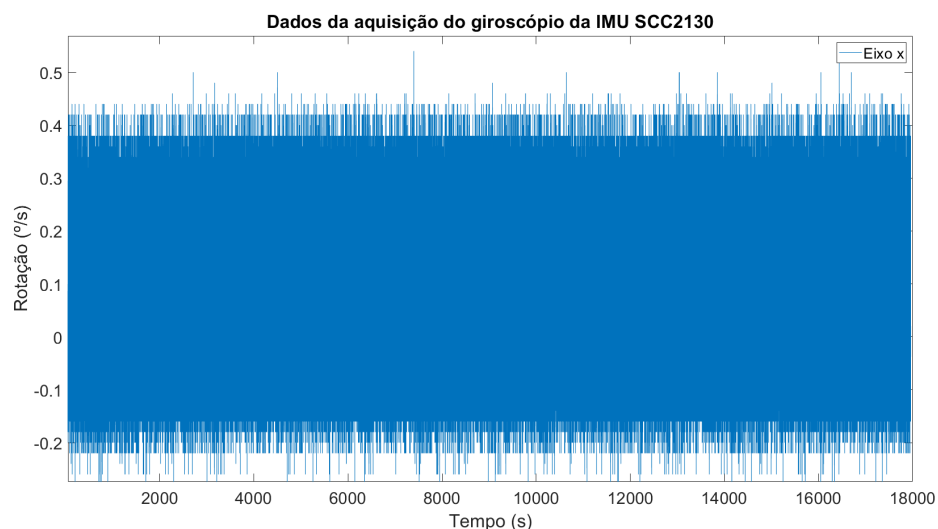
Fonte: Autor (2021).

Para realizar a comunicação, com a SCC2130 e a MPU9250, foi utilizado o protocolo de comunicação SPI, enquanto para o BNO055 utilizou-se o protocolo de comunicação I2C (LEENS, F., 2009). As aquisições aconteceram de forma separada para cada IMU, uma de cada vez, e os dados foram enviados para o computador utilizando comunicação Serial (CODREY, 2018).

3.7.1 SCC2130

Para o giroscópio da IMU SCC2130 houve a aquisição dos dados a uma frequência de 500 Hz e aquisição durou cerca de 18000 segundos. O resultado para o único eixo presente na IMU, o eixo x, pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Dados da aquisição do giroscópio da SCC2130



Fonte: Autor (2021).

A partir dos dados obtidos, observa-se um *offset* nos valores em y em relação a abscissa. O valor médio foi calculado no *MATLAB* através da função *mean*, sendo esse o valor da deriva fixa, e seu resultado pode ser visto na Tabela 2.

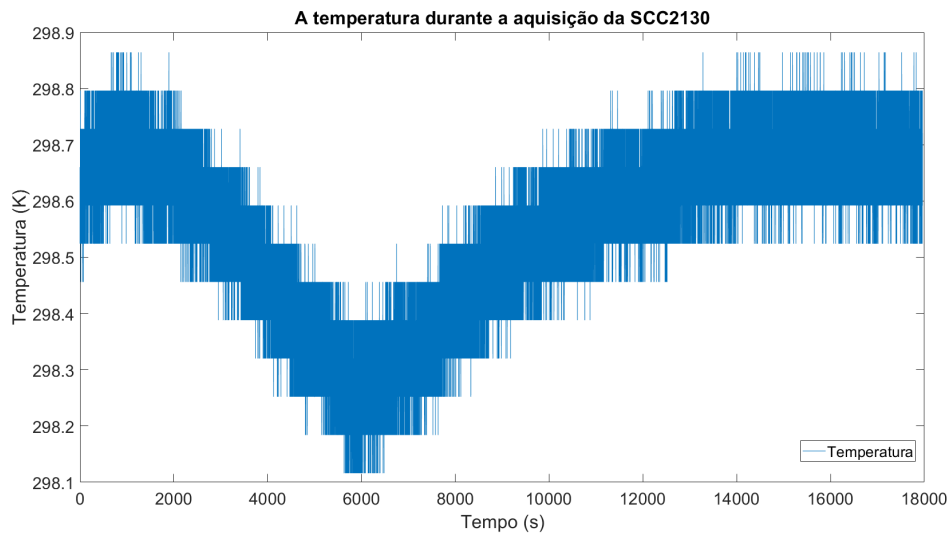
Tabela 2 – Offset para a SCC2130.

Eixo	Deriva Fixa
x	0.0981 °/s

Fonte: Autor (2021).

Isso se deve ao fato de a SCC2130 não ter sido calibrada anteriormente a aquisição dos dados de forma proposital para demonstrar a flexibilidade do modelo e, por ser um valor fixo adicionado no modelo, o *offset* não afeta a A_{VAR} . Ademais, foram obtidos os valores da temperatura da IMU ao longo da aquisição através de um próprio sensor interno e o resultado pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – A temperatura ao longo da aquisição



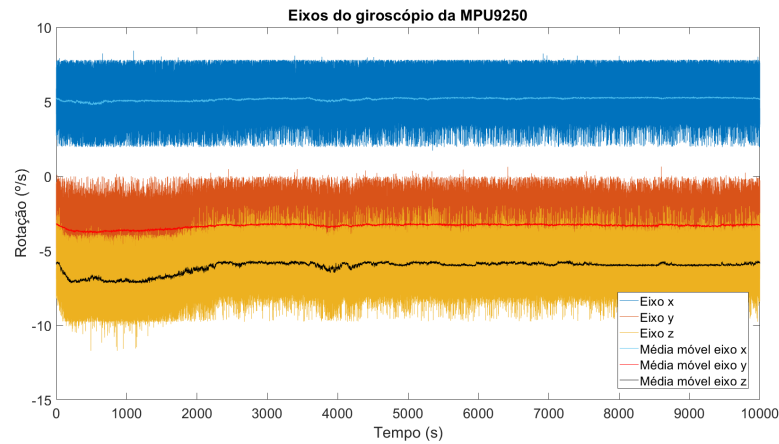
Fonte: Autor (2021).

Nota-se uma variação pequena na temperatura durante a aquisição, sendo que essa variação não passou de 1 K ao longo de todo o experimento. Devido a isso, não se observa distúrbios notavelmente visíveis nos dados da Figura 23. Esses valores de temperatura serão inseridos na entrada de perfil de temperatura do modelo genérico criado para uma comparação entre os dados adquiridos e os dados obtidos na simulação com os ruídos quantizados pela aquisição e pelos ruídos fornecidos em seu respectivo *datasheet* (MURATA, 2014).

3.7.2 MPU9250

Para o giroscópio da IMU MPU9250, também houve uma aquisição dos dados a uma frequência de 500 Hz para manter um padrão com o feito para a SCC2130 e para seguir seu *datasheet* (INVENSENSE, 2015) que recomenda uma aquisição maior do que a frequência de amostragem configurada na IMU. A aquisição durou cerca de 10000 segundos e o resultado para os três eixos pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Dados da aquisição da MPU9250



Fonte: Autor (2021).

A partir dos dados obtidos, observa-se uma diferença no valor médio entre os eixos. Para uma melhor visualização, foi computado, e exposto também na Figura 25, uma média móvel para cada eixo. O valor médio foi calculado no *MATLAB* e seu resultado pode ser visto na Tabela 3.

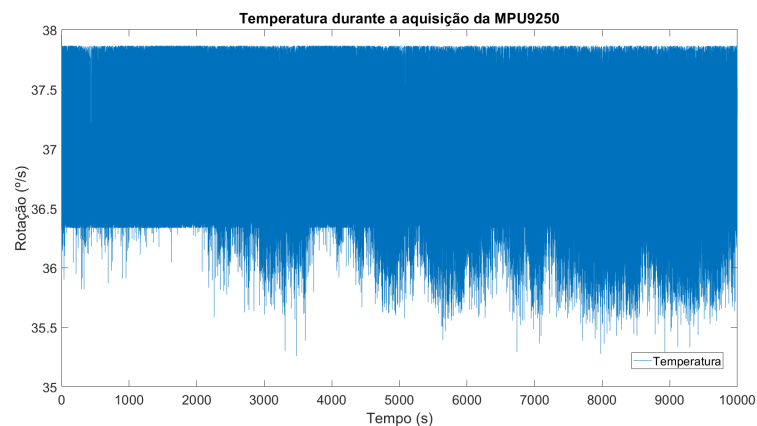
Tabela 3 – Offset para a MPU9250

Eixo	Deriva Fixa
x	5.1740 °/s
y	-3.3396 °/s
z	-6.0934 °/s

Fonte: Autor (2021).

Semelhante a SCC2130, a MPU9250 também não foi calibrada antes da aquisição para testar por completo o modelo criado. A variação da temperatura durante a aquisição pode ser observada na Figura 26.

Figura 26 – Temperatura da MPU9250 durante a aquisição



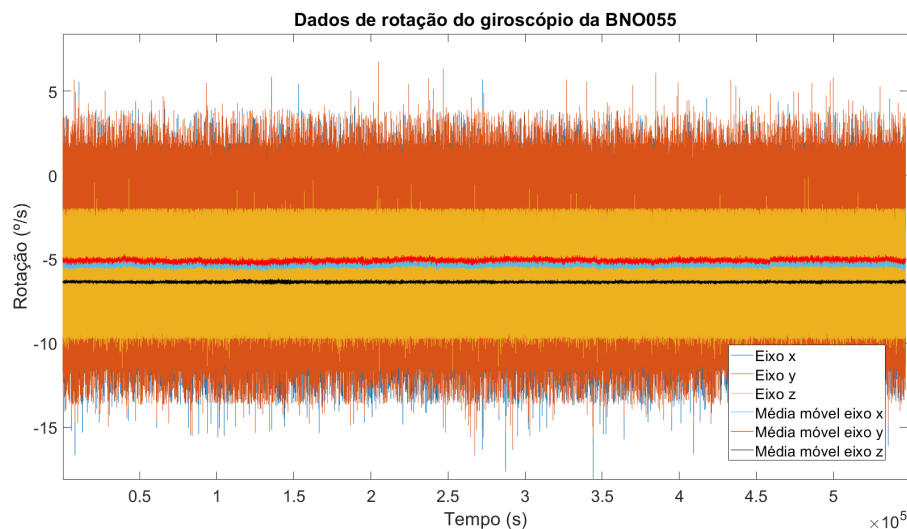
Fonte: Autor (2021).

Nota-se uma variação mais expressiva do que a SCC2130 e um desvio para baixo na temperatura ao decorrer dos primeiros segundos até aproximadamente a metade dos primeiros 1000 segundos, o que reflete claramente nos eixos, principalmente no eixo z expostos na Figura 25. Esses valores de temperatura também serão utilizados para a simulação do modelo para a MPU9250.

3.7.3 BNO055

No experimento com a BNO055, obteve-se os dados do giroscópio a uma frequência de 100 Hz e a aquisição durou aproximadamente 54000 segundos (15 horas). Os dados de rotação para os eixos da BNO055 podem ser vistos na Figura 27.

Figura 27 – Dados da aquisição do giroscópio da BNO055



Fonte: Autor (2021).

Os eixos x e y quase que completamente se sobrepuseram, enquanto o eixo z apresentou valores significativamente menores, porem os comportamentos dos eixos foram bem semelhantes e isso é demonstrado através da média móvel apresentada.

Para esta aquisição, um filtro interno passa-baixas foi configurado a uma frequência de corte de 64 Hz. Os valores médio para cada eixo foram calculados e podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Offset para a BNO055

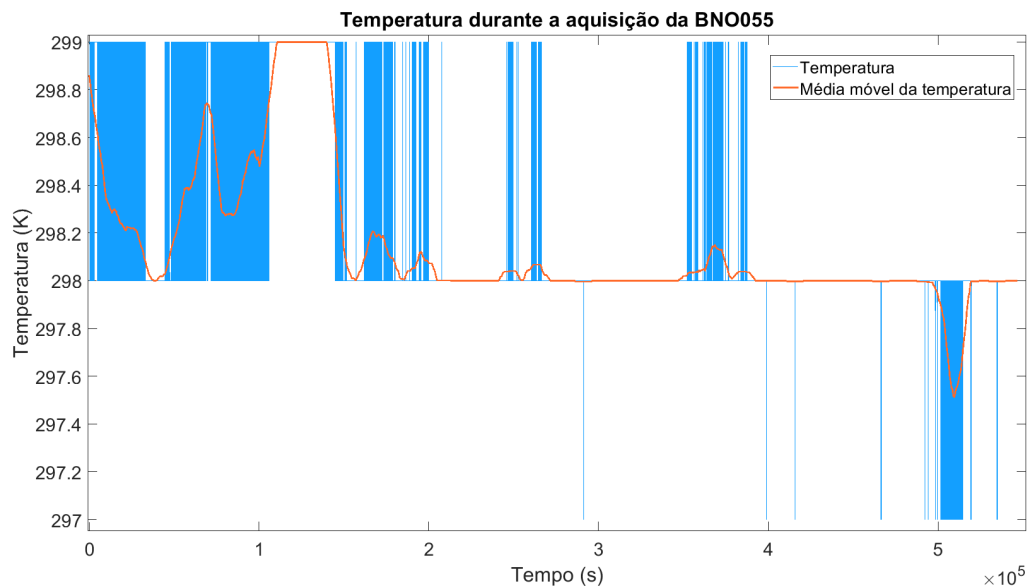
Eixo	Deriva Fixa
x	-5.3726 °/s
y	-5.0823 °/s
z	-6.3640 °/s

Fonte: Autor (2021).

Também foi obtido o valor do sensor interno da IMU durante a aquisição e é aqui

em que a BNO055 se diferencia das outras unidades. A SCC2130 e a MPU9250 entregavam valores de ponto flutuante, enquanto os valores de temperatura fornecidos pelos registradores da BNO055 possuem tamanho de 1 byte, dessa forma o valor lido é um inteiro de 8 bits com sinal e a temperatura sofre bruscas variações de 1° , enquanto na verdade a temperatura interna está variando entre um ponto de arredondamento. A fim de contornar essa diferença, uma média móvel de 100 mil pontos foi calculada para os valores de temperatura. Tanto os valores obtidos para a temperatura quanto a média móvel podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28 – Temperatura do giroscópio da BNO055 durante a aquisição



Fonte: Autor (2021).

A média móvel da temperatura será utilizada como perfil de temperatura para a simulação da BNO055.

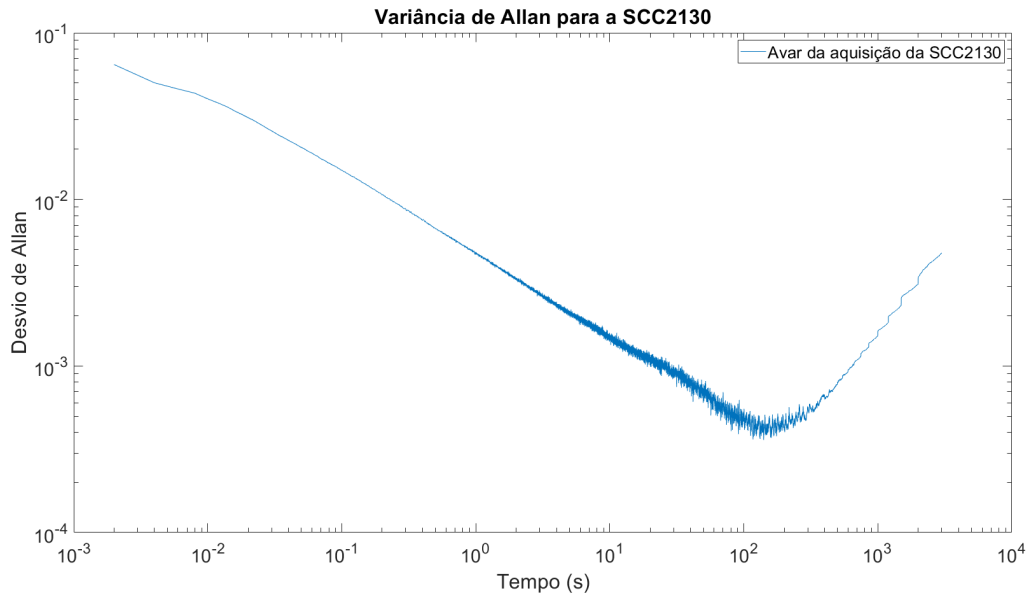
3.8 MEDIÇÃO DOS RUÍDOS ATRAVÉS DA VARIÂNCIA DE ALLAN

Para o cálculo da A_{VAR} , utilizou-se um programa em *Labview* (KODOSKY J., 2020) desenvolvido por Anderson W. Spengler em sua tese de doutorado (SPENGLER, A. W., 2014).

3.8.1 SCC2130

Computou-se a A_{VAR} para os dados da SCC2130 e o resultado obtido pode ser visto na Figura 29.

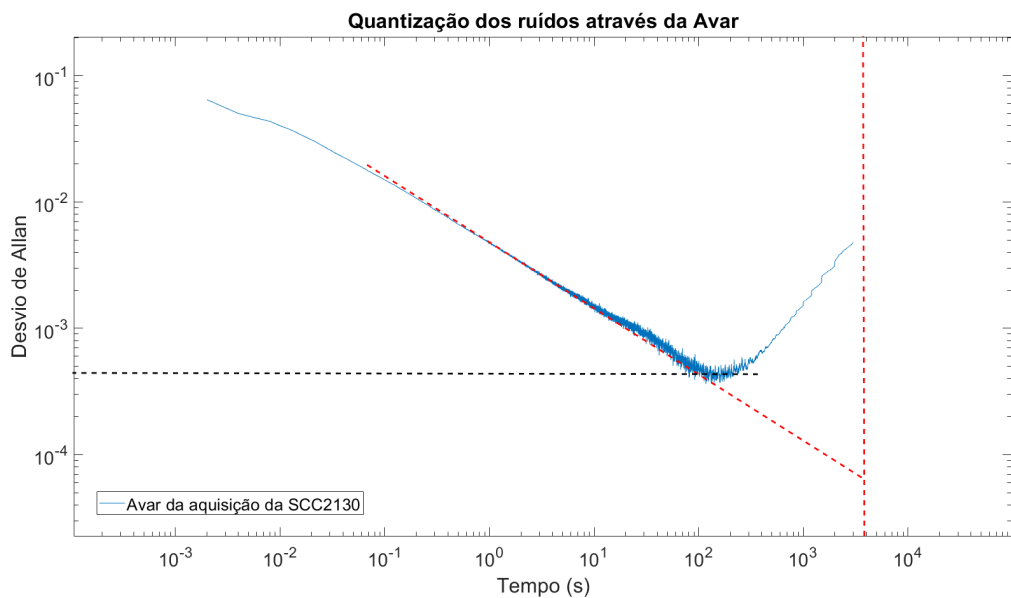
Figura 29 – A_{VAR} para a aquisição da SCC2130



Fonte: Autor (2021).

Algumas curvas foram traçadas a fim de obter os pontos referentes aos ruídos analisados e o resultado pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Quantização dos ruídos através da A_{VAR}



Fonte: Autor (2021).

Para quantizar o ARW, traçou-se uma linha reta na curvatura negativa do A_{VAR} e a extrapolou até uma outra linha reta traçada verticalmente no valor de aproximadamente 1 hora (3600 segundos). Feito isso, o ponto de intersecção dessas duas retas nos dá o valor do ARW. Como o valor de ARW está em função da frequência em Hz, o valor é obtido como PSD.

Por fim, em preto, temos uma reta horizontal com o valor em y aonde a curvatura da

A_{VAR} é zero. Esse valor se refere a deriva dinâmica.

O resultado pode ser visto de forma simplificada na Tabela 5.

Tabela 5 – Ruídos quantizados através do A_{VAR} para a SCC2130

Eixo	PSD (a 500 Hz)	Deriva fixa	Deriva dinâmica
x	$0.000075 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	0.0981°/s	$0.00041 \frac{\text{°/s}}{\text{K}}$

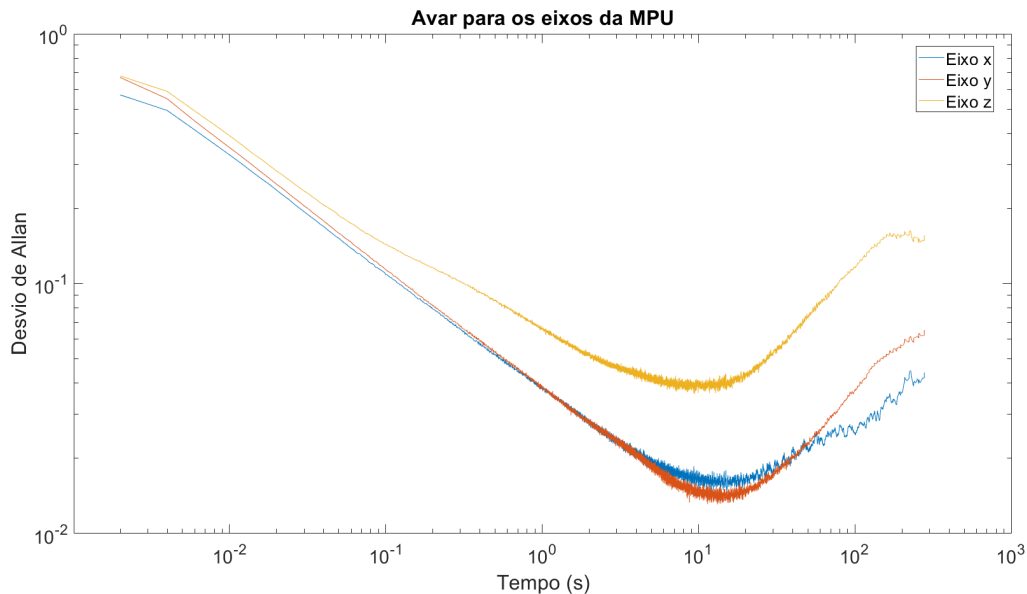
Fonte: Autor (2021).

Agora que todos os valores dos ruídos utilizados no modelos estão quantizados e dispõe-se do perfil de temperatura obtido na aquisição, é possível ajustar os ganhos do modelo para a SCC2130.

3.8.2 MPU9250

O Resultado obtido para a MPU9250 pode ser visto na Figura 31.

Figura 31 – A_{VAR} dos três eixos da MPU9250



Fonte: Autor (2021).

Analisando as A_{VAR} , nota-se uma curva muito parecida entre os eixos x e y, porém o eixo z demonstra um comportamento mais ruidoso. O mesmo procedimento feito anteriormente para a SCC2130, na Figura 30, foi feito para a MPU9250 e os resultados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Ruídos quantizados através da A_{VAR} para a MPU9250

Eixo	PSD (a 500 Hz)	Deriva fixa	Deriva dinâmica
x	$0.00086 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$5.1740^\circ/\text{s}$	$0.0164 \frac{\text{°/s}}{\text{K}}$
y	$0.00080 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$-3.3396^\circ/\text{s}$	$0.015 \frac{\text{°/s}}{\text{K}}$
z	$0.00255 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$-6.0934^\circ/\text{s}$	$0.039 \frac{\text{°/s}}{\text{K}}$

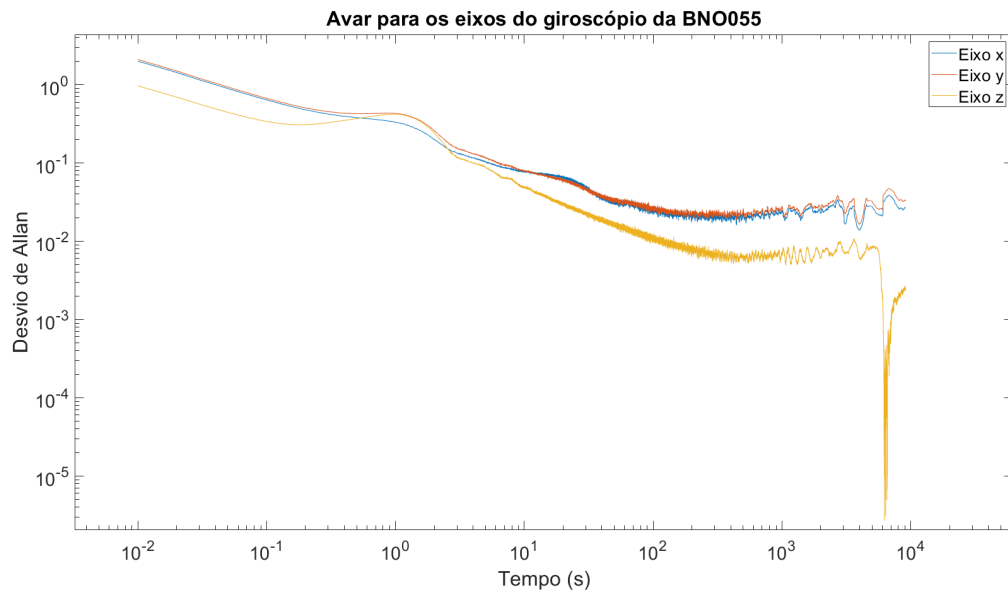
Fonte: Autor (2021).

Com isso, é possível ajustar os ganhos do modelo genérico para a MPU9250.

3.8.3 BNO055

Da mesma forma que foi feito para as outras IMU, foi calculado a A_{VAR} para os eixos do giroscópio da BNO055 e o resultado pode ser visto na Figura 32,

Figura 32 – A_{VAR} dos três eixos da BNO055



Fonte: Autor (2021).

Da mesma forma com que os eixos x e y se mostraram bastante iguais para os dados de rotação, as A_{VAR} de ambos se assemelham bastante. O eixo z, por outro lado, se revelou menos ruidoso em relação aos outros, tanto no ARW quanto na deriva, o que pode ser um reflexo de sua magnitude pico a pico nos dados de rotação.

Algo importante de se notar é o surgimento de um *Correlated Noise* e de um *Sinusoidal Noise*, o que difere bastante a BNO055 da SCC2130 e da MPU9250. Não foi previsto no modelo a simulação desses ruídos e não foi possível explicar a razão de seu surgimento, porém isso pode ocorrer de acordo com a norma IEEE Std 952-1997 (1997).

A partir disso, os ruídos ARW e deriva foram quantizados e expostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Ruídos quantizados através da A_{VAR} para a BNO055

Eixo	PSD (a 500 Hz)	Deriva fixa	Deriva dinâmica
x	$0.0032 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$-5.3726^\circ/s$	$0.02 \frac{\text{°/s}}{K}$
y	$0.0035 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$-5.0823^\circ/s$	$0.0225 \frac{\text{°/s}}{K}$
z	$0.00165 \frac{\text{°/s}}{\sqrt{\text{Hz}}}$	$-6.3640^\circ/s$	$0.0065 \frac{\text{°/s}}{K}$

Fonte: Autor (2021).

Com todos os ruídos quantizados, é possível ajustar o modelo para simular a BNO055.

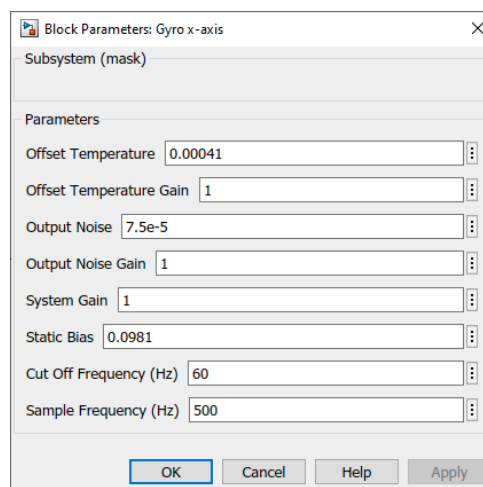
4 RESULTADOS

4.1 AJUSTES FINAIS DOS MODELOS

4.1.1 SCC2130

Os ruídos da Tabela 5 foram inseridos no modelo genérico desenvolvido no Capítulo 3 e a janela de parâmetros do modelo no Simulink pode ser vista na Figura 33.

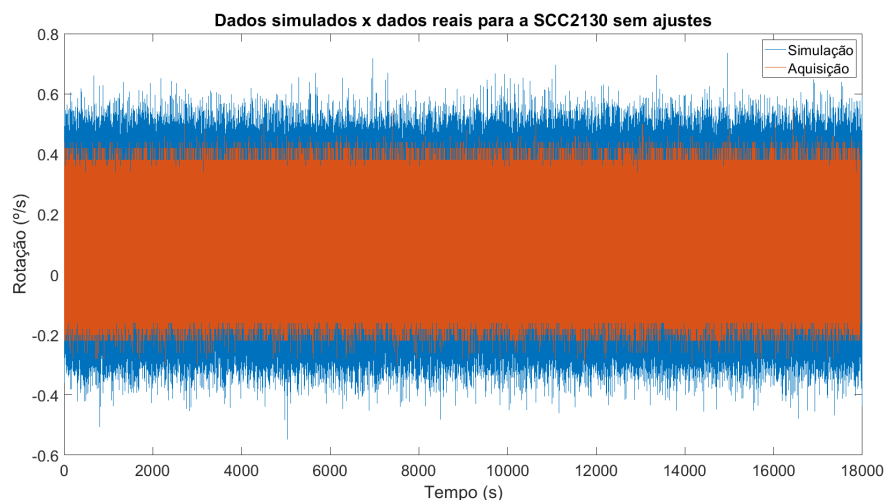
Figura 33 – Janela de parâmetros do modelo para o eixo x da SCC2130



Fonte: Autor (2021).

Sendo 60 Hz a frequência de corte configurada na IMU ao fazer a aquisição. Ao simular o sistema por 18000 segundos, obteve-se o resultado demonstrado na Figura 34.

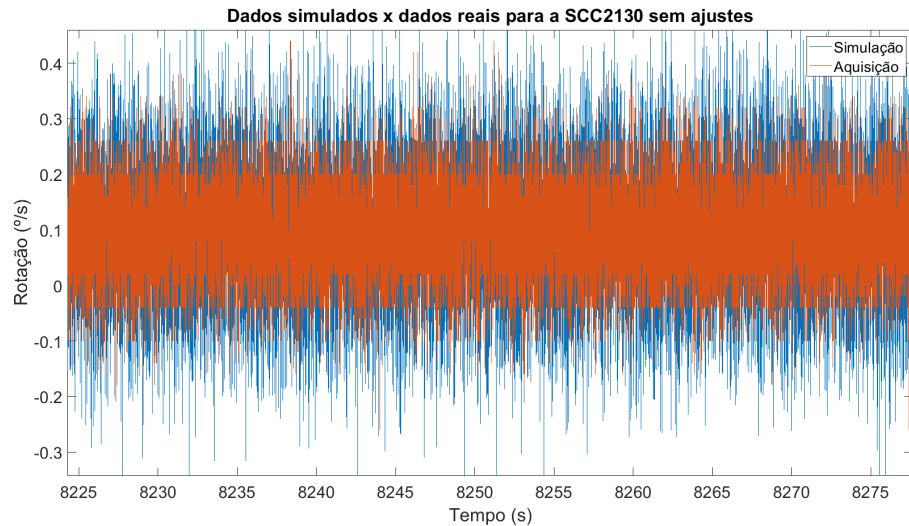
Figura 34 – Comparação entre os dados reais e simulação sem ajustes para a SCC2130



Fonte: Autor (2021).

Observa-se que a amplitude dos desvios de rotação da simulação estão superiores aos valores obtidos experimentalmente, porém ao olhar de forma ampliada, na Figura 35, nota-se uma semelhança no comportamento.

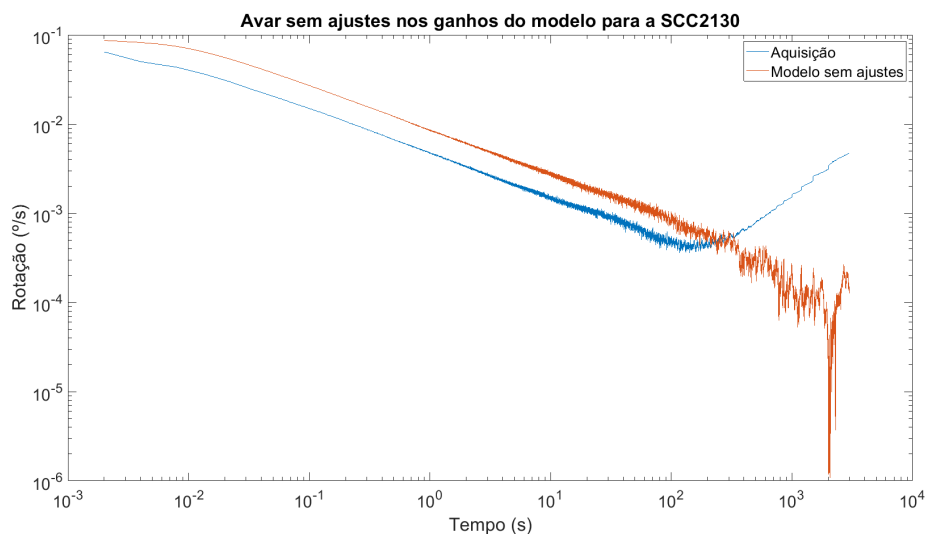
Figura 35 – Comparação entre os dados reais e simulação sem ajustes para a SCC2130 de forma ampliada



Fonte: Autor (2021).

Sendo assim, o ganho geral do sistema necessita de um ajuste de atenuação. Para analisar o ganho dos outros ruídos, foi computado a A_{VAR} da simulação e comparado com a A_{VAR} do experimento. Obteve-se então a Figura 36.

Figura 36 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição e da simulação sem ajuste

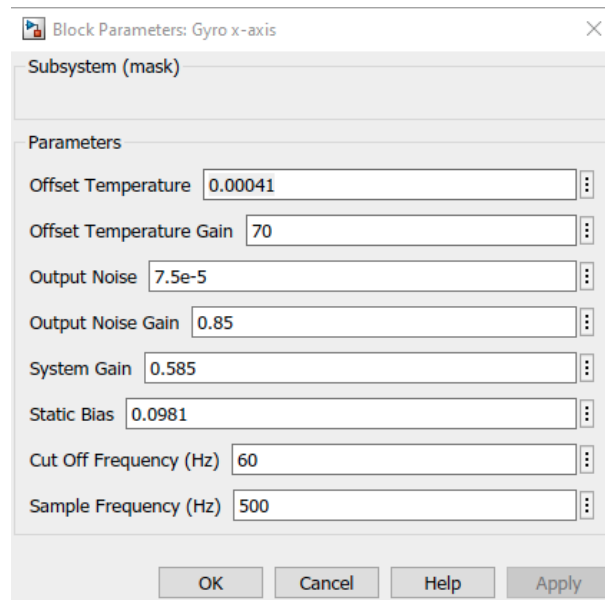


Fonte: Autor (2021).

Analisando a comparação entre as A_{VAR} , verifica-se que a simulação não atingiu a curva da deriva dinâmica, necessitando de um aumento expressivo. Após alguns ajustes manuais,

alterando os ganhos da deriva dinâmica, do ARW e o ganho geral do sistema, chegou-se a um A_{VAR} equivalente ao da aquisição. Os parâmetros finais utilizados podem ser vistos em sua janela de configuração exposto na Figura 37.

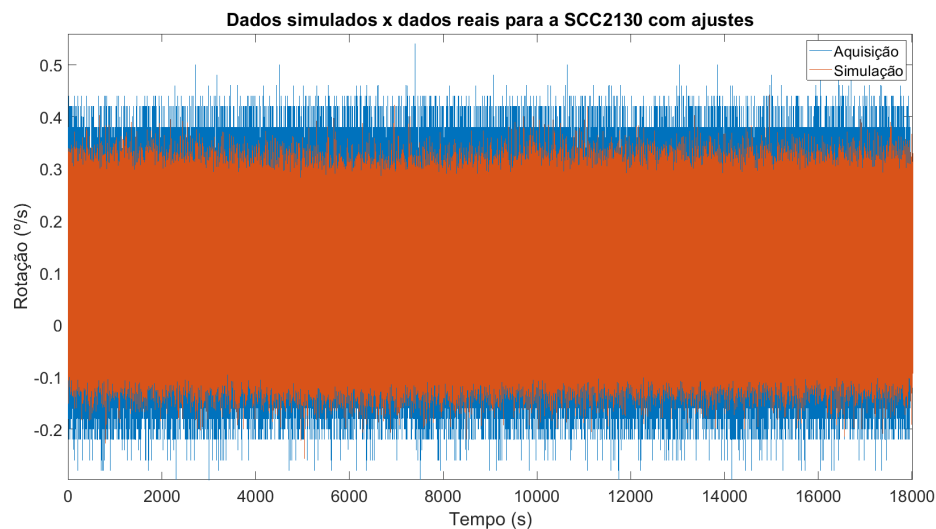
Figura 37 – Parâmetros do bloco do eixo x da SCC2130 após ajustes



Fonte: Autor (2021).

A comparação entre valores de rotação após os ajustes nos ganhos do modelo pode ser vista na Figura 38.

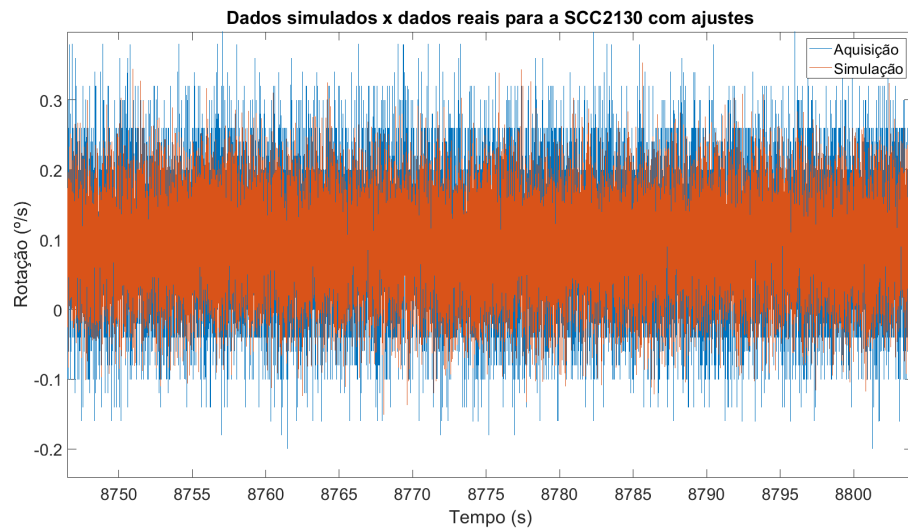
Figura 38 – Comparação entre a rotação da aquisição e da simulação após ajustes



Fonte: Autor (2021).

Agora os valores de rotação da simulação estão levemente menores em relação aos valores da aquisição, porém ao visualizar ambos os dados de forma ampliada, na Figura 39, observa-se uma forte semelhança.

Figura 39 – Comparação entre a rotação da aquisição e da simulação após ajustes de forma ampliada

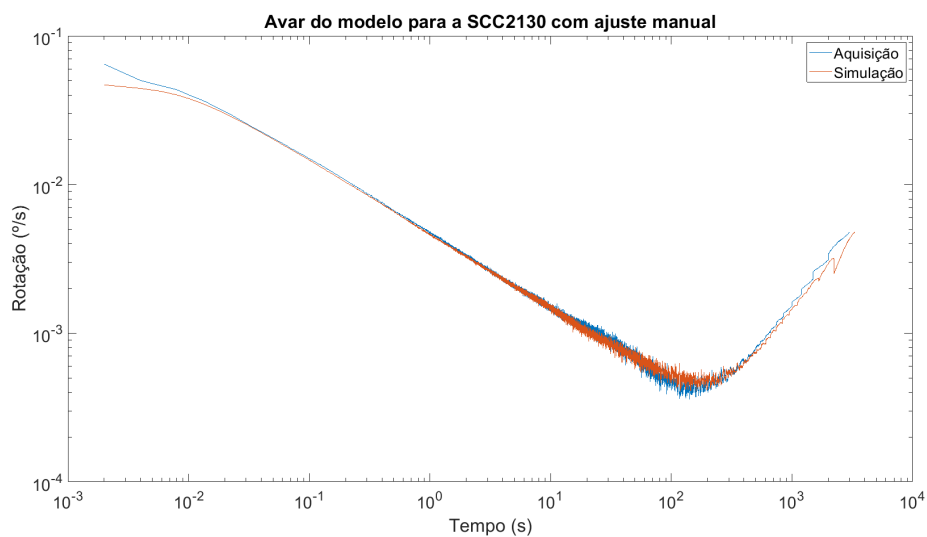


Fonte: Autor (2021).

Os valores da simulação possuem alguns picos menores e isso se deve ao fato de alguns outros ruídos de menor expressão não estarem sendo atribuídos ao modelo, sendo possível até mesmo ruídos referentes a aquisição. Ainda assim, o *offset* em relação a abscissa se manteve e o perfil de distribuição simulada parece satisfazer o perfil dos dados ruidosos do giroscópio da SCC2130.

Foi também computado a A_{VAR} para ambos os dados, da aquisição e da simulação, e a comparação pode ser vista na Figura 40.

Figura 40 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição e da simulação após ajustes



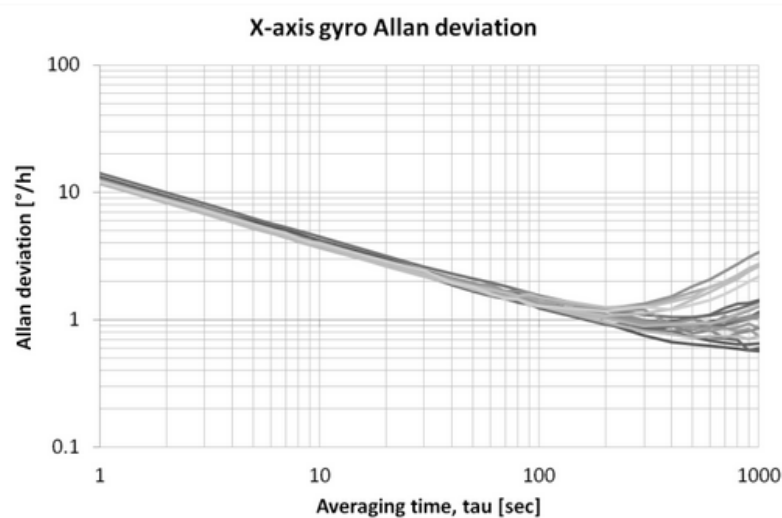
Fonte: Autor (2021).

Percebe-se uma semelhança expressiva entre ambas as curvas, tanto na inclinação

referente a quantização do ARW, quanto no valor de inclinação zero referente a deriva dinâmica. Utilizando os valores do ganhos do modelo ajustado para a SCC2130, e o respectivo perfil de temperatura adquirido na aquisição, foi também feita uma simulação utilizando os valores de ruídos informados pelo *datasheet*.

Os valores do ruídos informados pelo *datasheet* utilizados para a simulação podem ser vistos na Tabela 1, porém o valor levado em consideração para a deriva dinâmica foi retirada de algumas A_{VAR} disponibilizadas pelo próprio *datasheet* e exposta na Figura 41.

Figura 41 – A_{VAR} para o giroscópio da SCC2130



Fonte: (MURATA, 2014).

A magnitude do gráfico está em $^{\circ}/h$ e é necessário converter para $^{\circ}/s$ para se adequar ao resto do sistema. Através de uma observação visual do gráfico foi determinado um valor de $1.03 \frac{^{\circ}}{h}$, o que nos dá um valor de $0.0002861 \frac{^{\circ}}{s}$. Já para o ARW, dividiu-se o valor de $0.005 \frac{^{\circ}}{\sqrt{Hz}}$ por $\sqrt{500}$, transformando a unidade para $^{\circ}/s$, já que o modelo irá inserir um ruído a cada unidade de frequência na simulação.

Resumidamente, os valores de ruídos utilizados para simular em referência ao *datasheet* podem ser vistos na Tabela 8.

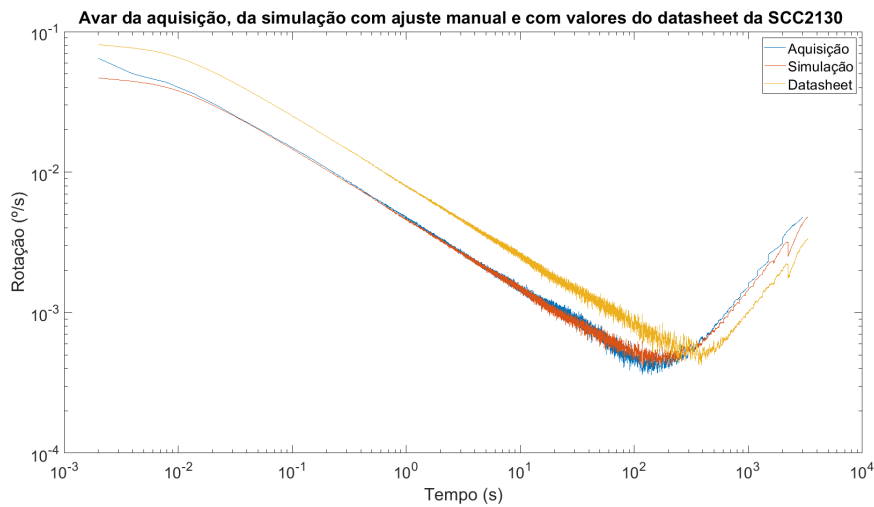
Tabela 8 – Ruídos informados pelo *datasheet* da SCC2130

Eixo	ARW (a 500 Hz)	Deriva fixa	Deriva dinâmica
x	$0.0002861 \frac{^{\circ}}{\sqrt{Hz}}$	$0 \text{ } ^{\circ}/s$	$0.00041 \frac{^{\circ}}{K}$

Fonte: Autor (2021).

Sendo que a deriva fixa foi zerada (não afeta a A_{VAR}). A comparação entre a A_{VAR} do modelo com os valores dos ruídos do *datasheet* com as duas A_{VAR} anteriores pode ser vista na Figura 42.

Figura 42 – Comparação entre as A_{VAR} da aquisição, da simulação e com ruídos do *datasheet*



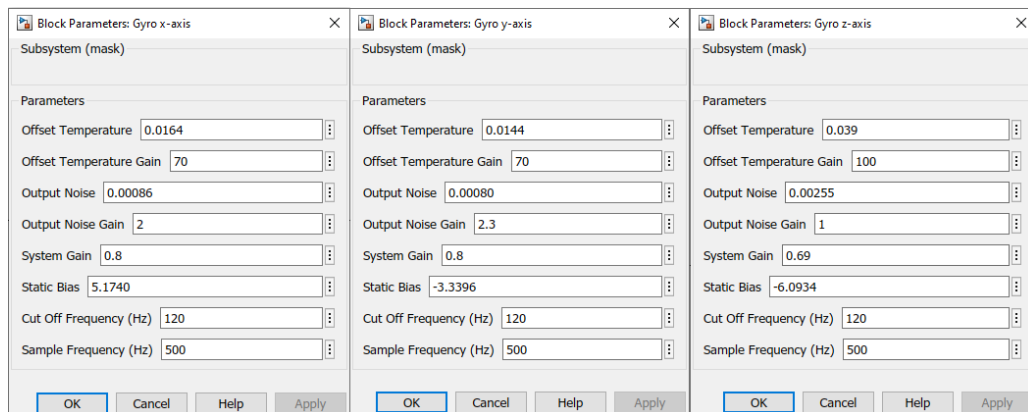
Fonte: Autor (2021).

A SCC2130 utilizada na aquisição aparenta possuir valores de ruídos menores em relação ao *datasheet*, principalmente no ARW. A deriva dinâmica se mostrou equivalente nas três A_{VAR} , porém a A_{VAR} com ruídos do *datasheet* demora mais para atingir a curva da deriva o que valida tanto o modelo genérico desenvolvido quanto a utilização do perfil de temperatura obtido experimentalmente como referência para a simulação, já que o seu ruído é menor.

4.1.2 MPU9250

Os mesmos procedimentos de ajustes feitos para a SCC2130 foram aplicados também para a MPU9250 e os blocos dos eixos e os valores dos ruídos configurados podem ser vistos na Figura 43.

Figura 43 – Blocos de configuração dos eixos da MPU9250

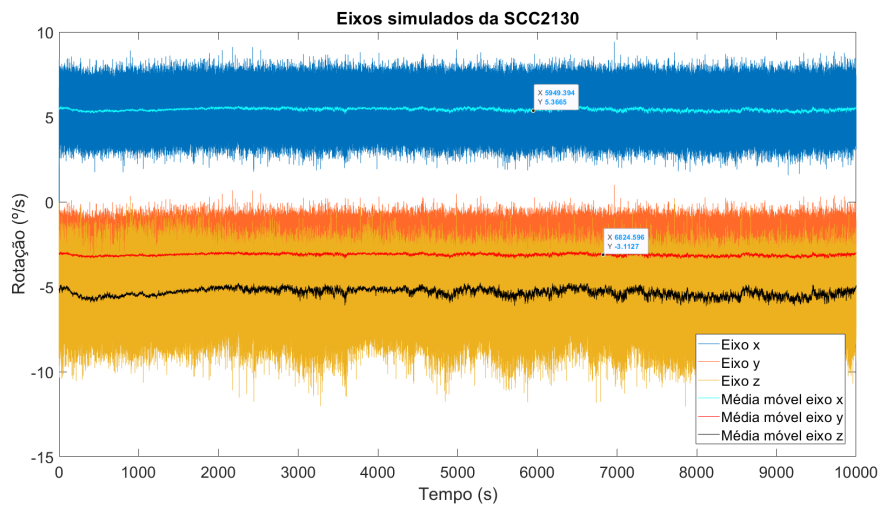


Fonte: Autor (2021).

Optou-se por utilizar uma frequência de corte de 120 Hz, ao invés dos 188 Hz configurados na MPU9250, por demonstrar maior semelhança entre os dados obtidos e simulados.

Após simular o sistema por 10000 segundos (mais do que o suficiente para atingir a curva da deriva na A_{VAR}), obteve-se o resultado exposto na Figura 44.

Figura 44 – Blocos de configuração dos eixos da MPU9250

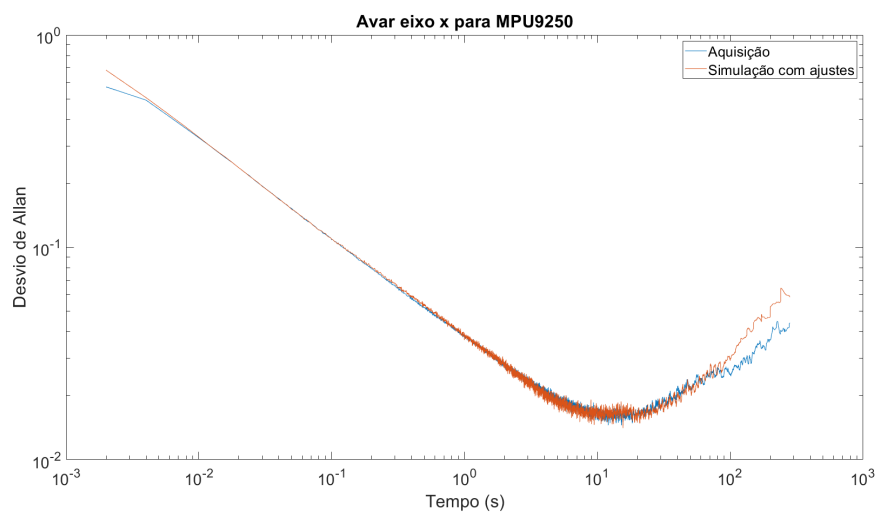


Fonte: Autor (2021).

Comparando os resultados da Figura 44 com a Figura 25, nota-se uma forte semelhança nos valores de rotação, principalmente no eixo z. Observando pela média móvel no eixo z, a mesma tendência para um valor mais negativo acontece na simulação, sendo esse um forte indício do funcionamento correto do modelo desenvolvido.

As A_{VAR} para as simulações da MPU9250 foram computados e uma comparação entre os dados reais e simulados para o eixo x pode ser vista na Figura 45.

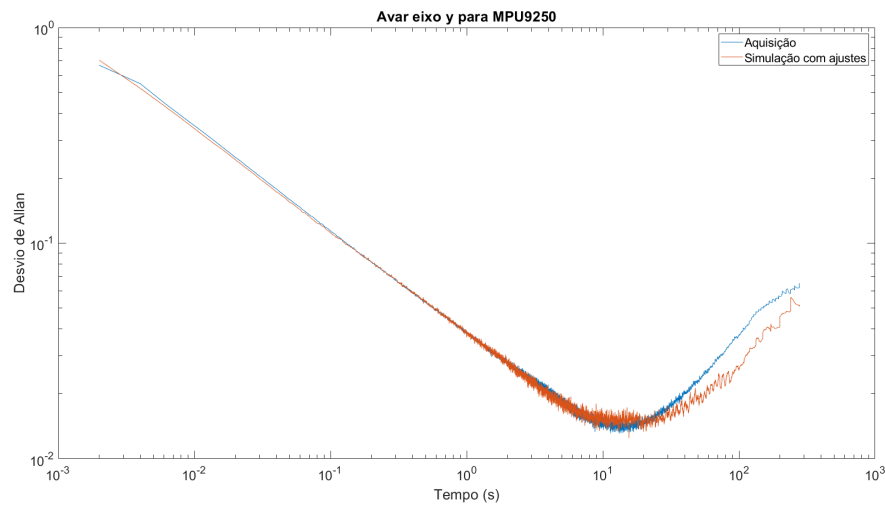
Figura 45 – A_{VAR} do eixo x real e simulado para a MPU9250



Fonte: Autor (2021).

É possível notar uma forte semelhança entre ambas as A_{VAR} , satisfazendo os valores dos ruídos de ARW e da deriva dinâmica. A comparação para o eixo y pode ser vista na Figura 46.

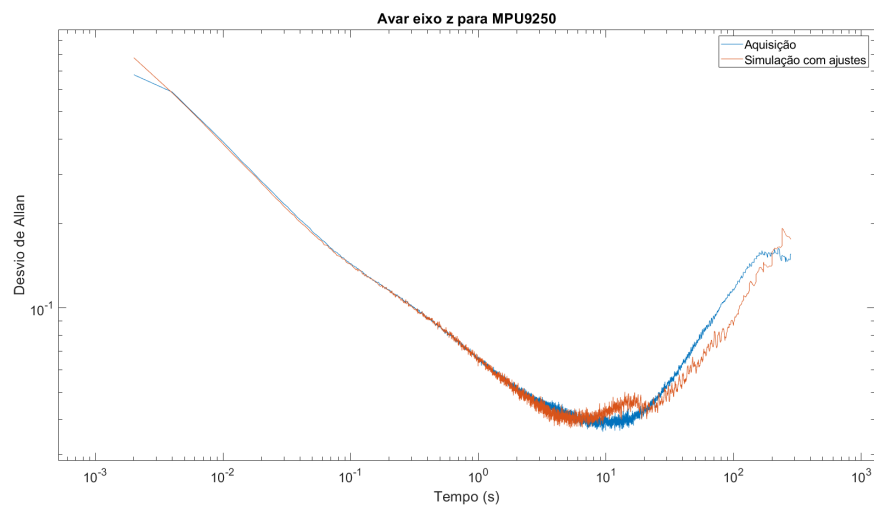
Figura 46 – A_{VAR} do eixo y real e simulado para a MPU9250



Fonte: Autor (2021).

Para o eixo y, a simulação também conseguiu alcançar os valores desejados de ruídos, gerando então uma A_{VAR} muito semelhante a da aquisição. Para o eixo z, a comparação é exposta na Figura 47

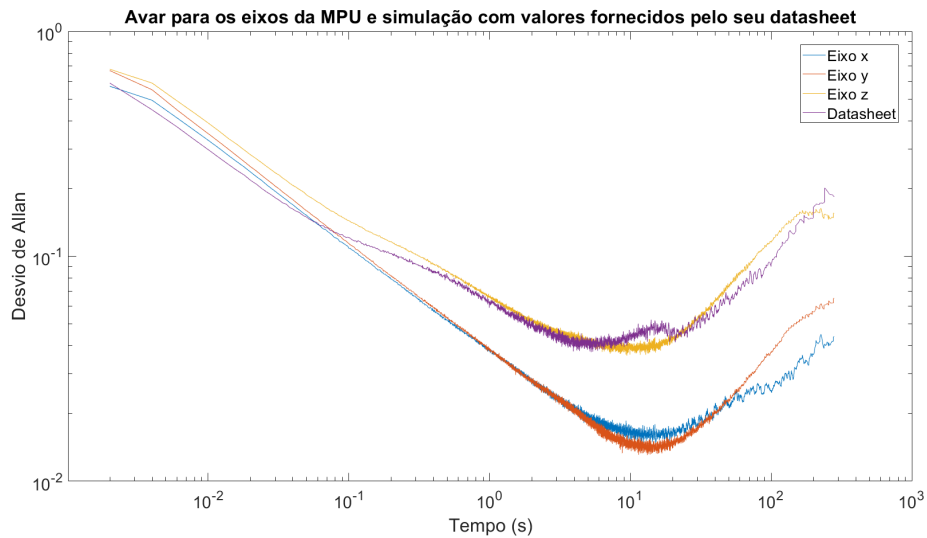
Figura 47 – A_{VAR} do eixo z real e simulado para a MPU9250



Fonte: Autor (2021).

O eixo z é notavelmente mais ruidoso que os outros dois eixos e isso também foi replicado utilizando o modelo. Algo que chama a atenção é uma leve curvatura entre os tempos de 10^{-2} e 10^0 , que aumentando a magnitude do ruído de temperatura, a deriva dinâmica, a curva da simulação replicou o comportamento da curva da A_{VAR} da aquisição. Por fim, foi feito também uma comparação entre as A_{VAR} da aquisição e uma simulação com os valores fornecidos pelo *datasheet* da MPU9250 e o resultado pode ser visto na Figura 48.

Figura 48 – A_{VAR} das aquisições e com valores do datasheet para a MPU9250



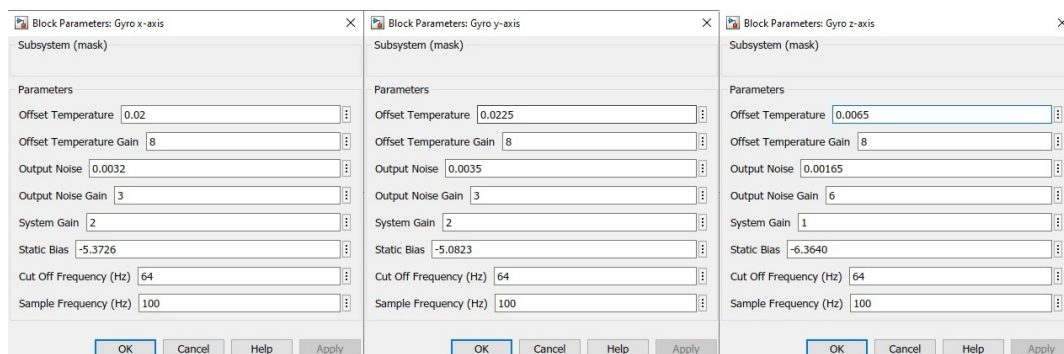
Fonte: Autor (2021).

Verifica-se que a simulação com os valores do *datasheet* se aproxima suficientemente aos valores dos eixos obtidos da MPU9250, sendo até mesmo coerente com a deriva dinâmica do eixo z. A ondulação na inclinação negativa da A_{VAR} do *datasheet* demonstra uma forte influência da temperatura nos dados simulados, indicando até possivelmente uma aquisição ruidosa e irreal dos valores de temperatura. Sendo assim, o modelo demonstra se adequar para a MPU9250, mas o perfil de temperatura deve ser melhor amostrado ou passar por alguma técnica de filtragem para retirar os ruídos.

4.1.3 BNO055

Os ganhos do modelo foram ajustados manualmente para aproximar a A_{VAR} da simulação da A_{VAR} da aquisição. Os parâmetros finais obtidos podem ser vistos na Figura 49.

Figura 49 – Parâmetros finais após ajustes para o BNO055

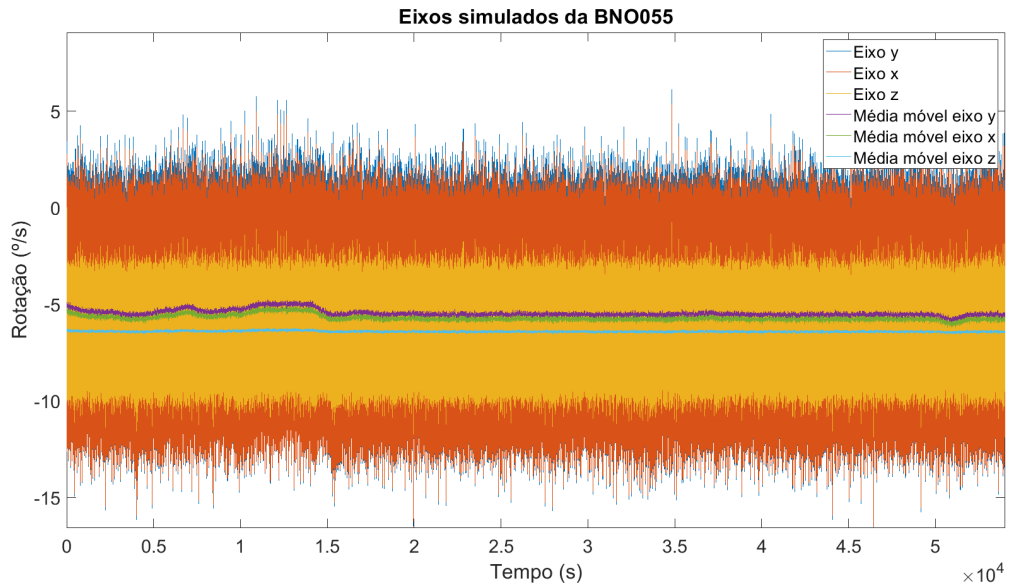


Fonte: Autor (2021).

Simulou-se por 15 horas, respeitando o tempo de aquisição, e obteve-se o resultado

exposto na Figura 50.

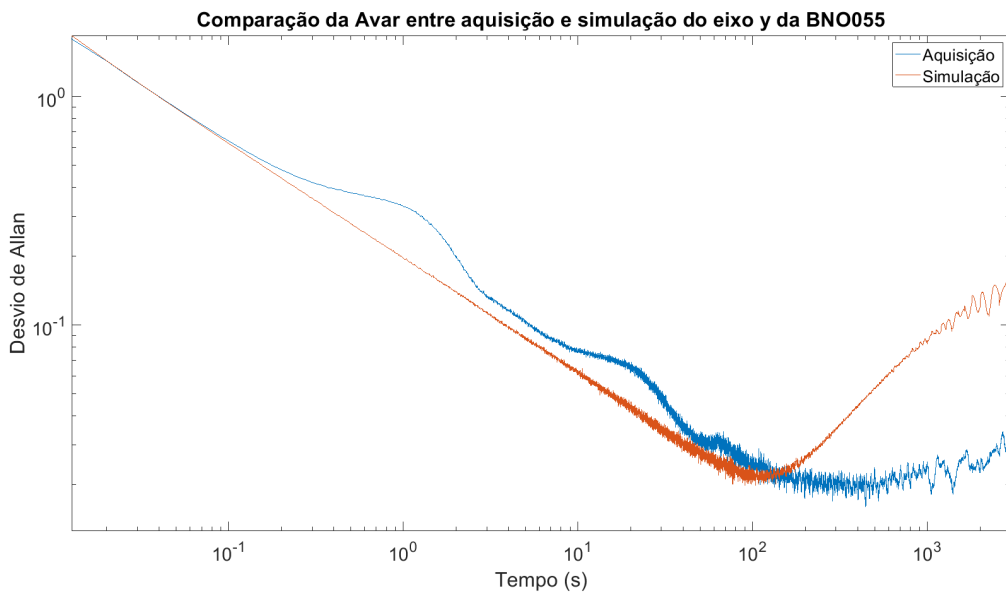
Figura 50 – Dados dos eixos simulados após os ajustes manuais



Fonte: Autor (2021).

Nota-se uma forte semelhança entre o eixo x e y, exatamente o que ocorreu na aquisição. Outra semelhança com a aquisição é uma ondulação vista no valor médio do eixo x e y, enquanto o eixo z permanece mais estável. Computou-se a A_{VAR} para os três eixos e uma comparação entre a simulação e a aquisição para o eixo x pode ser vista na Figura 51.

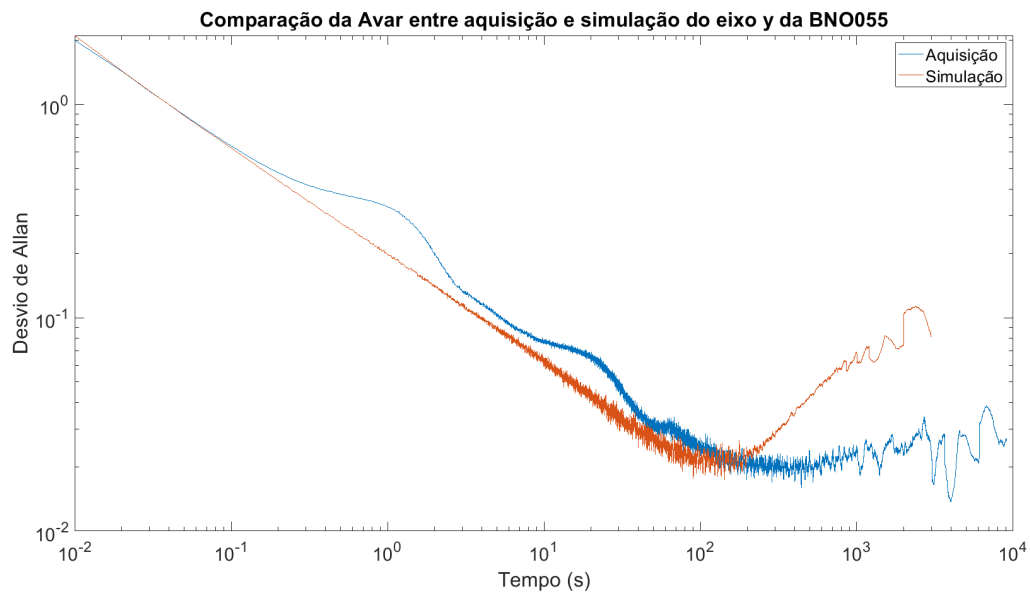
Figura 51 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo x da BNO055



Fonte: Autor (2021).

Enquanto a comparação para o eixo y está exposta na Figura 52.

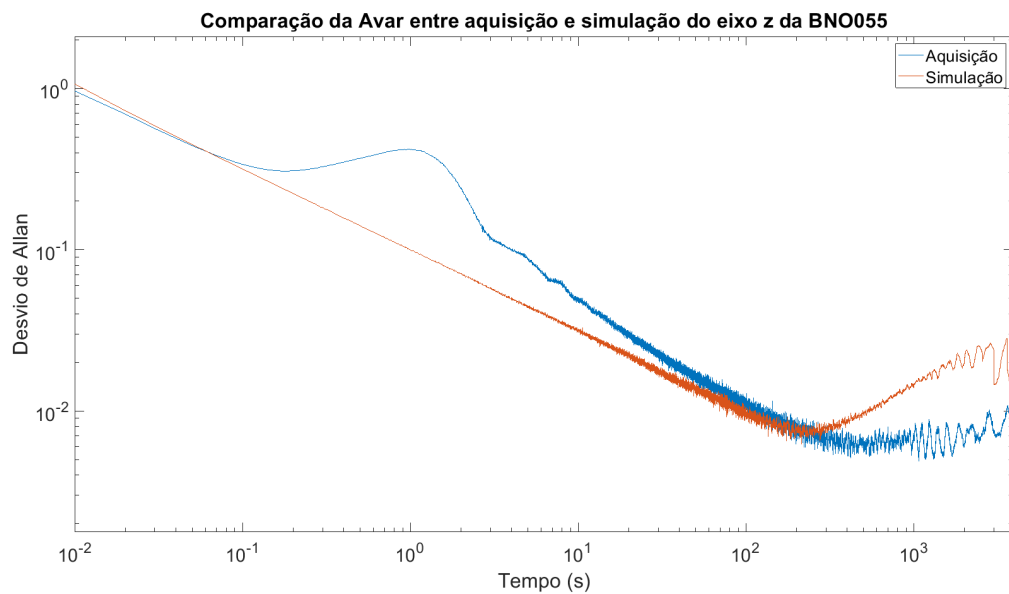
Figura 52 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo y da BNO055



Fonte: Autor (2021).

Já a Figura 53 demonstra o resultado para o eixo z.

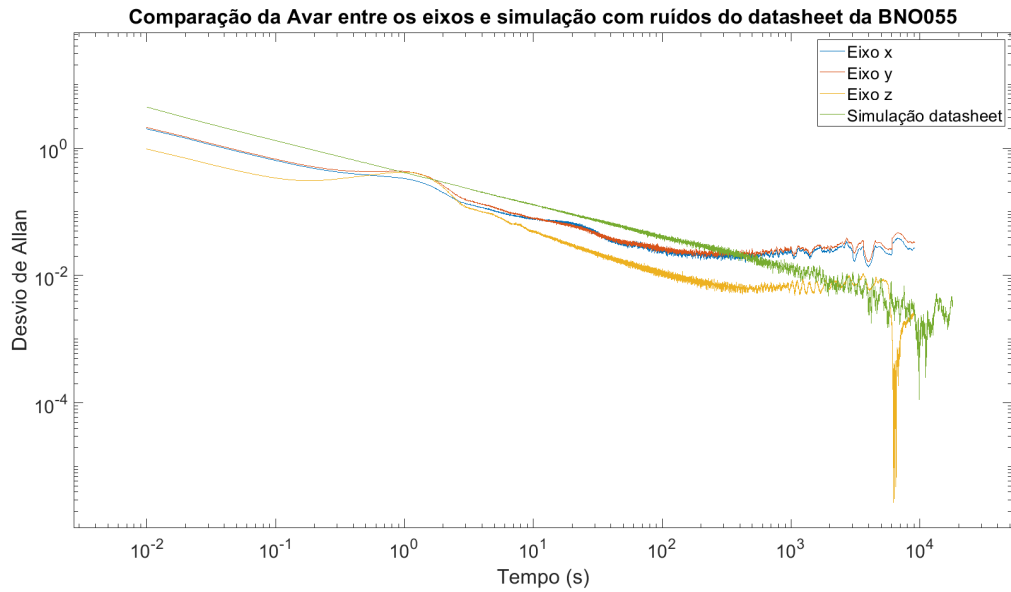
Figura 53 – A_{VAR} da simulação e aquisição do eixo z da BNO055



Fonte: Autor (2021).

E, por fim, foi feita uma simulação utilizando os valores de ruídos informados pelo *datasheet* (BOSH, 2014) da BNO055 e feita uma comparação com os A_{VAR} dos dados aquisitados para os três eixos. Este resultado pode ser visualizado na Figura 54.

Figura 54 – A_{VAR} das aquisições e com valores do *datasheet* para a MPU9250



Fonte: Autor (2021).

Para os valores do *datasheet*, mesmo simulando por 30 horas, o A_{VAR} não atingiu o ponto de deriva, o que pode ser causado ou pelo perfil de temperatura obtido que estava impreciso ou por possivelmente o valor informado pelo *datasheet* não possuir uma distribuição linear para a faixa de temperatura informada. Ou seja, o valor informado de $\pm 0.015 \frac{^{\circ}/s}{K}$ não condiz com valor quantizado pela A_{VAR} no capítulo anterior.

5 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido baseou-se em diversas áreas do conhecimento da engenharia com o intuito de alcançar resultados relevantes no âmbito da navegação inercial. Essas premissas compõem-se de criar um modelo genérico para um giroscópio MEMS, quantizar os ruídos em aquisições reais através da Variância de Allan e aplicar as magnitudes dos ruídos na simulação para validar o modelo criado em comparação com as mesmas unidades utilizadas na aquisição.

O modelo implementado no *Simulink* baseou-se em modelos matemáticos estabelecidos na literatura, considerando os principais ruídos que afetam os giroscópios MEMS, e a partir disso construiu-se um modelo genérico para cada IMU utilizada no projeto. O modo com que o encapsulamento do modelo foi parametrizado permitiu uma mudança acessível nos valores dos ruídos, da frequência de corte e da frequência de amostragem da IMU a ser simulada. Mesmo que para este projeto tenha sido criado apenas três blocos, referentes as IMU utilizadas, é possível criar inúmeros blocos para quaisquer giroscópios MEMS - devido a construção genérica do modelo.

Pôde-se validar o modelo criado, para as três IMU disponíveis, através dos dados reais dos giroscópios obtidos experimentalmente por meio da quantização dos ruídos utilizando a Variância de Allan. O modelo se demonstrou adaptável a diversos cenários, sendo eles diferentes perfis de temperatura, como um perfil bem estável e outro bem ruidoso, e valores de ruídos mais altos - como o da MPU9250 - ou para valores de ruídos mais baixos - tal qual da SCC2130. A única ressalva fica em torno de outros ruídos que se apresentaram nos dados experimentais da BNO055, na qual não foi possível replica-los.

Sendo assim, podemos afirmar que os objetivos do trabalho foram alcançados com sucesso. A partir dos resultados atingidos, a utilização do modelo construído pode impactar em diversos projetos futuros que fazem o uso de unidades inerciais, além de facilitar o surgimento de novas pesquisas e eventualmente aumentar a gama de possíveis IMU a serem consideradas no projeto sem a necessidade de aquisição prévia.

Portanto, conclui-se que a análise para a associação de diversas unidades inerciais em uma mesma placa para a utilização de algoritmos de fusão de dados se tornou viável e possivelmente mais eficiente, tendo em vista que há o potencial de estimar quais combinações alcançam um melhor resultado.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, D. **Statistics of Atomic Frequency Standards Proceedings of the IEEE**. 1966. Disponível em: <https://tf.nist.gov/general/pdf/7.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- BORESTEIN, J. **Heuristic reduction of gyro drift in gyro-based vehicle tracking**. 2009. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/7305/730507/Heuristic-reduction-of-gyro-drift-in-gyro-based-vehicle-tracking/10.1117/12.816918.short>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- BOSCH. **BNO055**. 2020. Disponível em: <https://bityli.com/uHkpf>. Acesso em: 23 abr. 2021.
- BOSH. **BNO055**. 2014. Disponível em: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST_BNO055_DS000_12.pdf. Acesso em: 30 ago. 2021.
- CARRARA, V.; PEREIRA, M.; AZEVEDO, J. Attitude sensors calibration and modeling for cubesats. 2019.
- CHATFIELD, A. B. Attitude estimation using redundant inertial measurement units for the control of a camera stabilization platform. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 24, n. 5, 2016.
- CODREY. **EK-TM4C123GXL**. 2018. Disponível em: <https://www.codrey.com/embedded-systems/serial-communication-basics/>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- DIGIKEY. **IMU MEMs**. 2020. Disponível em: <https://www.digikey.co.th/product-detail/en/bosch-sensortec/BNO055/828-1058-1-ND/6136309>. Acesso em: 19 abr. 2021.
- ENGERS, V.D. **simulink-imu-mems-simulation**. 2020. Disponível em: <https://github.com/vitorengers/simulink-imu-mems-simulation>. Acesso em: 13 set. 2021.
- NOCETI FILHO, S. Fundamentos sobre ruídos. **Revista Backstage**, v. 8, p. 172–173, 2002.
- HIBBELER, R.C. **Engineering Mechanics: Dynamics Fourteenth Edition**. 2016. Disponível em: <http://kaizenha.com/wp-content/uploads/2017/12/Dynamics-14th-Ed.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- HOU, H. **Inertial Sensors Errors Modeling Using Allan Variance**. 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283360426_Inertial_sensors_errors_modeling_using_Allan_variance. Acesso em: 17 jul. 2021.
- IEEE STD 1139-1999. **IEEE Standard Definitions of Physical Quantities for Fundamental Frequency and Time Metrology-Random Instabilities**. 1999. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/807679>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- IEEE STD 952-1997. **IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros**. 1997. Disponível em: <https://standards.ieee.org/standard/952-1997.html>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- INSTRUMENTS, T. **EK-TM4C123GXL**. 2013. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/EK-TM4C123GXL>. Acesso em: 12 ago. 2021.

- INVENSENSE. **MPU-9250**. 2015. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- KAMIL, M. **A new method for quantitative and qualitative representation of noises type in Allan (and related) variances**. 2020. Disponível em: <https://earth-planets-space.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s40623-020-01328-6.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- KESHNER, M.S. **1/f Noise**. 1982. Disponível em: [http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/Razno/SRK2016/priprava/sum1f/Keshner\%\\$201982.pdf](http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/Razno/SRK2016/priprava/sum1f/Keshner\%$201982.pdf). Acesso em: 17 jul. 2021.
- KHAN, J. **What is Bias Stability and why is it a key parameter for inertial sensor performance?** 2018. Disponível em: <https://www.kvhmobileworld.kvh.com/bias-stability-key-parameter-inertial-sensor-performance/>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- KODOSKY J. **LabVIEW**. 2020. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3386328>. Acesso em: 12 ago. 2021.
- F. KONIGSEDE, W. K.; KUGI, A. Attitude estimation using redundant inertial measurement units for the control of a camera stabilization platform. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 24, n. 5, pp. 1837–1844, 2016.
- LAGES, W.F. **Descrição de Sinais Aleatórios**. 2004. Disponível em: <http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/ele00071/dec/signals.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- LAWRENCE, C. **Characterization of Ring Laser Gyro Performance Using the Allan Variance Method**. 1997. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.210.1133&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 25 jul. 2021.
- LEENS, F. **An introduction to I2C and SPI protocols**. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224376183_An_introduction_to_I2C_and_SPI_protocols. Acesso em: 30 ago. 2021.
- LISHA. **Software/Hardware Integration Lab**. 1992. Disponível em: <https://lisha.ufsc.br/HomePage>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- MARMARELIS, V.Z. **Gaussian White Noise**. 2004. Disponível em: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780471679370.app2#:~:text=Gaussian%20white%20noise%20\(GWN\)%20is,autocorrelation%20function%20of%20a%20GWN](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/9780471679370.app2#:~:text=Gaussian%20white%20noise%20(GWN)%20is,autocorrelation%20function%20of%20a%20GWN). Acesso em: 25 jul. 2021.
- MURATA. **SCC2130-D08**. 2014. Disponível em: https://www.murata.com/-/media/webrenewal/products/sensor/pdf/datasheet/datasheet_scc2130-d08.ashx. Acesso em: 30 ago. 2021.
- NERIS, M. **Avanços tecnológicos nas grandes navegações**. 2019. Disponível em: <https://www.infoescola.com/historia/avancos-tecnologicos-nas-grandes-navegacoes/>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- PASSARO, V.M. **Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective**. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s17102284>. Acesso em: 17 jul. 2021.
- PUPO, L.B. **Characterization of Errors and Noises in MEMS Inertial Sensors Using Allan Variance Method**. 2016. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/103849/MScLeslieB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 jul. 2021.

RIBAS, R. P. **Microsistemas Integrados MEMs**. 2000. Disponível em: <https://www.ccs.unicamp.br/cursos/ee941/download/cap14.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2021.

SPARKFUN. **Accelerometer, Gyro and IMU Buying Guide**. 2020. Disponível em: https://www.sparkfun.com/pages/accel_gyro_guide. Acesso em: 25 jul. 2021.

SPENGLER, A. W. **Técnica de condicionamento e processamento de sinais para girômetros a fibra óptica com malha fechada óptica**. 2014. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/260731/1/Spengler_AndersonWedderhoff_D.pdf. Acesso em: 21 abr. 2021.

STOCKWELL, W. **Angle Random Walk**. 2000. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.210.1133&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 17 jul. 2021.

ZHI, R. **A Drift Eliminated Attitude Position Estimation Algorithm In 3D**. 2016. Disponível em: <https://scholarworks.uvm.edu/graddis/450/>. Acesso em: 17 jul. 2021.