

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

STEFANIE VON RANDOW DE SOUZA



CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS MEMS COM VISTAS A
APLICAÇÃO EM UMA PLATAFORMA EULERIANA

CURITIBA

2015

STEFANIE VON RANDOW DE SOUZA



CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS MEMS COM VISTAS A
APLICAÇÃO EM UMA PLATAFORMA EULERIANA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, do Departamento de Geomática, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof.^o Dr.^o Álvaro Muriel Lima Machado

CURITIBA

2015

S729c

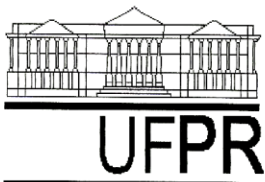
Souza, Stefanie Von Randow de
Calibração de acelerômetros MEMs com vistas a aplicação em uma
plataforma euleriana/ Stefanie Von Randow de Souza. – Curitiba, 2015.
127 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2015.

Orientador: Álvaro Muriel Lima Machado .
Bibliografia: p. 118-123.

1. Controle de inundações. 2. Sistema de Posicionamento Global.
Calibração. I. Universidade Federal do Paraná. II.Machado, Álvaro Muriel
Lima. III. Título.

CDD: 363.34936



Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Caixa Postal 19001 - Fone: (41) 361-3153
CEP 81531-990 - Curitiba - PR - Brasil - e-mail: cpgcg@ufpr.br

Ata da sessão pública de Defesa de Dissertação para obtenção do grau de mestre em Ciências. Aos vinte e cinco dias do mês de março de dois mil e quinze, na sala PI-13 do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, às 14:00 horas, reuniu-se em sessão pública a Banca Examinadora da prova de Defesa de Dissertação da candidata ao Título de Mestre em Ciências **STEFANIE VON RANDOW DE SOUZA** composta por: Prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado (UFPR) como Orientador e Presidente, Prof. Dr. Winderson Eugenio dos Santos (UTFPR) e Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas (UFPR) como membros. Após os esclarecimentos prestados pelo candidato às arguições feitas pelos membros da Banca, o Sr. Presidente suspendeu temporariamente a sessão a fim de que a Banca se reunisse em sessão secreta para deliberar sobre o resultado. Reaberta a sessão, o Sr. Presidente deu conhecimento a candidata que de conformidade com o Art. 28º da Resolução 45/90 do CEP, a dissertação foi **aprovada** apenas condicionada à apresentação, no prazo de sessenta dias, da redação final com as alterações sugeridas.

Curitiba, 25 de março de 2015.

Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado – Orientador e Presidente(UFPR)

Prof. Dr. Winderson Eugenio dos Santos – Membro (UTFPR)

Prof. Dr. Sílvio Rogério Correia de Freitas– Membro (UFPR)

Título da Dissertação "CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS MEMS COM VISTAS A APLICAÇÃO EM UMA PLATAFORMA EULERIANA"

DEDICATÓRIA

*“Aos meus pais e irmãos. Em especial
a minha mãe Cida.”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente ao meu orientador, prof. Dr. Álvaro Muriel Lima Machado, pela orientação, incentivo e ajuda inestimável neste trabalho, bem como pela paciência e compreensão.

Ao Curso de Pós-Graduação de Pós Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) e a secretária Mônica Kleuser. Meus sinceros agradecimentos ao coordenador do CPGCG, Prof. Dr. Jorge Centeno, por toda ajuda que me permitiu finalizar este trabalho.

Ao prof. Dr. Silvio Freitas do CPGCG, pelos conselhos e ensinamentos transmitidos.

Ao prof. Dr. Winderson Santos da UTFPR, por toda ajuda e pela disponibilização de equipamentos para realização de testes.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior) pelo fomento da bolsa de estudos.

Ao LAGEH (Laboratório de Ciências Geodésicas) e a prof. Dr. Claudia Pereira Krueger, pelos equipamentos cedidos e pelo período de orientação.

Ao prof. Dr. Daniel Santos, pelos equipamentos cedidos. Agradeço também ao pesquisador Marcos Basso pelo ajuda e tempo dispendidos a mim.

Ao Laboratório de Topografia (LABTOP), em especial às servidoras Marinei e Vania.

Aos amigos da pós-graduação: Andrea, Letícia, Adriana, Lucía, André, Gustavo, Carla e outros indiretamente citados.

À minha família pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

À Deus.

RESUMO

Atualmente, existe grande preocupação com relação aos problemas causados por desastres naturais, em especial, pelas inundações. Com o objetivo de contribuir regionalmente, encontra-se em desenvolvimento um projeto de monitoramento de desastres naturais. Este sistema é composto de boias que medem as variações do nível da água e utiliza tecnologia GPS. O GPS é um dos métodos de posicionamento mais utilizados e que fornece dados de forma acurada. Porém, em certos casos, pode haver perdas do sinal do satélite. Desta forma, a integração com outros sensores permite melhorar a solução. Os sensores inerciais operam em qualquer ambiente e não dependem da informação de fontes externas. Contudo, as informações de saída dos sensores inerciais apresentam diversos erros que comprometem o posicionamento. Alguns procedimentos permitem reduzir significativamente estes erros. A calibração permite estimar erros sistemáticos. Os métodos de calibração mais acurados são realizados em laboratórios e exigem instrumentos muito precisos e onerosos. Alguns métodos de calibração, como o Método de Calibração Multi-Posições, foram desenvolvidos para serem ferramentas eficientes e que podem ser aplicadas em campo, sem a utilização de qualquer instrumento de calibração externa. Ao invés disso, são necessárias numerosas medidas de atitude do equipamento e utiliza-se a magnitude da gravidade como referência para a calibração de acelerômetros. Ainda é necessário considerar o efeito de erros aleatórios sobre as medidas inerciais. Estes erros são compostos de ruídos, causados por diversos tipos de fontes. Existem diferentes formas de se estimar os ruídos. Neste trabalho foi utilizado o teste da Variância de Allan para tal finalidade. Os parâmetros dos erros sistemáticos de deriva, de fator de escala e de não-ortogonalidade, foram determinados utilizando o método de Calibração Multi-Posições Modificado, apresentado por Syed *et al.* (2007). A aplicação dos ruídos e parâmetros de erro calculados foi verificada a partir de dois testes. O primeiro teste de verificação consistiu no cálculo de uma trajetória realizada pelos acelerômetros com relação a uma trajetória de referência determinada por GPS. No segundo teste foram determinados deslocamentos verticais com o auxílio de um servomotor, a fim de simular a variação do nível da água. Em ambos os testes verificou-se que a correção das acelerações com os parâmetros de calibração e de ruídos acarretam em uma melhora significativa na solução final.

ABSTRACT

Nowadays, there is a big concern about the problems caused by natural disasters, especially floods. In order to contribute regionally, a natural disaster monitoring project is in development. This system consists of buoys that measure the variations in the water level and uses GPS technology. GPS is one of the most used positioning methods and provides data accurately. However, in some cases, there may be satellite signal loss. Thus, the integration with other sensors can improve the solution. The inertial sensors operate in any environment and don't rely on information from external sources. However, the output information of the inertial sensors has several errors that compromise the positioning. Some procedures allow significantly reduction of these errors. Calibration allows the estimation of systematic errors. The most accurate calibration methods are carried out in laboratories and they require very precise and expensive instruments. Some calibration methods, such as Multi-Position Calibration Method, have been developed to be an effective tool, which can be applied in the field without the use of any external calibration instrument. Instead, many equipment attitude measures are required and the magnitude of gravity is used as a reference for calibration of accelerometers. It is still necessary to consider the effect of random errors on the inertial measurements. These errors consist of noise caused by different types of sources. There are different ways to estimate the noise. In this study, we used the Allan Variance test for this purpose. The parameters of systematic errors, bias, scale factor and non-orthogonality, were determined using the Modified Multi-Positions Calibration Method, presented by Syed et al. (2007). The application of the noise and error parameters calculated was verified from two tests. The first verification test consisted in calculating a trajectory made by accelerometers towards a given reference GPS trajectory. In the second test, vertical movements were determined with the aid of a servomotor in order to simulate the variation of water level. In both tests, it was found that the acceleration correction with the calibration parameters and noise lead to a significant improvement in the final solution.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: LEITOS DE UM RIO	22
FIGURA 2: PLATAFORMA EULERIANA DE AMARRAÇÃO	24
FIGURA 3: SISTEMA INERCIAL DE PLATAFORMA ESTÁVEL	27
FIGURA 4: SISTEMA <i>STRAPDOWN</i>	28
FIGURA 5: COMPONENTES DE UM CSI VISTOS (A) DO ALTO-FRENTE E (B) DE TRÁS-BAIXO	29
FIGURA 6: REFERENCIAL TERRESTRE	33
FIGURA 7: REFERENCIAL DE NAVEGAÇÃO - NED	34
FIGURA 8: ÁCARO EM UM DISPOSITIVO MEMS.....	37
FIGURA 9: SUBSTRATO DE UM DISPOSITIVO MEMS.....	38
FIGURA 10: APLICAÇÕES SENSORES INERCIAIS MEMS (A) VIDEOGAMES, (B) MEDICINA E (C) SMARTPHONES.....	38
FIGURA 11: (A) AUV, (B) UAV E (C) MMS.....	39
FIGURA 12: ERROS DOS SENSORES INERCIAIS.....	41
FIGURA 13: ERRO DE DERIVA	43
FIGURA 14: ERRO DE FATOR DE ESCALA	44
FIGURA 15: ERRO DE NÃO-ORTOGONALIDADE	45
FIGURA 16: OUTROS ERROS.....	46
FIGURA 17: RUÍDO CAUSADO POR UM ERRO DE QUANTIZAÇÃO	47
FIGURA 18: MÉTODO DE CALIBRAÇÃO SEIS POSIÇÕES	50
FIGURA 19: ATITUDES PARA A CALIBRAÇÃO (18 POSIÇÕES)	52
FIGURA 20: (A) NÃO-ORTOGONALIDADE ENTRE OS EIXOS X E Y E (B) ENTRE O EIXO Z E O PLANO XY.....	53
FIGURA 21: (A) FACES, (B) ARESTAS E (C) QUINAS DE UM SISTEMA INERCIAL	59
FIGURA 22: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA VARIÂNCIA DE ALLAN	61
FIGURA 23: GRÁFICO PARA O RUÍDO DE <i>RANDOM WALK</i>	63
FIGURA 24: GRÁFICO DO <i>BIAS INSTABILITY</i>	64
FIGURA 25: GRÁFICO DA TAXA DE <i>RANDOM WALK</i>	65
FIGURA 26: GRÁFICO DO <i>DRIFT RATE RAMP</i>	66
FIGURA 27: GRÁFICO DO RUÍDO DE QUANTIZAÇÃO.....	66

FIGURA 28: DUPLA INTEGRAÇÃO RETANGULAR.....	68
FIGURA 29: DUPLA INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL	69
FIGURA 30: INTEGRAL (A) RETANGULAR E (B) TRAPEZOIDAL.....	69
FIGURA 31: FILTRO BUTTERWORTH	71
FIGURA 32: FILTRO <i>CHEBYSHEV</i> (A) TIPO 1 E (B) TIPO 2.....	72
FIGURA 33: FILTRO ELÍPTICO.....	72
FIGURA 34: UMI COLIBRI.....	74
FIGURA 35: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – <i>COLIBRI</i>	74
FIGURA 36: IMU <i>INERTIACUBE3™</i>	76
FIGURA 37: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – <i>INERTIACUBE3™</i>	76
FIGURA 38: SNI <i>MTI-G™</i>	77
FIGURA 39: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – <i>MTI-G™</i>	78
FIGURA 40: BANCADA DE CALIBRAÇÃO.....	79
FIGURA 41: DIAGRAMA - VARIÂNCIA DE ALLAN	82
FIGURA 42: ALGORITMO PARA PROCESSAMENTO DA VARIÂNCIA DE ALLAN.....	83
FIGURA 43: DIAGRAMA - CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES (SEM EQUIPAMENTOS DE CALIBRAÇÃO)	84
FIGURA 44: COLETA DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DA UMI <i>COLIBRI</i>	85
FIGURA 45: ALGORITMO PARA CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES MODIFICADO	86
FIGURA 46: DIAGRAMA - CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES (COM E SEM A BANCADA DE CALIBRAÇÃO).....	87
FIGURA 47: COLETA DE DADOS DO SNI <i>MTI-G</i> COM AUXILIO DE UMA BANCADA DE CALIBRAÇÃO.....	88
FIGURA 48: DIAGRAMA – TESTE DA TRAJETÓRIA.....	89
FIGURA 49: TRAJETÓRIA USADA PARA APLICAÇÃO DO TESTE DE DESLOCAMENTO	90
FIGURA 50: POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO	91
FIGURA 51: ACELERAÇÕES BRUTAS E FILTRADAS	92
FIGURA 53: (A) SERVOMOTOR E (B) <i>INERTIACUBE3</i> DURANTE O TESTE VERTICAL.....	93
FIGURA 54: VARIÂNCIA DE ALLAN - <i>COLIBRI</i>	96
FIGURA 55: VARIÂNCIA DE ALLAN – <i>INERTIACUBE3</i>	97

FIGURA 56: VARIÂNCIA DE ALLAN – MTI-G™	98
FIGURA 57: TRAJETÓRIA <i>COLIBRI</i> ANTES DAS CORREÇÕES	105
FIGURA 58: TRAJETÓRIA <i>COLIBRI</i> APÓS AS CORREÇÕES.....	106
FIGURA 59: TRAJETÓRIA <i>INERTIACUBE3</i> ANTES DAS CORREÇÕES	107
FIGURA 60: TRAJETÓRIA <i>INERTIACUBE3</i> APÓS AS CORREÇÕES	107
FIGURA 61: TRAJETÓRIA <i>MTI-G</i> ANTES DAS CORREÇÕES	108
FIGURA 62: TRAJETÓRIA <i>MTI-G</i> APÓS AS CORREÇÕES.....	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CATEGORIA DE ACELEROMETROS DE ACORDO COM A DERIVA	43
TABELA 2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - COLIBRI™	75
TABELA 3: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – <i>INERTIACUBE3™</i>	77
TABELA 4: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - <i>MTI-G™</i>	78
TABELA 5: EXPERIMENTOS REALIZADOS	81
TABELA 6: RUÍDO DE QUANTIZAÇÃO	99
TABELA 7: <i>RANDOM WALK</i>	99
TABELA 8: <i>DRIFT RATE RAMP</i>	99
TABELA 9: <i>BIAS INSTABILITY</i>	100
TABELA 10: TAXA DE <i>RANDOM WALK</i>	100
TABELA 11: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – <i>COLIBRI</i>	101
TABELA 12: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – <i>INERTIACUBE3</i>	102
TABELA 13: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – <i>MTI-G</i>	102
TABELA 14: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (<i>COLIBRI</i>)	103
TABELA 15: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (<i>INERTIACUBE3</i>)	104
TABELA 16: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (<i>MTI-G</i>)	104
TABELA 17: DISTÂNCIA ENTRE O PONTO INICIAL E FINAL	109
TABELA 18: DESLOCAMENTOS VERTICAIS - <i>COLIBRI</i>	110
TABELA 19: DESLOCAMENTOS VERTICAIS - <i>INERTIACUBE3</i>	111

LISTA DE SIGLAS

AHRS	-	<i>Attitude and Heading Reference System</i>
AUV	-	Veículo submarino autônomo (<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>)
CEMADEN	-	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CIO	-	Origem Convencional Internacional (<i>Conventional International Origin</i>)
CSI	-	Conjunto de Sensores Inerciais
GPS	-	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
IERS	-	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
ITRF	-	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	-	<i>International Terrestrial Reference System</i>
MEMS	-	Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (<i>Microelectromechanical Systems</i>)
MMQ	-	Método dos mínimos quadrados
MMS	-	Sistema Autônomo Terrestre
SLR	-	<i>Satellite Laser Range</i>
SNI	-	Sistema de Navegação Inercial
UAV	-	Veículo aéreo não tripulado (<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
UMI	-	Unidade de Medição Inercial
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
URI	-	Unidade De Referência Inercial
UTFPR	-	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VLBI	-	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

- \vec{a} - Aceleração
- A - Matriz das derivadas parciais do modelo funcional em relação aos parâmetros
- b - Deriva
- B - Matriz das derivadas parciais do modelo funcional em relação às observações
- B - Coeficiente *bias Instability*
- C_{cr} - Compensação da rotação da Terra
- \vec{F} - Força resultante
- \vec{g} - Gravidade
- K - Constante gravitacional local
- K - Coeficiente da taxa de *random walk*
- L_A - Vetor das observações ajustadas
- L_b - Vetor das observações
- I_f^{up} - Sinal de saída quando o eixo de sensibilidade está apontado para cima
- I_f^{down} - Sinal de saída quando o eixo de sensibilidade está apontado para baixo
- m - Massa
- N - Pontos consecutivos de dados medidos
- Q - Coeficiente *random walk*
- Q_z - Coeficiente de ruído de quantização
- R - Coeficiente do ruído de *drift rate ramp*
- R - Raio da terra
- s - Erro de fator de escala
- t_0 - Tempo de amostragem
- T - Tempo de um agrupamento
- \vec{v} - Velocidade
- V - Vetor dos resíduos
- W - Vetor das correções

- X - Vetor das correções dos parâmetros aproximados
- X_A - Vetor das observações ajustadas
- X_0 - Vetor dos parâmetros aproximados
- α - Ângulo entre a gravidade local e o eixo x do acelerômetro
- β - Ângulo entre a gravidade local e o eixo y do acelerômetro
- γ - Ângulo entre a gravidade local e o eixo z do acelerômetro
- η - Ruído
- θ - Erro de não-ortogonalidade
- Π - Taxa de saída instantânea de sensores inerciais
- $\bar{\Pi}_k$ - Taxa de saída instantânea de um agrupamento médio
- σ - Desvio padrão
- σ^2 - Variância
- $\vec{\Omega}_r$ - Velocidade angular da Terra
- ϕ - Latitude

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral.....	20
1.2.2 Objetivos Específicos.....	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 DESASTRES NATURAIS	21
2.1.1 Inundações	22
2.1.2 Plataformas Flutuantes	23
2.2 NAVEGAÇÃO INERCIAL	25
2.2.1 Fundamentos de uma Navegação Inercial	25
2.2.2 Classificação dos Sistemas Inerciais	26
2.2.2.1 Sistema de Plataforma Estável	26
2.2.2.2 Sistema de Plataforma Analítica	27
2.2.3 Denominações dos Sistemas Inerciais	29
2.2.4 Classificação de Sistemas Inerciais de Acordo com a Precisão	30
2.2.5 Sistemas de Referência.....	31
2.2.5.1 Referencial Inercial ou Quase Inercial (i)	31
2.2.5.2 Referencial Terrestre (e)	32
2.2.5.3 Referencial de Navegação ou de Nível Local (n):	33
2.2.5.4 Referencial dos Eixos dos Sensores ou do Corpo ou da Plataforma (b):	34
2.2.6 Inicialização de um Sistema Inercial.....	34
2.2.7 Instrumentação do Referencial	35
2.3 SISTEMAS INERCIAIS BASEADOS NA TECNOLOGIA MEMS	36
2.3.1 Acelerômetros MEMS	40
2.4 ERROS DOS SENSORES INERCIAIS MEMS	41

2.4.1 Erros Sistemáticos	42
2.4.1.1 Deriva	42
2.4.1.2 Erro de Fator de Escala (<i>Input Sensitivity</i>)	44
2.4.1.3 Erro de Não-Ortogonalidade	44
2.4.1.4 Outros Erros	45
2.4.2 Erros Aleatórios	46
2.4.2.1 Ruídos	47
2.5 DETERMINAÇÃO E MODELAGEM DOS ERROS DOS ACELERÔMETROS ..	48
2.5.1 Calibração – Erros Sistemáticos	48
2.5.1.1 Método de Calibração Seis Posições	49
2.5.1.2 Método de Calibração Multi-Posições e Multi-Posições Modificado	51
2.5.2 Modelagem Estocástica	59
2.5.2.1 Variância de Allan	60
2.5.2.1.1 Cálculo da Variância de Allan	61
2.5.2.1.2 Estimativa de Ruídos a partir da Variância de Allan	62
2.6 ESTIMATIVA DE DESLOCAMENTOS POR MEIO DE ACELERAÇÕES	67
2.6.1 Integração	67
2.6.2 Métodos de Integração Digital	67
2.6.3 Filtragem	70
3 METODOLOGIA	73
3.1 EQUIPAMENTOS	73
3.1.1 Colibri™	73
3.1.2 <i>InertiaCube3</i> ™	75
3.1.3 <i>MTi-G</i> ™	77
3.1.4 Bancada de Calibração Giroscópica	79
3.2 MÉTODOS	81
3.2.1 Experimentos para Estimativa/Determinação dos Erros Aleatórios e Sistemáticos	81
3.2.1.1 Experimento 1 - Variância de Allan	81
3.2.1.2 Experimento 2 - Calibração pelo Método Multi-Posições Modificado	84

3.2.2 Testes de Verificação	89
3.2.2.3 Experimento 3 - Trajetória com GPS e Acelerômetros.....	89
3.2.2.4 Experimento 4 - Deslocamento Vertical	93
4 RESULTADOS.....	95
4.1 EXPERIMENTO 1 - VARIÂNCIA DE ALLAN	95
4.1.1 Ruídos	98
4.2 EXPERIMENTO 2 - CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES	100
4.3 EXPERIMENTO 3 - TRAJETÓRIA COM GPS E ACELERÔMETROS	105
4.4 EXPERIMENTO 4 - DESLOCAMENTO VERTICAL.....	110
5 CONCLUSÃO	112
REFERÊNCIAS.....	117
APÊNDICE 1 – ATITUDES PARA CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES	123
APÊNDICE 2 – VARIÂNCIA DE ALLAN.....	125

1 INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado das cidades resulta em ocupações irregulares em áreas sujeitas a inundações. Da mesma forma, a exploração inadequada dos recursos naturais forma um ambiente propício para a ocorrência de desastres naturais, como enchentes e inundações. De acordo com Sausen e Narvaes (2013) os eventos de inundação são responsáveis por quase 55% de todos os desastres naturais registrados e aproximadamente 72,5% do total de perdas econômicas ao redor do mundo. Segundo Baggio Filho (2012) o Brasil está entre os países mais afetados por inundações e desastres naturais do mundo, sendo que mais de 60% destes eventos ocorrem nas regiões sul e sudeste do Brasil.

Diante de tais eventos, o Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH) está desenvolvendo um Projeto de Monitoramento de Desastres Naturais. Este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de sistemas para contribuir com o monitoramento regional de movimento de água e de terra. O monitoramento de massas de água será feito a partir de plataformas flutuantes eulerianas de baixo custo. Estas foram desenvolvidas por Viski (2012), a fim de obter informações com relação à variação do nível de massas de água. Com os protótipos até então desenvolvidos, foram realizados testes satisfatórios utilizando receptores GPS.

Para aumentar a qualidade e a confiabilidade das medidas, é possível integrar na plataforma outros sensores, como os sensores inerciais. Segundo Lima (2005) as características de operação dos sensores inerciais e GNSS são distintas e complementares. O GPS necessita de sinais de satélites sujeitos a interferências, enquanto o inercial é um sistema autocontido, ou seja, independe de sinais externos. Já o inercial acumula erros de observação de forma contínua, enquanto o GPS fornece medições com erros aleatórios, dentro de um certo limite, ao longo do tempo e que pode ser determinado. Desta forma, a integração dos dois sistemas permite minimizar suas deficiências e maximizar o desempenho final no posicionamento.

De acordo com Durão (2009), um sistema inercial de alto desempenho apresenta duas características que normalmente comprometem a sua utilização, a saber, o alto custo (maior que U\$ 300.000,00), e uma regulamentação rígida, que restringe as aplicações desses sistemas. Uma alternativa de baixo custo com

crecentes aplicação são os sistemas inerciais baseados em Sistemas MicroEletroMecânicos (MEMS – *MicroElectroMechanical Systems*). Estes possuem as vantagens de apresentarem um menor custo, dimensões reduzidas e de fácil acesso ao público civil. Entretanto, as medidas dos sensores inerciais MEMS são fortemente afetadas por diferentes fontes de erros.

Quando se almeja o emprego de sensores inerciais MEMS com resultados razoáveis, é necessário o conhecimento de parâmetros de erros dos sensores. Os acelerômetros e giroscópios são afetados por erros dos tipos sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos são causados por imperfeições físicas na construção do sistema, sendo o principal erro conhecido como deriva. Os erros aleatórios são causados por ruídos de diversas fontes.

Métodos de calibração e testes específicos permitem estimar os erros dos sensores inerciais. Tradicionalmente, as calibrações costumam ter um custo bastante elevado, o que impossibilita a sua realização, em especial para sistemas de baixo custo. Desta forma, diversas técnicas para modelagem e análise de parâmetros de erros vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de viabilizar e simplificar a sua execução, conforme pode ser verificado em Aggarwal *et al.* (2010), Nieminem, *et al.* (2010); Fang *et al.* (2014); Shen *et al.* (2010), dentre outros.

Uma vez que um sistema inercial, futuramente, será integrado ao Projeto de Monitoramento de Desastres Naturais, o presente trabalho teve como foco a realização e análise de testes para a determinação e modelagem de parâmetros de erros característicos de sensores inerciais de baixo custo. Foi executada uma metodologia para calibração e modelagem de erros acessível e relativamente simplificada. O sistema inercial será aplicado com o objetivo de detectar variações súbitas do nível da água, ou seja, apenas as componentes relativas às velocidades lineares. Desta forma, foram analisados os parâmetros de erro dos acelerômetros.

1.1 JUSTIFICATIVA

O projeto “*Desenvolvimento de Sistemas de Monitoramento de Massas Aplicados na Prevenção de Desastres Naturais*”, nº do projeto 483044/2013-0, encontra-se em execução no LAGEH. Este tem como principal objetivo o desenvolvimento, avaliação e implementação de sistemas para o monitoramento de massas de terra e da variação do nível de massas de água. Este projeto destina-se a áreas sujeitas a inundações e enchentes, e desta forma, visa contribuir com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

O projeto de sistemas de monitoramento conta com o apoio financeiro do CNPq e possibilita a participação de alunos de graduação e pós-graduação. Dentre seus subprojetos, cita-se o desenvolvimento de um sistema que visa o monitoramento da variação do nível de massas de água, de baixo custo e de preferência em tempo real, com o emprego de plataformas Eulerianas.

O principal esforço deste projeto é justificado por causa da ausência de sistemas de alerta no Brasil. Até o presente momento não se verificou trabalhos de monitoramento em tempo real para prevenção de riscos e desastres naturais no Brasil. A viabilidade de um sistema de alerta depende do desenvolvimento tecnológico nacional e de baixo custo. Assim, com a utilização de plataformas flutuantes para o monitoramento das massas de água em áreas sujeitas a inundações, pretende-se contribuir com esta questão.

A inclusão do sensor inercial na plataforma visa complementar as medições, uma vez que podem ocorrer perdas de sinal durante um rastreamento GPS, enquanto o sistema inercial continua a registrar os dados. Isto possibilita continuar o cálculo da posição mesmo sem a recepção do sinal GPS. Desta forma, a investigação da qualidade do sensor inercial é essencial, uma vez que, a partir do conhecimento de sua precisão será determinada a confiabilidade das informações medidas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Para a realização deste trabalho estabeleceu-se como objetivo geral o de realizar procedimentos para determinação de erros de uma tríade de acelerômetros de um sistema inercial de baixo custo baseado na tecnologia MEMS, visando ao seu emprego futuro em uma plataforma flutuante desenvolvida pelo laboratório LAGEH. A metodologia empregada na calibração desta tríade de acelerômetros também foi testada em outros dois sistemas inerciais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver algoritmos para o cálculo dos parâmetros de erros (deriva, erro de fator de escala e erro de não-ortogonalidade);
- b) Determinar os principais erros sistemáticos, tais como deriva, erro de fator de escala e erro de não-ortogonalidade dos acelerômetros;
- c) Modelar os erros aleatórios dos acelerômetros.
- d) Realizar testes para a verificação dos parâmetros de erros calculados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão apresentados alguns tópicos importantes para o desenvolvimento e compreensão da metodologia a ser aplicada. Inicialmente serão abordados os principais aspectos relacionados a desastres naturais e os sistemas usuais de monitoramento, principalmente os associados às inundações. Posteriormente, apresentam-se os princípios básicos da navegação inercial, os principais sensores e os referenciais envolvidos. São apresentados os principais erros existentes em sensores inerciais e alguns métodos para modelá-los. Por fim, abordam-se alguns procedimentos para o cálculo do deslocamento com base na observação de acelerações em um dado referencial.

2.1 DESASTRES NATURAIS

Um desastre natural é, por definição, qualquer evento natural extremo que apresente risco à sociedade, em geral, causando perdas humanas e danos materiais (TOBIN e MONTZ, p. 5-6, 1997). Na literatura são encontradas diversas propostas de categorização de desastres naturais. Ainda segundo Tobin e Montz (p. 7-29, 1997), uma possível forma de categorização pode ser realizada através do efeito geofísico que origina o desastre, conforme segue:

- Hidrológicos: Inundações, estiagem;
- Meteorológicos: Furações, tornados, nevascas, geadas;
- Geológicos: Vulcões, *tsunamis*, escorregamentos;

Países em desenvolvimento situados entre os trópicos, como Brasil, Colômbia, Venezuela, Índia, Malásia e outros, apresentam clima tropical úmido ou subtropical, caracterizado por mais de 2.000 mm de chuva por ano e altas temperaturas. As áreas urbanas dos países em desenvolvimento apresentam alta concentração populacional em pequenas áreas, drenagem de águas pluviais deficientes e ações e instrumentos de gerenciamentos de risco insuficientes (MAKSIMOVIC, 2001).

De acordo com dados da ONU, no Brasil os eventos registrados com maior frequência são estiagem/seca na região nordeste do país e alagamentos bruscos e deslizamentos de terra na região sul e sudeste.

Segundo um comunicado social publicado pelo IBGE (2014), foi realizado um estudo inédito para a investigação de questões específicas sobre o planejamento urbano voltado à prevenção, redução e gestão de riscos e desastres no Brasil. Este estudo mostrou que apenas 33% dos municípios brasileiros possuem algum tipo de instrumento de gerenciamento de risco. Entre os anos de 2008 e 2012, apenas as enchentes deixaram mais de 1,4 milhão de desabrigados em todo o Brasil, com um total de 2.065 municípios atingidos por enchentes e enxurradas.

2.1.1 Inundações

Segundo Kobiyama *et al.* 2006 (p. 45), a inundação é o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele. Os rios são compostos pelo leito menor, por onde a água escoar a maior parte do tempo, e pelo leito maior (FIGURA 1). Segundo Tucci (2003, p. 29), as inundações ocorrem quando o nível da água atinge o leito maior. Em áreas urbanizadas, quando a população ocupa o leito maior os impactos são frequentes.



FIGURA 1: LEITOS DE UM RIO
FONTE: TUCCI E BERTONI (2003)

Segundo Maksimovic (2001), devido ao grande número de fenômenos meteorológicos envolvidos e a interdependência de processos físicos, a capacidade de se prever uma inundação é muito pequena. Castro (1999, p. 7) define as inundações como sendo eventos súbitos, isto é, caracterizam-se por uma rápida evolução do processo. A velocidade com que o nível da água aumenta depende de diversos fatores como: volume de precipitação, tamanho da bacia hidrográfica, relevo, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, dentre outros.

Durante uma inundação, o nível da água pode variar de alguns centímetros a vários metros em um período de horas. Em 2013 na República Checa, o nível do Rio Vltava chegou a aumentar 15 centímetros por hora, o qual foi considerado uma das piores inundações da Europa Central (BBC, 2013). De acordo com dados da Defesa Civil, as fortes chuvas que causaram diversos prejuízos no sul do Brasil em 2014, fez com que o nível do Rio Taquari no estado do Rio Grande do Sul subisse em média 35 cm por hora. Porém, variações do nível da água com magnitudes entre 2 a 3 centímetros por hora já são consideradas preocupantes, conforme Barnes-Svarney e Svarney (1999).

Inundações causadas pelo rompimento ou falhas técnicas em barragens, em geral, causam danos de maior relevância. Uma das maiores catástrofes já registradas ocorreu na cidade de Johnstown (EUA) em 1889, após o rompimento de uma barragem devido a fortes chuvas. Em questão de poucos minutos o nível do rio aumentou 18 metros, causando a morte de 2.209 pessoas (MUNSART, 1997, p. 84).

2.1.2 Plataformas Flutuantes

Os métodos mais utilizados para o monitoramento do nível dos corpos de água podem ser de natureza orbital ou terrestre. Métodos orbitais, tais como o emprego de imagens de satélites InSAR, permitem avaliar os danos causados pelas inundações (SAUSEN e NARVAES, 2013). Alguns métodos terrestres, como marégrafos, réguas maregráficas, sistemas transdutores de pressão, sistemas acústicos e plataformas flutuantes (boias), permitem medir o nível instantâneo da água.

As boias possibilitam incluir em sua estrutura diversos sensores, como por exemplo, receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), sistemas inerciais, sensor de temperatura e de qualidade da água, dependendo do fim a que se destina. Observações da dinâmica da água a partir de boias podem ser realizadas por meio de técnicas lagrangeanas e eulerianas (FINKL, 2013). A primeira tem por finalidade a determinação de trajetórias descritas por correntes marinhas ou campos de velocidade. Já a plataforma euleriana é desenvolvida para medir a velocidade de ascensão da água em um determinado ponto utilizando boias de amarração, que são fixadas ao fundo do oceano ou rio em um local de coordenadas conhecidas.

Existem atualmente no mercado diversas opções de boias comerciais. Elas integram os dados provindos de posicionamento GPS e de sensores inerciais. Estas boias possuem um alto custo de aquisição, importação e manutenção. A maioria delas possui valores brutos que variam de € 20.000,00 à € 100.000,00.

O sistema inercial analisado nesta pesquisa será futuramente integrado com o sistema GPS em uma plataforma euleriana desenvolvida no LAGEH (FIGURA 2). Esta é uma plataforma de amarração construída de forma mecânica, composta por uma estrutura flutuante, ligada por hastes ao seu habitáculo. Esta plataforma possui um cabo de amarração que pode ser ancorado ou preso no fundo da massa de água (VISKI, 2012).



FIGURA 2: PLATAFORMA EULERIANA DE AMARRAÇÃO

FONTE: VISKI (2012)

2.2 NAVEGAÇÃO INERCIAL

A inércia é a propensão dos corpos para manter constante a translação e velocidade de rotação, a não ser quando perturbado por forças ou torques externos (GREWAL e ANDREWS, 2007). A Navegação Inercial pode ser definida como o processo de determinação de deslocamentos e dos movimentos de atitude a partir da medida das suas acelerações em direções lineares e da velocidade angular. Estas medidas são feitas por meio de instrumentos que mecanizam as leis do movimento de Newton.

De acordo com Freitas (1980), uma vez conhecidas as condições iniciais de velocidade e posição de um dado corpo, sujeito a determinada aceleração, pode-se conhecer do mesmo, em qualquer instante, a velocidade e posição em um referencial adequado.

2.2.1 Fundamentos de uma Navegação Inercial

Um sistema de navegação inercial é essencialmente constituído de acelerômetros, giroscópios e dispositivos que permitem o processamento das informações. Os acelerômetros medem acelerações. Estes dispositivos, em geral, são instalados na forma de uma tríade ortogonal, sendo as acelerações medidas com relação a cada um dos eixos. Já os giroscópios são dispositivos que permitem obter os ângulos de rotação para a orientação do sistema. Assim como nos acelerômetros, os giroscópios formam uma tríade ortogonal.

De acordo com a 1ª Lei do movimento de Newton, também conhecida como Lei da Inércia:

“Se a força resultante que atua sobre um ponto material é zero, este ponto permanece em repouso (se estava originalmente em repouso) ou se move ao longo de uma reta com velocidade constante (se originalmente estava em velocidade constante)”. (BEER; JOHNSTON, 1980, p. 116).

Já a 2ª Lei do movimento de Newton, também chamada de Princípio Fundamental da Dinâmica, estabelece que:

“Um ponto material submetido a uma força não nula adquire uma aceleração com módulo proporcional ao módulo da força e na mesma direção e sentido desta”. (BEER; JOHNSTON, 1991, p. 116).

Isto significa que a aceleração \vec{a} de uma massa m é proporcional à resultante das forças aplicadas em \vec{F} , conforme equação 1.

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (1)$$

Ao integrar numericamente a aceleração em relação ao tempo, são obtidos os valores referentes à velocidade do sistema de navegação inercial. Integrando esta velocidade em relação ao tempo resulta no deslocamento. As medidas angulares também devem ser integradas para que sejam fornecidas as informações referentes à atitude da plataforma (LIMA, 2005).

2.2.2 Classificação dos Sistemas Inerciais

Os princípios básicos da navegação inercial aplicam-se a todos os tipos de sistemas de navegação inercial, variando apenas o modo de implementação dos sinais de saída. Os sistemas inerciais podem ser classificados em dois tipos: sistemas de plataforma estável e de plataforma analítica.

2.2.2.1 Sistema de Plataforma Estável

Também conhecido como *Gimbaled System*, neste sistema os sensores são montados sobre uma plataforma estável e são matematicamente isolados do movimento de rotação. Segundo Titterton e Weston (p. 189, 2004), o sistema que se desenvolveu na década de 50 ainda é muito utilizado para aplicações onde são necessárias estimativas acuradas dos dados inerciais, como no caso de navios e

submarinos. De acordo com Grewal e Andrews (2007, p. 53), os Sistemas de Plataforma Estável possuem três graus de liberdade e são isolados do movimento de rotação através de anéis rotativos com juntas do tipo cardan (*gimbals*), conforme figura 3.

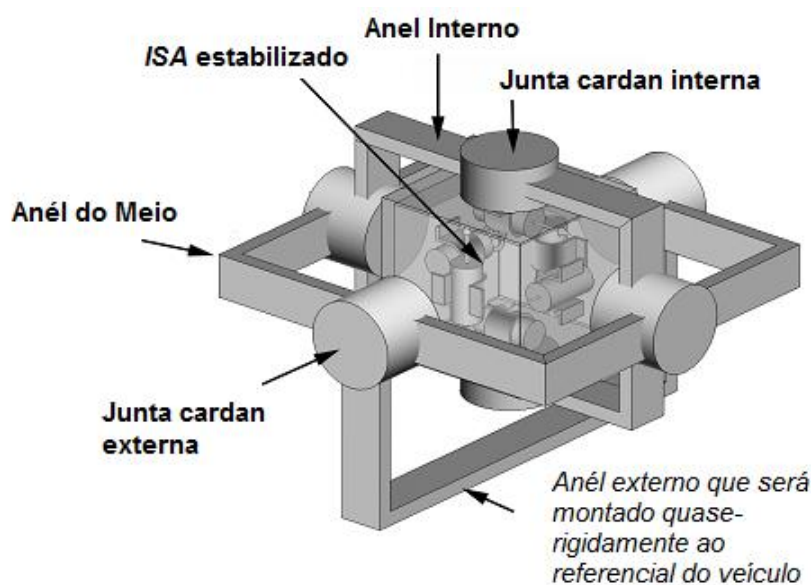


FIGURA 3: SISTEMA INERCIAL DE PLATAFORMA ESTÁVEL
FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015).

2.2.2.2 Sistema de Plataforma Analítica

O Sistema de Plataforma Analítica é também chamado de *Strapdown System*. Este tipo de plataforma não apresenta o grande número de peças e a complexidade mecânica das convencionais plataformas estáveis (TITTERTON e WESTON, 2004). O sistema de plataforma analítica não é isolado de rotações do veículo no qual será montado, mas é rigidamente montado a sua estrutura. A figura 4 ilustra um sistema de plataforma analítica composto por uma tríade de giroscópios e acelerômetros.

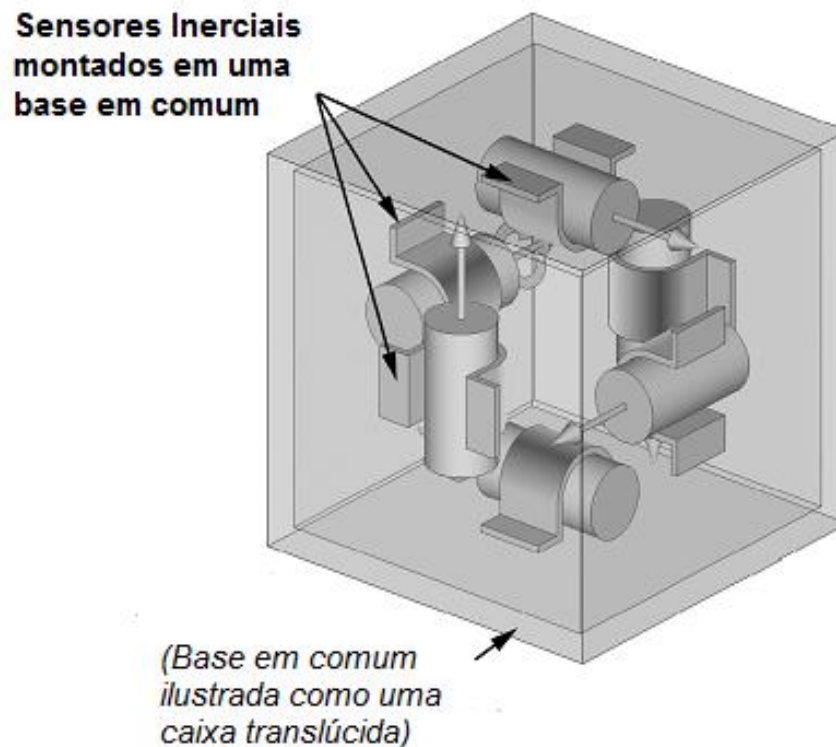


FIGURA 4: SISTEMA STRAPDOWN
 FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015).

Ao contrário dos sistemas de plataformas estabilizadas, os *gimbals* são substituídos por um software que calcula os sinais de saída em um referencial estabilizado. Estes sinais são integrados de modo a fornecer as atualizações de velocidade e posição. Apesar de requerer um maior esforço computacional, a principal vantagem dos sistemas de plataforma analítica é que estes possuem um custo muito reduzido em relação aos sistemas de plataforma estável.

Por outro lado, dentre as desvantagens dos sistemas de plataforma analítica cita-se o alto custo para a calibração do sistema, pois requer uma mesa de calibração de alta precisão¹.

¹ Neste trabalho, a expressão alta precisão é utilizada para definir uma medição cuja repetibilidade seja considerada elevada.

2.2.3 Denominações dos Sistemas Inerciais

Grewal e Andrews (2007) apresentam as principais denominações para os sistemas inerciais, de acordo com os sensores que os compõem:

Conjunto de Sensores Inerciais – CSI (*Inertial Sensor Assembly – ISA*): é um conjunto de sensores inerciais rigidamente montados em uma base comum, de modo a manter as mesmas orientações relativas (FIGURA 5). Os CSI's utilizados na navegação inercial, geralmente contêm três acelerômetros e três giroscópios. Contudo, alguns CSI's utilizados para fins não geodésicos podem não precisar de todos estes sensores, enquanto outros podem possuir mais de uma tríade de acelerômetros e giroscópios.

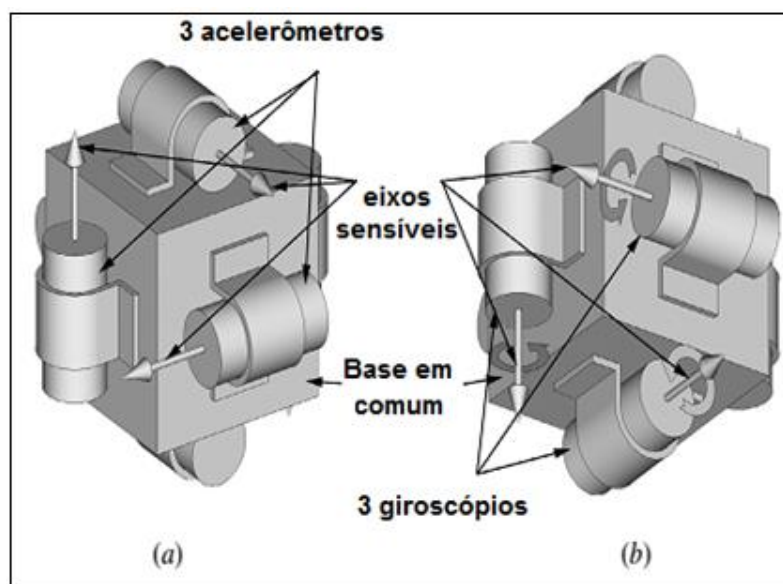


FIGURA 5: COMPONENTES DE UM CSI VISTOS (A) DO ALTO-FRENTE E (B) DE TRÁS-BAIXO
 FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015).

Unidade De Referência Inercial – URI (*Inertial Reference Unit – IRU*): se refere a um sistema composto por uma tríade de giroscópios, geralmente utilizado para obter apenas informações de atitude.

Unidade de Medição Inercial – UMI (*Inertial Measurement Unit – IMU*): é composta de um CSI e é associado a componentes eletrônicos. Estes componentes eletrônicos servem para dar suporte à calibração e para o controle do CSI. A eletrônica de apoio também pode incluir controle térmico ou compensação, e para o

condicionamento e controle dos sinais de entrada e saída. A UMI pode também incluir um processador.

Sistema de Navegação Inercial – SNI (*Inertial Navigation System – INS*):

consiste de uma UMI e outros componentes como: fontes de alimentação e/ou de condicionamento de energia, interfaces de usuário e/ou interfaces de dados digitais para as funções de orientação e controle do veículo, e computador de bordo. Esses últimos calculam a gravidade e processam os sinais de saídas dos acelerômetros e giroscópios da UMI, mantendo uma estimativa da posição de seu CSI.

2.2.4 Classificação de Sistemas Inerciais de Acordo com a Precisão

Não existe uma definição universalmente aceita de sensores inerciais de qualidade alta, média e baixa. De acordo com Groves (2008, p. 98), com exceção da tecnologia empregada em mísseis balísticos intercontinentais, os sensores inerciais podem ser agrupados em cinco categorias: marinhos, aviação, intermediários, táticos e automotivos.

- **Marinhos:** são usados em navios, submarinos e algumas naves espaciais. Podem custar mais de US\$ 1 milhão ou € 1 milhão, e oferecem uma solução com deriva de navegação de menos de 1,8 km por dia. Os primeiros sistemas com esse nível de desempenho eram grandes, com um diâmetro de cerca de um metro; os sistemas atuais são muito menores.
- **Aviação:** são usados em aviões comerciais e militares. Eles custam cerca de US \$ 100.000 ou € 100.000 e têm um tamanho padrão de 178 × 178 × 249 milímetros.
- **Intermediários:** usados em aviões de pequeno porte e em helicópteros. Possuem valores em torno de US\$/€ 20,000 a US\$/€ 50,000.
- **Táticos:** proporcionam uma solução útil de navegação independente por apenas alguns minutos. No entanto, uma solução de navegação precisa de longo prazo pode ser obtida através da sua integração com um sistema de posicionamento, tal como GPS. Estes sistemas normalmente custam entre

US\$/€ 5.000 a US\$/€ 20.000. Em geral, são utilizados em armas guiadas e veículos aéreos não tripulados (UAVs). A maioria ocupa menos do que um litro de volume.

- Automotivos: tendem a ser vendidos como acelerômetros e giroscópios individuais. Não são precisos o suficiente para navegação inercial, mesmo quando integrado com outros sistemas de navegação, mas podem ser usados em um AHRS (*Attitude and Heading Reference System*). Normalmente são usados em pedômetros, suspensão ativa e *airbags*. Acelerômetros individuais podem custar em torno de um dólar ou euro, enquanto que giroscópios custam cerca de US\$/€ 10. Os sensores individuais são tipicamente pequenos e ocupam poucos centímetros cúbicos de volume. Às vezes, os mesmos sensores inerciais MEMS são vendidos na categoria automotiva sem calibração e na categoria tática com calibração.

2.2.5 Sistemas de Referência

Os sistemas de referência são utilizados para referenciar ou localizar um determinado ponto ou veículo no espaço. A navegação inercial é realizada por meio da definição de diversos sistemas de referência. Na sequência, são apresentados os principais referenciais envolvidos no posicionamento por sistemas inerciais.

2.2.5.1 Referencial Inercial ou Quase Inercial (i)

De acordo com Jekeli (2001, p. 3), este é o referencial mais fundamental da Geodésia. O Referencial Inercial é definido como um sistema onde um corpo em repouso (ou em movimento retilíneo uniforme) permanecerá em repouso (ou em movimento retilíneo uniforme) uma vez que não há forças atuando sobre o corpo. Isto implica em dizer que o referencial inercial é um referencial onde a Primeira Lei do Movimento de Newton (seção 2.2.1) é atendida.

Ainda segundo Jekeli (2001, p. 3 - 5), na prática, um Referencial Inercial é apenas uma abstração, uma vez que qualquer referencial encontra-se no sistema solar. Isto significa que os referenciais são afetados por um campo gravitacional que possuem gradientes que variam espacialmente.

A partir de modificações nas Leis de Newton, define-se um chamado Referencial Quase-Inercial. Este referencial com origem no centro da Terra, mas que não rotaciona em torno do Sol, é considerado "praticamente inercial", uma vez que, em termos relativísticos, o campo gravitacional do sistema solar é relativamente fraco, e desta forma, a dinâmica newtoniana clássica é válida.

Em um Referencial Inercial ou Quase-Inercial, os eixos deste sistema são definidos conforme abaixo:

- Origem: no centro de massa convencional da Terra;
- Eixo X_i : aponta na direção do ponto vernal² convencional;
- Eixo Z_i : coincide com o eixo de rotação convencional da Terra;
- Eixo Y_i : completa o sistema dextrogiro.

2.2.5.2 Referencial Terrestre (e)

Historicamente, o Referencial Terrestre era definido a partir de um *datum* geodésico (JEKELI, p. 6, 2001). Atualmente, o IERS estabeleceu o chamado Sistema Internacional de Referência Terrestre – ITRS (*International Terrestrial Reference System*), realizado a partir de dados laser obtidos por satélites, assim como de outros sistemas como o GPS. Este é materializado pelas coordenadas de observatórios distribuídos pelo globo, conhecido como *International Terrestrial Reference Frame* – ITFR.

² Ponto vernal é o ponto da esfera celeste definido pela intercepção do Sol com o equador celeste, durante a trajetória aparente do sol sobre a eclíptica (projeção da trajetória aparente do Sol sobre a esfera celeste, observada a partir da Terra).

De acordo com Jekeli (2001), o Referencial Terrestre (FIGURA 6), tem sua origem no centro de massa da Terra, com seus eixos coordenados definidos em um sistema polar. O eixo X_e é definido com origem no meridiano médio de Greenwich e que intercepta o eixo Z_e (coincidente com o eixo de rotação médio da Terra) na superfície da Terra na Origem Convencional Internacional (CIO - *Conventional International Origin*). O eixo Y_e define uma longitude igual a zero e completa o sistema dextrogiro.

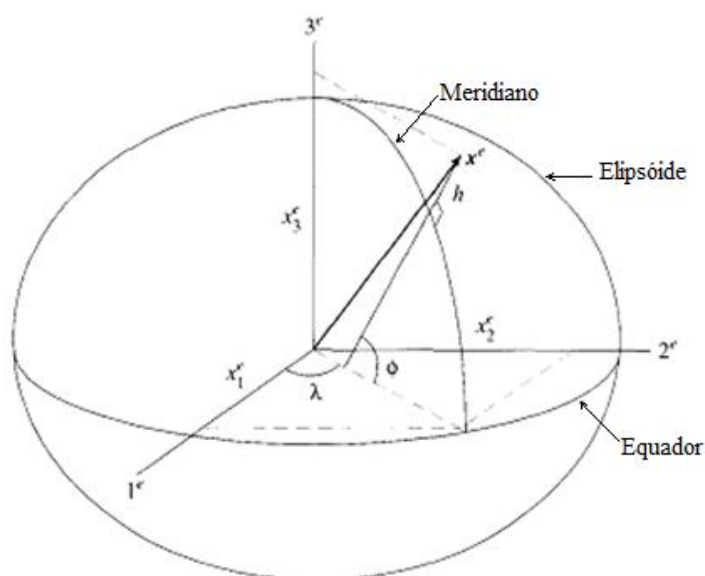


FIGURA 6: REFERENCIAL TERRESTRE
FONTE: JEKELI (2001)

2.2.5.3 Referencial de Navegação ou de Nível Local (n):

Segundo Jekeli (2001), este é um sistema de coordenadas cartesiano, com origem no local do sistema de navegação, onde o eixo Z_n é orientado na direção normal ao elipsóide de referência na direção “para baixo”. O eixo X_n aponta para o norte natural (paralelo à tangente do meridiano), e o eixo Y_n aponta na direção leste natural. Ao invés do sistema Norte-Leste-Baixo (NED – *North-East-Down*), também se pode utilizar o sistema Sul-Leste-Cima (*South-East-Up*). A figura 7 representa o Referencial de Navegação no sistema NED.

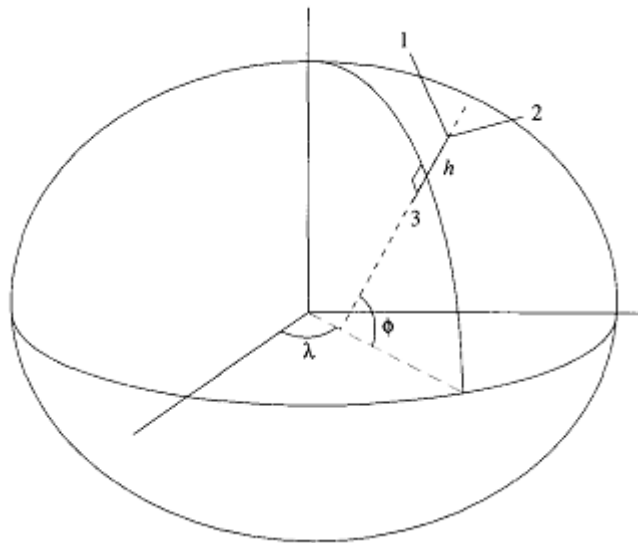


FIGURA 7: REFERENCIAL DE NAVEGAÇÃO - NED
 FONTE: JEKELI (2001)

2.2.5.4 Referencial dos Eixos dos Sensores ou do Corpo ou da Plataforma (b):

Possui origem no centro do conjunto de sensores. Os eixos deste referencial, geralmente são orientados com o eixo X_b para a frente, o Y_b orienta-se para a direita e o eixo Z_b orienta-se para baixo. Em um sistema inercial, cada conjunto de acelerômetros e giroscópios possui seu próprio sistema de coordenadas (Jekeli, 2001).

2.2.6 Inicialização de um Sistema Inercial

O processo de atribuição de coordenadas, velocidade e orientação da navegação inercial com relação ao referencial de navegação denomina-se inicialização. Segundo Freitas (1980), uma plataforma espacialmente estabilizada de alta precisão (seção 2.2.7) possui um sistema de auto-alinhamento, definido a partir de constantes físicas como a gravidade e o eixo de rotação da Terra. Para as

demais plataformas é necessária a realização de procedimentos que determinem estes valores iniciais.

A determinação de coordenadas iniciais é realizada a partir de pontos na superfície da Terra com coordenadas conhecidas. Uma vez que a navegação inercial inicia-se com o equipamento em repouso, a velocidade inicial pode ser considerada nula.

De acordo com Lima (2005), a orientação da plataforma pode ser realizada por procedimentos conhecidos como Alinhamento Inicial (*Course Alignment*), que fornece uma orientação rápida em relação ao referencial de navegação, a partir de forças específicas e velocidades angulares obtidas do próprio sistema inercial. A segunda parte, correspondente ao Alinhamento Fino (*Fine Alignment*), compensa os desvios dos sensores por meio de procedimentos, como o Filtro de Kalman.

2.2.7 Instrumentação do Referencial

De acordo com Freitas (1980), um sistema inercial pode ser classificado de acordo com a sua inicialização, e conseqüentemente, a forma como o referencial é instrumentado:

Plataforma Inercial Instrumentando Referencial Estabilizado Espacialmente: Instrumenta um referencial com atitude constante em relação ao espaço. É adequado para navegação no espaço, onde deslocamentos não se processam em relação a corpos girantes.

Plataforma Inercial Instrumentando Referencial De Nível Local: É necessário aplicar torques para alinhar os eixos da plataforma. Dois eixos da plataforma devem ser alinhados em um plano vertical e o terceiro eixo deve ser alinhado com a vertical local. Segundo Freitas (1980), “Se um dos eixos é alinhado para o norte e o outro

para leste, então, através da acumulação dos deslocamentos desde uma posição inicial, pode-se conhecer a latitude, longitude e altitude do veículo”.

Uma vez que a plataforma está em repouso na superfície da Terra, esta fica sujeita à rotação, sendo necessária a aplicação de compensações contínuas para que a plataforma continue nivelada. Esta compensação é dada por:

$$C_{\Omega T} = C_{\Omega T}(\vec{\Omega}_T, \phi) \quad (2)$$

onde $\vec{\Omega}_T$ é a velocidade angular da Terra e ϕ a latitude do ponto onde se encontra a plataforma.

Da mesma forma, se a plataforma se desloca com velocidade \vec{v} relativamente à Terra de um ponto ao outro, devido à curvatura terrestre deve-se aplicar uma compensação dada por:

$$C_v = \frac{v}{R} \quad (3)$$

Plataforma Inercial Instrumentando Referencial Analiticamente: Os eixos do referencial são instrumentados a partir de giroscópios instalados diretamente sobre o veículo. Quando o veículo varia em determinada direção, um torque correspondente é aplicado sobre o eixo de rotação do giroscópio. Ainda segundo Freitas (1980), este torque é proporcional à taxa de variação do momento angular, que é proporcional à velocidade angular do rotor, e a partir desta é possível determinar os deslocamentos angulares. Conhecidos os deslocamentos angulares, o referencial instrumentado pode ser relacionado com outro.

2.3 SISTEMAS INERCIAIS BASEADOS NA TECNOLOGIA MEMS

Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos – MEMS (*Microelectromechanical Systems*) é uma tecnologia que pode ser definida como a miniaturização de elementos mecânicos e eletro-mecânicos. Esta miniaturização refere-se tanto às estruturas internas dos dispositivos, quanto aos próprios dispositivos. As dimensões

físicas dos dispositivos MEMS podem variar de muito abaixo de um micrometro até vários milímetros.

Segundo Gad-el-Hak (2005), as estruturas elétricas e mecânicas dos dispositivos MEMS possuem dimensões tão reduzidas que necessitam do auxílio de microscópios para serem visualizadas. A figura 8 mostra um ácaro (aracnídeo com dimensões inferiores ao milímetro), próximo às engrenagens em um dispositivo MEMS.

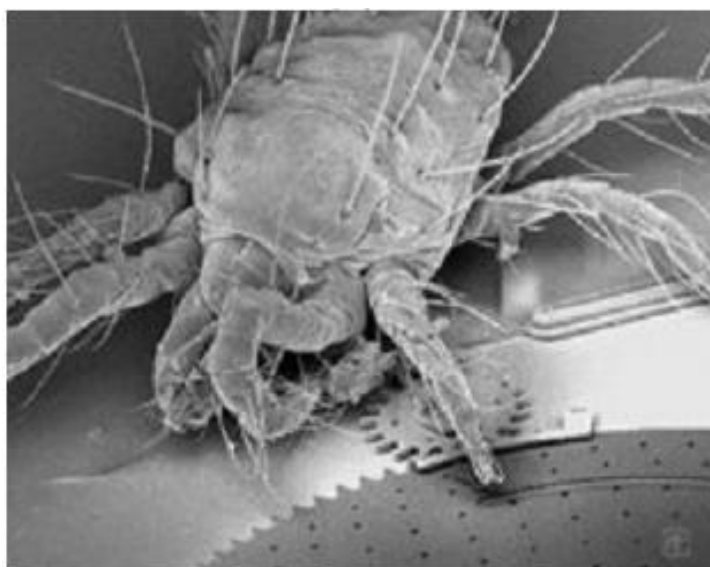


FIGURA 8: ÁCARO EM UM DISPOSITIVO MEMS
FONTE: LIMA, 2005

De acordo com Yazdi, Ayazi e Najafi³ (1998 citado por Lima 2005), os sensores MEMS são formados por partes mecânicas (e.g., rodas dentadas, hastes, travessas, corpos de prova, etc.) integradas com as partes eletrônicas (e.g., circuitos de controle, amplificadores, microprocessadores) em um mesmo substrato cristalino, conforme figura 9.

³ YAZDI, N; AYAZI, F.; NAJAFI, K. **Micromachined Inertial Sensors**. Proceedings of IEEE, vol. 86, n.8, p.1640-1659. IEEE, 1998.

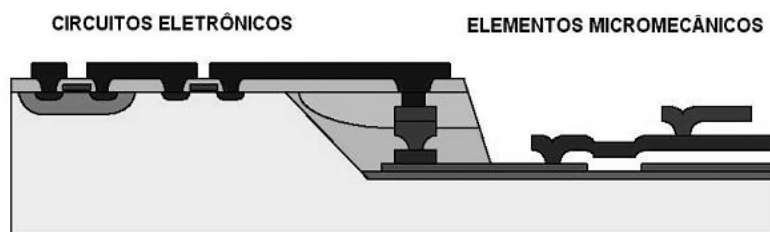


FIGURA 9: SUBSTRATO DE UM DISPOSITIVO MEMS
FONTE: LIMA, 2005

Os dispositivos baseados na tecnologia MEMS possuem tamanho e peso extremamente reduzidos, além de um baixo custo de aquisição. Por estes motivos, atualmente, existe um grande número de aplicações em diversas áreas em que estes dispositivos vêm sendo implementados com sucesso. Dentre elas citam-se: aplicações industriais, em biotecnologia, na medicina, em dispositivos eletrônicos e em sensores inerciais (FIGURA 10).

Os sensores inerciais MEMS, especificamente acelerômetros e giroscópios, estão ganhando cada vez mais aceitação no mercado. Isso se deve ao fato de que estes sensores apresentam um crescente emprego em dispositivos eletrônicos de uso civil como smartphones, controles de videogame e em sensores automotivos.

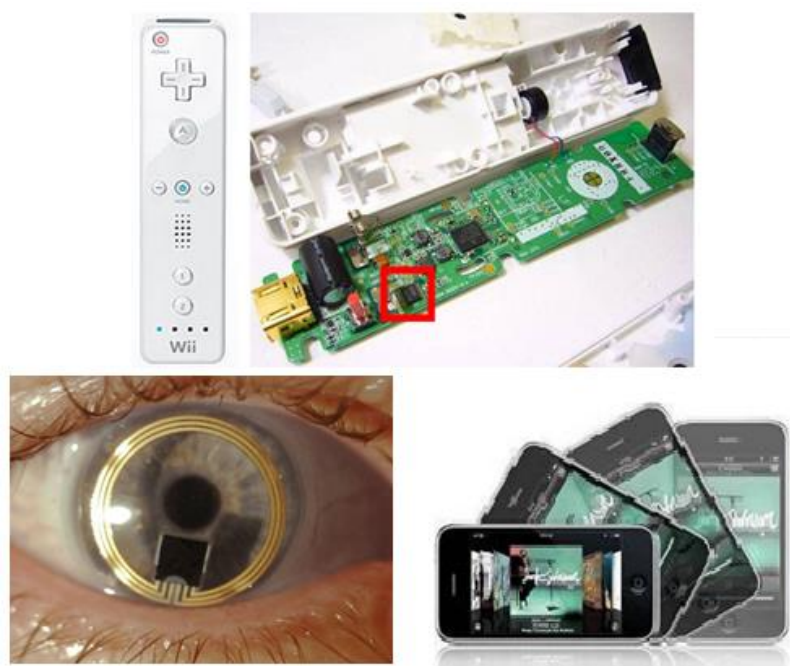


FIGURA 10: APLICAÇÕES SENSOES INERCIAIS MEMS (A) VIDEOGAMES, (B) MEDICINA E (C) SMARTPHONES
FONTE: AGOSTINO, MANZINO E PIRAS (2010)

Além dos setores industriais e automotivos, os sensores inerciais MEMS também podem ser usados em diferentes campos da Geomática (AGOSTINO, MANZINO E PIRAS. 2010). Entre as aplicações, citam-se: Sistemas Autônomos Terrestres (MMS - *Mobile Mapping Systems*), Aéreo (UAV - *Unmanned Aerial Vehicles*) e Marítimo (AUV - *Autonomous Underwater Vehicles*), conforme ilustrado na figura 11.



FIGURA 11: (A) AUV, (B) UAV E (C) MMS
FONTE: INTERNET

De acordo com Titterton e Weston (2004, p. 190), as propriedades dos sensores de estado sólido MEMS são:

- Tamanho pequeno;
- Baixo peso;
- Construção robusta;
- Curto período de inicialização;
- Alta confiabilidade;
- Baixa manutenção;
- Compatível com operação em ambiente hostil.

Contudo, a miniaturização e custos reduzidos influenciam o desempenho dos acelerômetros e giroscópios, o que explica porque alguns sistemas de plataforma estável ainda são utilizados para propósitos de alta-performance (RENAULT, 2013, p. 1). Os sistemas inerciais MEMS sofrem grandes erros quando comparados com seus antecessores mecânicos. Os inerciais MEMS de baixo custo apresentam altos níveis de deriva, erro de fator de escala, não-ortogonalidade e

ruídos (seção 2.4). Estes erros se acumulam com o tempo, deteriorando a precisão das medições (AGGARWAL, SYED e EL-SHEIMY, 2010).

2.3.1 Acelerômetros MEMS

Os acelerômetros podem ser divididos em duas classes distintas, de acordo com o modo como a aceleração aplicada é identificada pelo sensor (TITTERTON E WESTON, 2004, p. 153 - 185):

- Tipo pêndulo: é um sensor mecânico que determina a aceleração sentida a partir do deslocamento de uma massa de prova suportada por uma articulação. Possui acurácia compatível com qualidade inercial (25 μg) ou sub-inercial (1 mg);
- *Vibrating Beam*: quando o sensor está sujeito a uma aceleração, ocorre uma alteração na frequência do elemento vibrante. Esta alteração é causada por uma mudança na frequência, como resultado de uma carga mecânica. A acurácia é de aproximadamente 1 μg .

De acordo com Jekeli (2001), a maioria dos acelerômetros MEMS se baseia no princípio do deslocamento de uma massa de prova como resultado de uma mudança na aceleração. A massa de prova é fixada na plataforma do sensor por um sistema mecânico mola-amortecimento. Na maioria dos sensores a massa de prova pode se mover em uma única direção, o que significa que três diferentes acelerômetros têm de ser combinados para medir o movimento tridimensional.

Segundo Renault (2013, p. 3 - 6), dentre as formas mais atuais de se medir o deslocamento da massa de prova, os mais atuais são capacitores, cristais piezoelétricos e materiais piezoresistivos.

- a) Capacitores: Se baseiam no fato de que a capacitância da placa de um dado capacitor é inversamente proporcional à distância entre as placas. Se a distância muda devido a uma alteração no movimento da massa de prova, a capacitância muda e essa mudança no potencial elétrico entre os eletrodos pode ser medida.

- b) Piezoelétrico e Piezoresistivo: Um material piezoelétrico é um cristal que gera uma voltagem quando uma força mecânica é aplicada. Ao contrário, a aplicação de um campo elétrico no cristal gera uma deformação. No caso de um acelerômetro, a força aplicada é o resultado de uma aceleração no objeto aplicada na massa de prova do sensor. A aceleração é obtida pela aplicação diretamente da segunda lei de Newton (seção 2.2.1).
- c) Piezoresistivos: são semelhantes aos piezoelétricos, com exceção de que a mudança na força mecânica aplicada resulta em uma mudança na resistividade do material.

2.4 ERROS DOS SENSORES INERCIAIS MEMS

Devido ao tamanho reduzido e ao processo de fabricação, os sensores MEMS apresentam uma grande sensibilidade a variações. As principais consequências são sinais medidos com maior instabilidade e ruídos. Os acelerômetros MEMS são afetados por erros sistemáticos e aleatórios em seus sinais de saída, conforme figura 12.

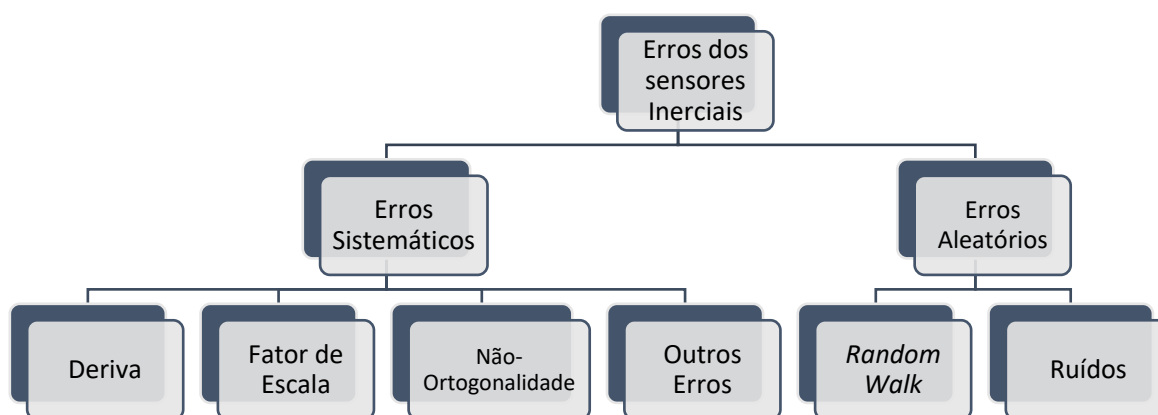


FIGURA 12: ERROS DOS SENSORES INERCIAIS
FONTE: A AUTORA (2015)

2.4.1 Erros Sistemáticos

Também conhecidos como erros determinísticos, estes ocorrem devido a defeitos de fabricação dos sistemas inerciais. Eles podem ser calibrados e compensados a partir dos sinais de saída medidos pelos sensores. Os principais erros são: deriva, erro de fator de escala e de não-ortogonalidade. De acordo com Groves (2008), todas as fontes de erros sistemáticos possuem quatro componentes:

- a) Contribuição fixa: está presente a cada vez que o sensor é utilizado e pode ser corrigida pelo processador presente no sistema inercial, utilizando dados de calibração em laboratório.
- b) Variação em função da temperatura: também pode ser corrigida pelos valores medidos pelos acelerômetros, por meio de dados de calibração em laboratório.
- c) Variação *run-to-run*: apresenta um valor diferente a cada vez que o sensor é utilizado, mas permanece constante enquanto o acelerômetro/giroscópio estiver em funcionamento. Ele não pode ser corrigido pelo processador interno do equipamento, mas pode ser calibrado pelo alinhamento dos acelerômetros e/ou algoritmos de integração.
- d) Variação *in-run*: apresenta uma variação lenta durante a execução do sensor. Em teoria, esta variação só pode ser corrigida através da integração com outros sensores de navegação, mas é difícil de se observar na prática.

Na sequência estes erros serão apresentados com mais detalhes.

2.4.1.1 Deriva

Também conhecida como *bias*, este erro é uma discrepância entre as forças atuantes nos acelerômetros e as acelerações medidas. Segundo Titterton e Weston (2004), a deriva dos acelerômetros é um deslocamento do zero na medição da força específica que está presente quando a aceleração aplicada é zero (FIGURA 13).

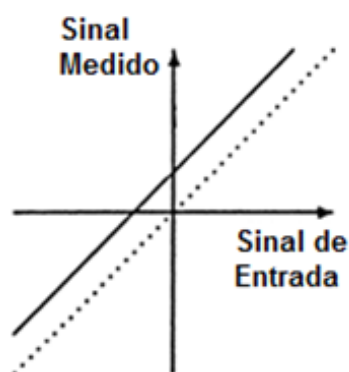


FIGURA 13: ERRO DE DERIVA

FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

A deriva independe de qualquer movimento pelo qual o acelerômetro possa ser submetido. Segundo Groves (2008), a deriva é composta de uma componente estática e uma dinâmica.

- Componente estática: também conhecida como deriva fixa ou *turn-on bias*, esta componente é constante durante o período de funcionamento do inercial, mas apresenta variações para diferentes operações do equipamento.
- Componente dinâmica: também conhecida como *bias in-run*, a componente dinâmica apresenta variações de períodos da ordem de um minuto. A deriva dinâmica também incorpora a deriva dependente da temperatura residual, remanescente após a calibração do sensor. A deriva dinâmica é tipicamente cerca de 10% da deriva estática.

A deriva dos acelerômetros é dada em termos da aceleração da gravidade, abreviada para g , observando que a aceleração real devido à gravidade varia com a localização. De acordo com Groves (2008), a deriva afeta todos os acelerômetros. A tabela 1 apresenta os valores típicos de deriva para acelerômetros de diferentes categorias.

TABELA 1: CATEGORIA DE ACELEROMETROS DE ACORDO COM A DERIVA

Deriva de Acelerômetros	
Categoria	(mg)
Marinha	0,01
Aviação	0,03 - 0,1
Intermediária	0,1 - 1
Tática	1 - 10
Automotiva	>10

FONTE: GROVES (2008)

2.4.1.2 Erro de Fator de Escala (*Input Sensitivity*)

Um acelerômetro fornece um sinal de saída em resposta a cada aceleração. O erro de fator de escala é a taxa entre uma mudança no sinal de saída e uma mudança no sinal de entrada, figura 14. O fator de escala é estimado como uma inclinação em uma linha reta que pode ser ajustada de acordo com os valores dos sinais de entrada e de saída.

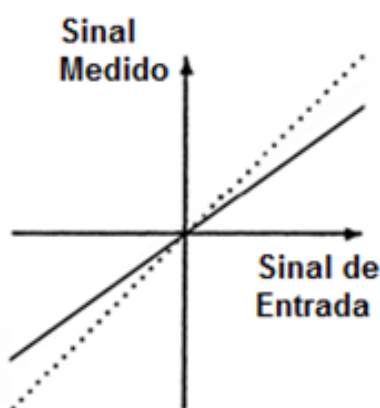


FIGURA 14: ERRO DE FATOR DE ESCALA
 FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

Um sensor ideal tem um fator de escala igual a 1. Desta forma, qualquer fator de escala diferente de 1 está contaminado (AGGARWAL, SYED e EL-SHEIMY *et al.*, 2010). A diferença entre um fator de escala imperfeito e o fator de escala ideal é chamada de erro de fator de escala.

Segundo Lawrence (1998, p. 25 - 26), um instrumento pode ter um fator de escala diferente para sinais de entrada positivos e negativos, conhecidos como assimetria do fator de escala. O fator de escala é geralmente expresso em partes por milhão (ppm). Para sensores de baixo custo este erro pode ser expresso em porcentagem.

2.4.1.3 Erro de Não-Ortogonalidade

Também conhecido como erro de não linearidade, este erro ocorre a partir do desalinhamento dos eixos sensíveis dos sensores inerciais com relação aos eixos ortogonais do referencial do corpo, conforme pode ser visto na figura 15. Este

desalinhamento ocorre em todos os sistemas inerciais devido a limitações no processo de fabricação.

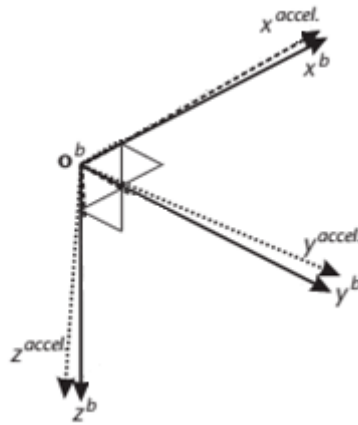


FIGURA 15: ERRO DE NÃO-ORTOGONALIDADE
 FONTE: GROVES (2008)

2.4.1.4 Outros Erros

Os acelerômetros também são afetados por erros causados pela mudança de temperatura, em especial em sensores MEMS de baixo custo (AGGARWAL, SYED e EL-SHEIMY, 2010). Estas variações podem ser estimadas por testes térmicos, que medem as discrepâncias dos parâmetros básicos do sensor quando este opera sob diferentes temperaturas.

Além do erro causado pela temperatura, alguns sensores têm um limite a partir do qual não podem detectar pequenas mudanças nos sinais de entradas (Lawrence, 1998). Este efeito é conhecido como *dead band* (FIGURA 16). Segundo Grewal e Andrews (2007), este erro é geralmente causado por algum tipo de fricção mecânica.

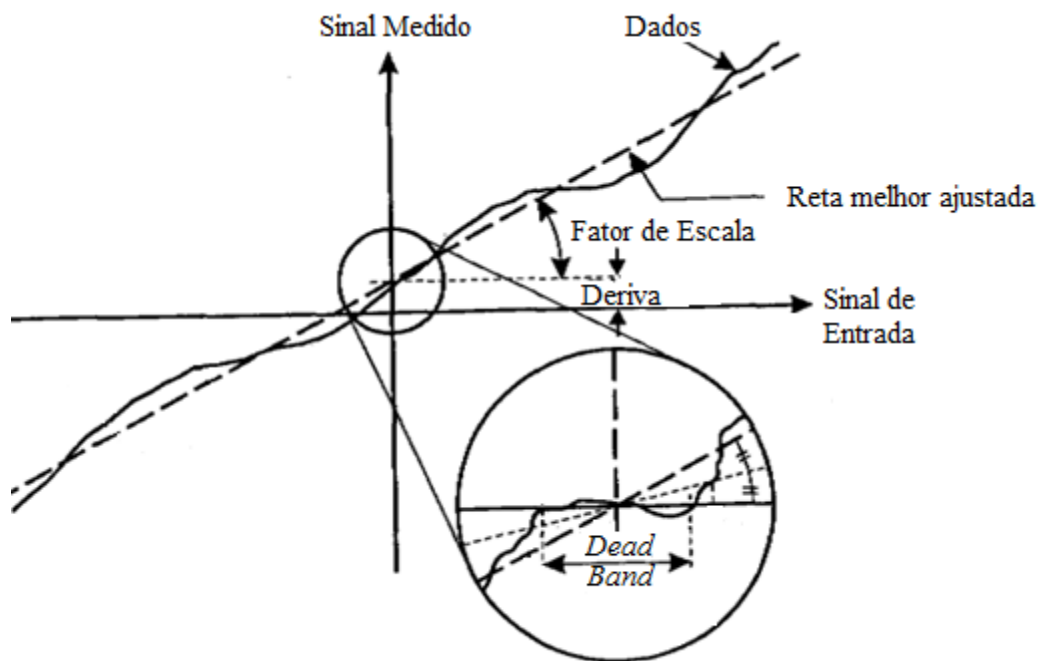


FIGURA 16: OUTROS ERROS
 FONTE: LAWRENCE (1998) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

Além dos erros instrumentais, outras fontes de erro que podem ser citadas são: erros do modelo da gravidade, erros numéricos de computação, erros do modelo de navegação selecionado e erros de inicialização, incluindo posição e velocidade iniciais e alinhamento (Hayal, 2010).

2.4.2 Erros Aleatórios

Os erros aleatórios, também chamados de erros estocásticos ou não-determinísticos, são causados por ruídos. Apesar destes erros apresentarem características aleatórias, eles podem ser modelados por processos estocásticos (seção 2.5.2). Na sequência são apresentadas as principais características dos ruídos.

2.4.2.1 Ruídos

São sinais aleatórios, aditivos e de alta frequência. Podem ser minimizados ou eliminados utilizando um processo de filtragem adequado. Existem diversos tipos de ruídos, conforme apresentado a seguir:

- a) Ruído Branco: pode ser proveniente de fontes de energia, de ruído intrínseco em dispositivos semicondutores ou de erros de quantização na digitalização de sinais analógicos para digitais (GREWAL e ANDREWS, 2007);
- b) Ruído Exponencialmente Correlacionado: é causado pela sensibilidade do sensor à temperatura. Este é caracterizado por uma função de decaimento exponencial com um tempo de correlação finito (HOU, 2004).
- c) Ruído Harmônico: o controle de temperatura presente em alguns sistemas inerciais muitas vezes introduz erros cíclicos, devido a atrasos de transporte térmico (GREWAL e ANDREWS, 2007).
- d) Ruído de Quantização: É um tipo de erro induzido pela codificação do sinal analógico para a forma digital. O ruído de quantização é causado pelas pequenas diferenças entre as amplitudes reais do sinal medido e da resolução digital em bits (FIGURA 17).

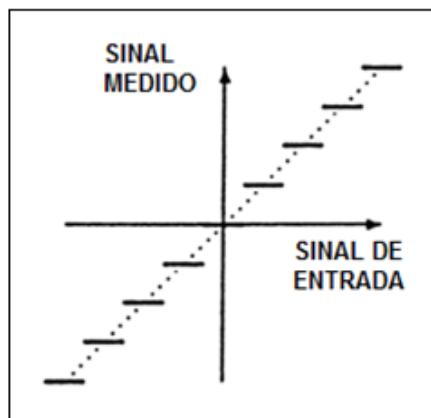


FIGURA 17: RUÍDO CAUSADO POR UM ERRO DE QUANTIZAÇÃO
 FONTE: GREWAL E ANDREWS (2007) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

- e) *Bias Instability*: tem origem na eletrônica do sistema, ou outros componentes sensíveis à cintilação aleatória (KESHNER, 1982);

- f) *Rate Random Walk*: é um processo aleatório de origem desconhecida. Este é possivelmente um ruído correlacionado exponencialmente com um tempo de correlação muito longo (HOU, 2004);
- g) *Random Walk*: é causado pela integração do ruído presente nos sinais medidos pelos acelerômetros e giroscópios, e que aumenta linearmente com o passar do tempo. Segundo Grewal e Andrews (2007), a "velocidade do *random walk*" de um acelerômetro é equivalente ao ruído branco presente nos sinais de saída angular.

2.5 DETERMINAÇÃO E MODELAGEM DOS ERROS DOS ACELERÔMETROS

Na seção 2.4, viu-se que as acelerações medidas pelos acelerômetros são afetadas por erros dos tipos sistemático e aleatório. A adoção de algumas aproximações específicas permitem minimizar ou eliminar estes erros. Na sequência são apresentados alguns procedimentos com o objetivo de determinar os principais erros sistemáticos e modelagem de erros aleatórios.

2.5.1 Calibração – Erros Sistemáticos

Diversos métodos de calibração têm sido desenvolvidos. A maioria deles utilizando instrumentos de laboratório precisos e técnicas de ajustamento. Tradicionalmente, a calibração de dispositivos tem sido feita por meio de equipamentos robóticos especialmente desenvolvidos para esta finalidade, que realizam movimentos precisamente controlados. O problema é que estes equipamentos, em geral, possuem um custo bastante elevado, resultando em uma calibração de alto custo.

Silva (2010) apresenta a calibração de um sistema inercial utilizando um braço mecânico com seis graus de liberdade, utilizando uma metodologia que prevê os movimentos do robô sobre o inercial, de forma lenta o suficiente para que se possa considerar que a única aceleração atuando sobre o sistema seja a gravidade.

Markhevka (1959) realiza a calibração de acelerômetros lineares pelo método da força centrípeta. Neste método são utilizados equipamentos desenvolvidos especificamente para esta finalidade.

Nepot e Durrant-Whyte (1999) utilizam dados de posicionamento GPS para calibrar a deriva e o desalinhamento iniciais, porém a acurácia da calibração depende do GPS. Ang, Khosla e Riviera (2007) apresentam um modelo de regressão não-linear para determinação de erros sistemáticos de acelerômetros MEMS voltados a aplicações que não exijam alta precisão (< 2 g).

Lötters *et al.* (1998) propuseram um procedimento de calibração de acelerômetros com aplicações na medicina, utilizando apenas os sinais de saída dos acelerômetros em diferentes posições, sem qualquer dispositivo ou equipamento específico. Segundo os autores, uma tríade de acelerômetros pode ser calibrada ao manter cada eixo apontando para dois diferentes ângulos com relação à gravidade, sendo necessário um mínimo de seis posições.

Um dos métodos mais utilizados para a calibração de sistemas inerciais, o Método de Calibração Seis Posições (Aggarwal *et al.*, 2008), é uma proposta semelhante ao método apresentado por Lötters (1998). Este método requer que os sensores sejam instalados em uma superfície perfeitamente nivelada com relação à gravidade e alinhados segundo direções específicas. De acordo com Artese e Trecroci (2008) este é um procedimento muito delicado, de alto custo e difícil de ser realizado com um sistema inercial MEMS de baixo custo.

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia de calibração em que não seja necessário o alinhamento preciso dos sensores e de uma superfície perfeitamente nivelada, Shin e Al-Sheimy (2002) desenvolveram uma metodologia efetiva baseada em várias posições. Visando resolver algumas deficiências deste método, Syed *et al.* (2007) apresentam o Método de Calibração Multi-Posições Modificado.

2.5.1.1 Método de Calibração Seis Posições

O Método de Calibração Seis Posições (Aggarwal *et al.*, 2008) é um teste estático que pode ser aplicado tanto para giroscópios quanto para acelerômetros, desenvolvida para sensores de categoria intermediária ou melhor (SEÇÃO 2.2.4).

O procedimento para a execução do teste necessita que o sistema inercial seja montado em uma superfície nivelada perpendicularmente à gravidade. Em seguida, deve-se proceder à coleta de dados com cada um dos três eixos alinhados alternativamente para cima e para baixo, realizando rotações de 180° entre uma posição e outra. Para uma tríade de sensores ortogonais, isso resulta em um total de seis posições, conforme pode ser verificado na figura 18.

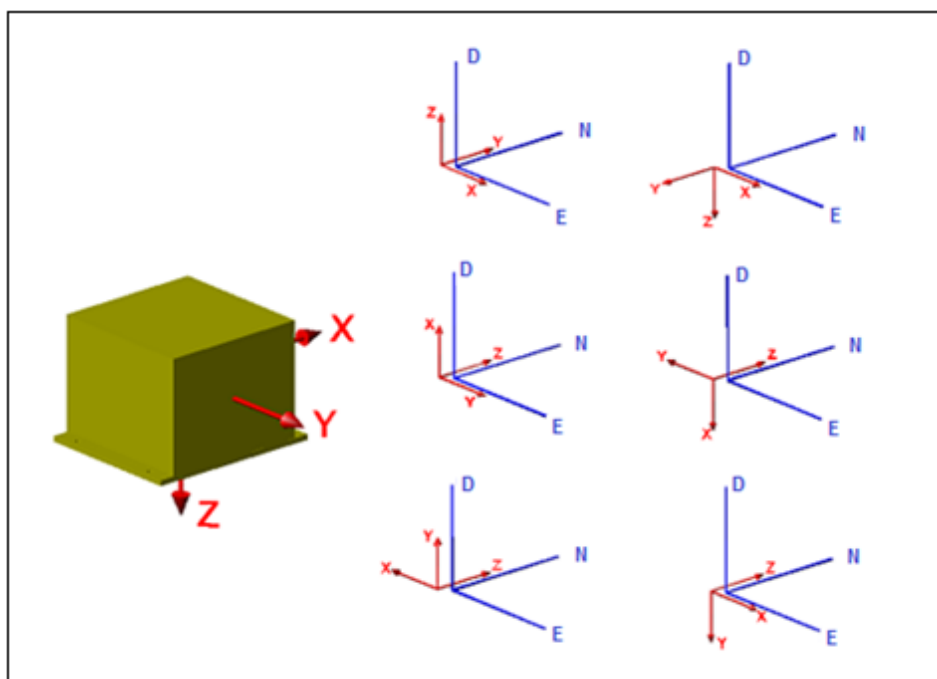


FIGURA 18: MÉTODO DE CALIBRAÇÃO SEIS POSIÇÕES

FONTE: AGOSTINO, MANZINO E PIRAS (2010) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

De acordo com Aggarwal *et al.* (2008), a deriva b e o fator de escala s podem então ser calculados respectivamente usando as expressões (4) e (5).

$$b = \frac{l_f^{up} + l_f^{down}}{2} \quad (4)$$

$$s = \frac{l_f^{up} - l_f^{down} - 2 \times K}{2 \times K} \quad (5)$$

onde:

l_f^{up} - sinal de saída quando o eixo de sensibilidade está apontado para cima;

l_f^{down} - sinal de saída quando o eixo de sensibilidade está apontado para baixo;

K - para os acelerômetros é a gravidade local.

A principal deficiência deste teste consiste no fato de que, segundo Aggarwal *et al.* (2008), por se tratar de um procedimento que requer bastante cuidado, o sucesso da calibração depende de quão bem alinhado o eixo vertical do sensor está com relação a gravidade, assim como do quão perfeito o sensor é posicionado em cada uma das posições.

2.5.1.2 Método de Calibração Multi-Posições e Multi-Posições Modificado

Com base no Método de Calibração Seis Posições, Shin e El Sheimy (2002) apresentam uma adaptação deste método denominado Método de Calibração Multi-Posições. Neste método ao invés de se realizar um ajustamento utilizando seis posições, são necessárias no mínimo dezoito posições diferentes e independentes entre si (FIGURA 19).

Ao contrário do Método Seis Posições, onde o alinhamento e as rotações entre uma posição e outra devem ser tão perfeitas quanto possível, pelo método Multi-Posições são necessárias rotações aproximadas de 45° entre uma posição e outra, assim como um alinhamento aproximado.

Artese e Trecroci (2008) citam que a grande vantagem do Método de Calibração Multi-Posições em relação aos anteriormente citados consiste no fato de que são necessárias apenas as posições aproximadas do sensor. Além disso, não é necessário o conhecimento exato da atitude do sensor com relação aos três eixos do plano de referencia.

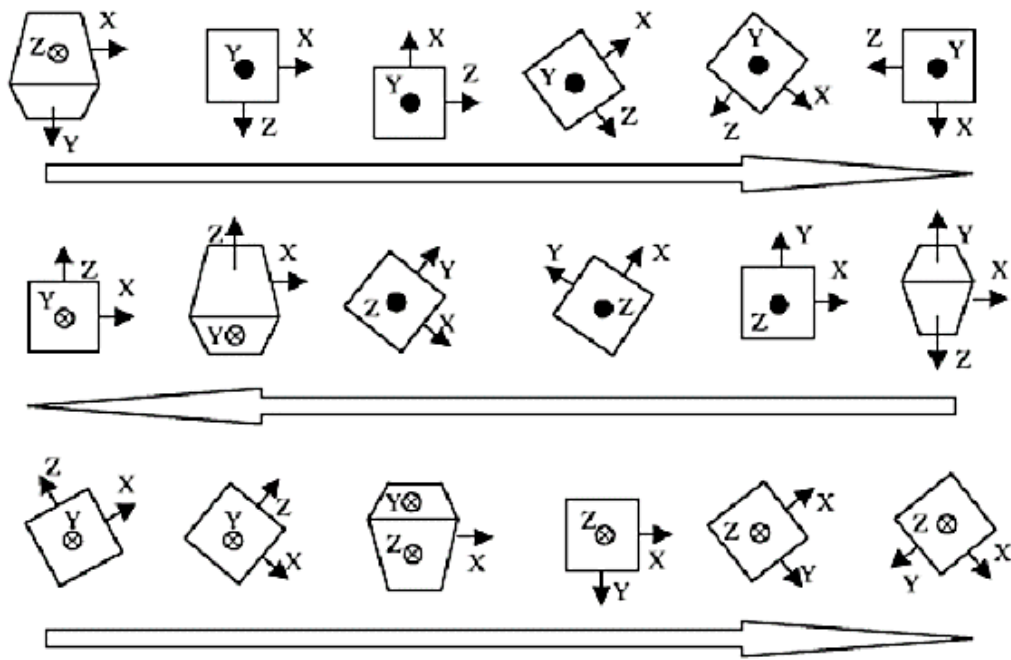


FIGURA 19: ATITUDES PARA A CALIBRAÇÃO (18 POSIÇÕES)

FONTE: SYED AT AL. (2007)

a) Modelo Matemático Funcional

No modo estacionário, a magnitude total que os acelerômetros sentem é a gravidade, independente da direção que os eixos são apontados. Um vetor no espaço R^3 no referencial do sensor pode ser definido por três vetores unitários, conforme equações (6), (7) e (8), respectivamente os vetores \vec{x} , \vec{y} e \vec{z} :

$$\vec{x} = (1,0,0) \quad (6)$$

$$\vec{y} = (0,1,0) \quad (7)$$

$$\vec{z} = (0,0,1) \quad (8)$$

Se a tríade de acelerômetros fosse perfeitamente ortogonal, as acelerações em cada eixo, com relação ao referencial de navegação NED, seriam dadas por:

$$a_x = \langle -\vec{g}, \vec{x} \rangle = -g \cos \alpha \quad (9)$$

$$a_y = \langle -\vec{g}, \vec{y} \rangle = -g \cos \beta \quad (10)$$

$$a_z = \langle -\vec{g}, \vec{z} \rangle = -g \cos \gamma \quad (11)$$

onde:

$\langle \cdot, \cdot \rangle$ é o produto interno;

\vec{g} é a gravidade;

α, β, γ são os ângulos entre a gravidade local e os eixos x , y e z do inercial, respectivamente.

A partir das equações (9), (10) e (11), Shin e El-Sheimy (2002) introduzem um modelo de calibração geral, conforme equação 12. Os autores determinam que esta equação é válida independentemente do alinhamento com o referencial de navegação.

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = \|g\|^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) = \|g\|^2 \quad (12)$$

Porém, os eixos dos sensores não são perfeitamente ortogonais. Acelerômetros apresentam um erro de não-ortogonalidade (seção 2.4.1.3) tanto entre os eixos x e y (FIGURA 20a), quanto entre o eixo z e o plano xy (FIGURA 20b).

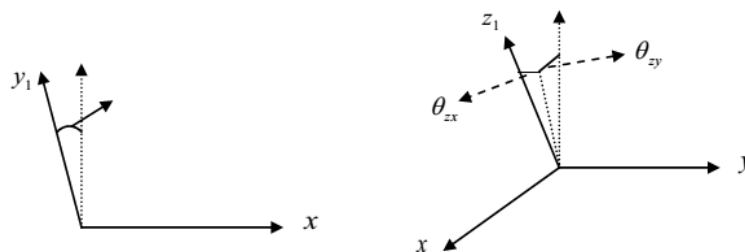


FIGURA 20: (A) NÃO-ORTOGONALIDADE ENTRE OS EIXOS x E y E (B) ENTRE O EIXO z E O PLANO xy

FONTE: SHIN E EL-SHEIMY (2002)

A fim de eliminar a não-ortogonalidade entre os eixos x e y , o eixo y é rotacionado em torno do eixo z pelo ângulo θ_{yz} (FIGURA 20b), conforme equação

13:

$$\vec{y}_1 = \vec{R}_z \vec{y} = [-\text{sen}\theta_{yz} \quad -\text{cos}\theta_{yz} \quad 0]^T \quad (13)$$

onde:

$$\vec{R}_z = \begin{bmatrix} \text{cos}\theta_{yz} & -\text{sen}\theta_{yz} & 0 \\ \text{sen}\theta_{yz} & \text{cos}\theta_{yz} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A não ortogonalidade do eixo z (EQUAÇÃO 14) pode ser expressa por duas rotações consecutivas: no eixo x, dada por θ_{zx} , e em torno do eixo y dada por θ_{zy} .

$$\vec{z}_1 = \vec{R}_y \vec{R}_x \vec{z} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta_{zy} \\ -\text{sen}\theta_{zx} \text{cos}\theta_{zy} \\ \text{cos}\theta_{zx} \text{cos}\theta_{zy} \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde

$$\vec{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{cos}\theta_{zx} & -\text{sen}\theta_{zx} \\ 0 & \text{sen}\theta_{zx} & \text{cos}\theta_{zx} \end{bmatrix}$$

$$\vec{R}_y = \begin{bmatrix} \text{cos}\theta_{zy} & 0 & \text{sen}\theta_{zy} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}\theta_{zy} & 0 & \text{cos}\theta_{zy} \end{bmatrix}$$

A não-ortogonalidade dos acelerômetros nos eixos x, y e z no referencial local podem ser representada pelos vetores:

$$\vec{x} = [1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (15)$$

$$\vec{y}_1 = [-\text{sen}\theta_{yz} \quad -\text{cos}\theta_{yz} \quad 0]^T \quad (16)$$

$$\vec{z}_1 = \begin{bmatrix} -\text{sen}\theta_{zy} \\ -\text{sen}\theta_{zx} \text{cos}\theta_{zy} \\ \text{cos}\theta_{zx} \text{cos}\theta_{zy} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Considerando apenas o erro não-ortogonalidade, os eixos dos acelerômetros detectam os seguintes valores:

$$\begin{aligned} a_{x1} &= \langle \vec{a}, \vec{x}_1 \rangle = \alpha_x \\ a_{y1} &= \langle \vec{a}, \vec{y}_1 \rangle = -\alpha_x \text{sen} \theta_{yz} - \alpha_y \text{cos} \theta_{yz} \\ a_{z1} &= \langle \vec{a}, \vec{z}_1 \rangle = -\alpha_x \text{sen} \theta_{zy} - \alpha_y \text{sen} \theta_{zx} \text{cos} \theta_{zy} + \alpha_z \text{cos} \theta_{zx} \text{cos} \theta_{zy} \end{aligned} \quad (18)$$

Com a inclusão dos erros de deriva e o de fator de escala, seção 2.4.1.1 e seção 2.4.1.2 respectivamente, têm-se que:

$$Y_i = b_i + (1 + s_i) a_i \quad (19)$$

onde:

Y_i são as acelerações observadas;

b_i é a deriva;

s_i é o erro de fator de escala.

Após a inclusão dos erros de não-ortogonalidades, as equações de observação para uma tríade de acelerômetros são dadas por:

$$Y_x = b_x + (1 + s_x) a_x + \eta_x \quad (20)$$

$$Y_y = b_y + (1 + s_y) (-a_x \text{sen} \theta_{yz} - a_y \text{cos} \theta_{yz}) + \eta_y \quad (21)$$

$$Y_z = b_z + (1 + s_z) (-a_x \text{sen} \theta_{zy} - a_y \text{sen} \theta_{zx} \text{cos} \theta_{zy} + a_z \text{cos} \theta_{zx} \text{cos} \theta_{zy}) + \eta_z \quad (22)$$

onde η é o ruído.

Reorganizando as equações acima e ignorando o termo do ruído, têm-se as componentes do vetor força específica, conforme equações:

$$a_x = \frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \quad (23)$$

$$a_y = a_x \tan \theta_{yz} + \frac{Y_y - b_y}{(1 + s_y) \text{cos} \theta_{yz}} \quad (24)$$

$$a_z = -a_x \frac{\tan \theta_{zy}}{\text{cos} \theta_{zx}} + a_y \tan \theta_{zx} + \left(\frac{Y_z - b_z}{(1 + s_z) \text{cos} \theta_{zx} \text{cos} \theta_{zy}} \right) \quad (25)$$

A partir da equação (12), Shin e El-Sheimy (2002) produziram um modelo de calibração para os acelerômetros conforme equação abaixo:

$$f = a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 - \|g\|^2 = 0 \quad (26)$$

Substituindo as equações (20), (21) e (22) na equação (26), se obtém um modelo de calibração que inclui todos os nove parâmetros de erro, conforme:

$$\begin{aligned} f = & \left(\frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \right)^2 + \left(\tan \theta_{yz} \frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} + \frac{1}{\cos \theta_{yz}} \frac{Y_y - b_y}{1 + s_y} \right)^2 + \\ & \left[\left(\tan \theta_{zx} \tan \theta_{yz} - \frac{\tan \theta_{zy}}{\cos \theta_{zx}} \right) \left(\frac{Y_x - b_x}{1 + s_x} \right) + \frac{\tan \theta_{zx}}{\cos \theta_{yz}} \left(\frac{Y_y - b_y}{1 + s_y} \right) + \right. \\ & \left. \frac{1}{\cos \theta_{zx} \cos \theta_{zy}} \left(\frac{Y_z - b_z}{1 + s_z} \right) \right]^2 - \|g\|^2 = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

sendo os nove parâmetros de erros:

b_i = deriva;

s_i = erro de fator de escala;

θ_{ii} = erro de não-ortogonalidade.

b) Etapas do Ajustamento

O ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) tem como objetivo minimizar a soma dos quadrados dos resíduos das observações, de modo que o modelo matemático linearizado deve cumprir:

$$\Theta = V^T P V \cong \text{mínimo} \quad (28)$$

sendo V o vetor dos resíduos e P a matriz dos pesos.

Como o modelo matemático funcional (EQUAÇÃO 27) apresenta tanto incógnitas quanto observações, utiliza-se o ajustamento pelo método combinado. A equação implícita do ajustamento pelo método combinado é dada por (GEMAEL, 1994):

$$F(X_a, L_a) = 0 \quad (29)$$

O vetor dos parâmetros ajustados X_a e o vetor das observações ajustadas L_a são obtidos a partir das equações (30) e (31), respectivamente:

$$X_a = X_0 + X \quad (30)$$

$$L_a = L_b + V \quad (31)$$

Onde:

X_0 : vetor dos parâmetros aproximados;

$X = X_a - X_0$: vetor das correções dos parâmetros aproximados;

L_b : vetor das observações;

V : vetor dos resíduos.

Linearizando o modelo pela expansão em série de Taylor, e considerando apenas os termos iniciais da série, tem-se:

$$AX + BV + W = 0 \quad (32)$$

onde:

$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}$: matriz das derivadas parciais do modelo funcional em relação aos parâmetros;

$B = \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b}$: matriz das derivadas parciais do modelo funcional em relação às observações;

$W = F(X_0, L_b)$: vetor erro de fechamento.

Considerando o modelo matemático funcional apresentado na equação 27, as matrizes das derivadas parciais A e B são:

$$A = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f}{\partial b_x} & \frac{\partial f}{\partial b_y} & \frac{\partial f}{\partial b_z} & \frac{\partial f}{\partial s_x} & \frac{\partial f}{\partial s_y} & \frac{\partial f}{\partial s_z} & \frac{\partial f}{\partial \theta_{yz}} & \frac{\partial f}{\partial \theta_{zx}} & \frac{\partial f}{\partial \theta_{zy}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$B = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (34)$$

A solução do ajustamento é dada pela resolução das equações normais:

$$\begin{aligned} M &= BP^{-1}B^T \\ X &= -(A^T M^{-1}A)^{-1} A^T M^{-1}W \\ X_a &= X_0 + X \end{aligned} \quad (35)$$

onde P é a matriz dos pesos.

Após as iterações tem-se que:

$$\begin{aligned} K &= -M^{-1}(AX + W) \\ V &= P^{-1}B^T K \\ L_a &= L_b + V \end{aligned} \quad (36)$$

Para evitar singularidade ao inverter a matriz normal, é necessário que muitas observações sejam feitas. No caso de uma tríade de acelerômetros, tipicamente, são estimadas três derivas, três erros de fatores de escala e três erros de não-ortogonalidade. Isto implica em um mínimo de dez diferentes atitudes para ser aplicado um ajustamento.

Na prática, são necessárias mais do que 18 posições em várias atitudes para se obter resultados confiáveis. Syed *et al.* (2007) executou 26 diferentes atitudes, sendo 6 posições com cada face do inercial apontando para baixo, 12 posições com cada aresta apontando para baixo e depois 8 posições com os cantos apontando para baixo. O ângulo entre duas posições sucessivas é de

aproximadamente 45°. O apêndice 1 apresenta as ilustrações para as 26 atitudes. A figura 21 ilustra as (a) faces, (b) arestas e (c) quinas de um sistema inercial.

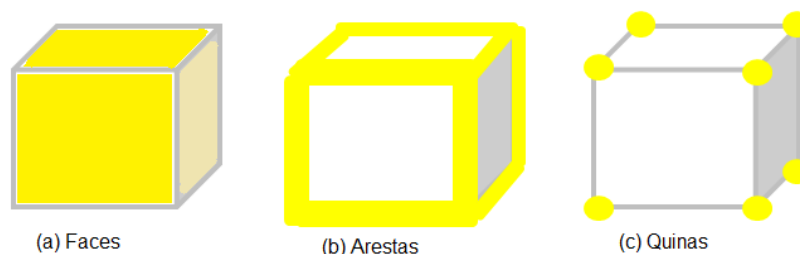


FIGURA 21: (A) FACES, (B) ARESTAS E (C) QUINAS DE UM SISTEMA INERCIAL
FONTE: A AUTORA (2015)

O problema deste modelo é que ele é válido para calibração de sensores de alta precisão, havendo obstáculos para dispositivos de baixa precisão. Além disso, o Método de Calibração Multi-Posições apresenta dificuldade de convergência da deriva e do erro de fator de escala no processo de ajustamento, devido à falta de parâmetros iniciais estimados. Por este motivo, Syed *et al.* (2007) apresentam uma modificação para acelerômetros MEMS de baixo custo. Esta modificação consiste em se realizar um teste inicial alternando os eixos do sensor para cima e para baixo, semelhante ao Método de Calibração de Seis Posições. Desta forma é possível obter valores aproximados para o ajustamento dos erros de deriva e de fator de escala. De acordo com o autor, esta pré-calibração melhora a convergência e diminui o número de iterações no ajustamento.

2.5.2 Modelagem Estocástica

Os erros aleatórios dos sensores inerciais podem ser estimados com a aplicação de filtros. Isto produz uma saída de ruídos correlacionados no tempo. A diferença básica entre a modelagem determinística e a estocástica consiste no fato de que a modelagem determinística tem que ser estabelecida a partir da relação entre um ou mais sinais de entrada e um ou mais sinais de saída. Já na modelagem estocástica pode não existir relação direta entre os sinais de entrada e de saída.

Dentre as técnicas utilizadas para modelagem de erros aleatórios pode-se citar os modelos derivados das funções Função de Correlação, Variância de Allan e Transformada de *Wavelet*. De acordo com Santana (2011), na Função de Autocorrelação os parâmetros são obtidos a partir dos dados brutos estáticos, que devem ser coletados por um longo período no domínio do tempo. O sucesso do procedimento depende do tempo de coleta dos dados. Porém, neste procedimento a determinação do tempo necessário para as medições pode ser de difícil estimativa.

A Densidade Espectral de Potencia é uma técnica de decomposição espectral de uma série temporal. Este é uma ferramenta poderosa para a análise e caracterização de dados e para a modelagem estocástica (ABDEL-HAMID, 2005), mas exige um cálculo complexo e de difícil compreensão.

Segundo Hou (2004), a Variância de Allan é uma técnica de análise no domínio do tempo. Esta é utilizada para análise de características de processos aleatórios como ruídos. Este método tem a vantagem de ser simples de se calcular, e é relativamente simples de se entender e interpretar (IEEE Std952, 1997). A variância de Allan pode ser usada para determinar a natureza dos processos implícitos aleatórios que dão origem aos ruídos. Porém, uma das deficiências mais notáveis deste método é a caracterização não única de determinados ruídos.

2.5.2.1 Variância de Allan

A variância de Allan foi desenvolvida nos anos 60 para estudo da precisão de osciladores. Posteriormente foi adotado pela comunidade científica como padrão para caracterização da instabilidade de tempo e frequência de osciladores de precisão (IEEE Std952, 1997). Pela analogia próxima aos sensores inerciais, o método foi adotado para caracterização de deriva aleatória.

Na década de 1980, Kochakian⁴ (1980 citado por Hou, 2004) apresentou o primeiro trabalho onde a variância de Allan foi utilizada para o estudo de sensores

⁴ Kochakian, C.R. **Time-Domain Uncertainty Charts (Green Charts): A Tool for Validating the Design of IMU/Instrument Interfaces**. Proceedings of the AIAA Guidance and Control Conference, Aug. 11-13, 1980.

inerciais. Em 1997, o IEEE *standard* introduziu o método da variância Allan como um método de identificação de ruídos e análise individual de giroscópios de fibra óptica (IEEE Std952, 1997), e em 1998 para acelerômetros não-giroscópicos (IEEE Std1293, 1998).

Atualmente, esta técnica é também utilizada em metrologia na estimativa da estabilidade de padrões de frequências primárias, caracterização da estabilidade de relógios atômicos e escalas de tempo atômicas. No campo da Geodésia, Gambis (2002) descreve a aplicação da variância de Allan para caracterização de ruídos de séries temporais que descrevem as variações da rotação da Terra derivadas de diferentes técnicas geodésicas, tais como, SLR (*Satellite Laser Ranging*), VLBI (*Large Baseline Interferometry*) e GPS.

2.5.2.1.1 Cálculo da Variância de Allan

O cálculo da variância de Allan pode ser entendido a partir da figura 22, ao se considerar uma amostra de N pontos de dados sendo cada um com um intervalo amostral t_0 . Em seguida, forma-se um grupo de n pontos de dados consecutivos (com $n < N/2$). Associado a cada grupo tem-se um tempo $T = nt_0$.

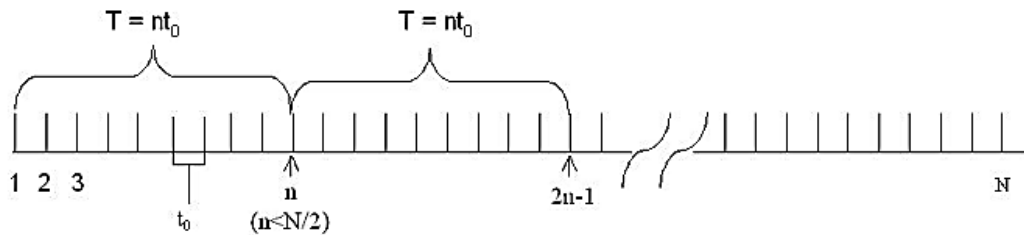


FIGURA 22: METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA VARIÂNCIA DE ALLAN
FONTE: HOU (2004)

Se o valor instantâneo medido pelos sensores inerciais é $\Pi(t)$, o valor médio para um agrupamento é definido como:

$$\bar{\Pi}_k(T) = \frac{1}{T} \int_{t_k}^{t_k+T} \Pi(t) dt \quad (37)$$

onde $\bar{\Pi}_k(T)$ representa o valor médio do sinal medido, considerando um agrupamento que começa no k -ésimo ponto e contém n pontos.

A definição do agrupamento médio subsequente é:

$$\bar{\Pi}_{k+1}(T) = \frac{1}{T} \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1}+T} \Pi(t) dt \quad (38)$$

onde $t_{k+1} = t_k + T$

Executando a operação de média para cada dois conjuntos adjacentes e calculando as diferenças, tem-se:

$$\xi_{k+1,k} = \bar{\Pi}_{k+1}(T) - \bar{\Pi}_k(T) \quad (39)$$

A quantidade de interesse é a variância de ξ_s sobre todos os agrupamentos de mesmo tamanho que podem ser formados a partir de dados inteiros. Assim, a variação de comprimento da variância de Allan é definida como (IEEE std952-1997):

$$\sigma^2(T) = \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{k=1}^{N-2n} [\bar{\Pi}_{k+1}(T) - \bar{\Pi}_k(T)]^2 \quad (40)$$

A estimativa da quantidade $\sigma^2(T)$ depende do número de grupos independentes de um comprimento fixo, que podem ser formados.

2.5.2.1.2 Estimativa de Ruídos a partir da Variância de Allan

Nesta seção apresenta-se a obtenção de estimativa dos valores dos ruídos (SEÇÃO 2.4.2.1) pela variância de Allan. As equações da variância de Allan para os diferentes tipos de ruídos foram obtidas por meio de operações que relacionam a variância de Allan (EQUAÇÃO 40) com os termos de ruído do conjunto original de Densidade Espectral. Para maiores informações, consultar as fontes IEEE std 952 (1997) e Hou (2004).

- a) **Random Walk:** a variância de Allan associada ao coeficiente do ruído de *random walk* (Q) é expressa por:

$$\sigma(T) = \frac{Q}{\sqrt{T}} \quad (41)$$

Em um gráfico em escala logarítmica de $\sigma(T)$ em função do T, o *random walk* é representado por uma inclinação de -1/2 (FIGURA 23). O valor numérico de Q pode ser obtido diretamente através da leitura da inclinação no ponto $T = 1$.

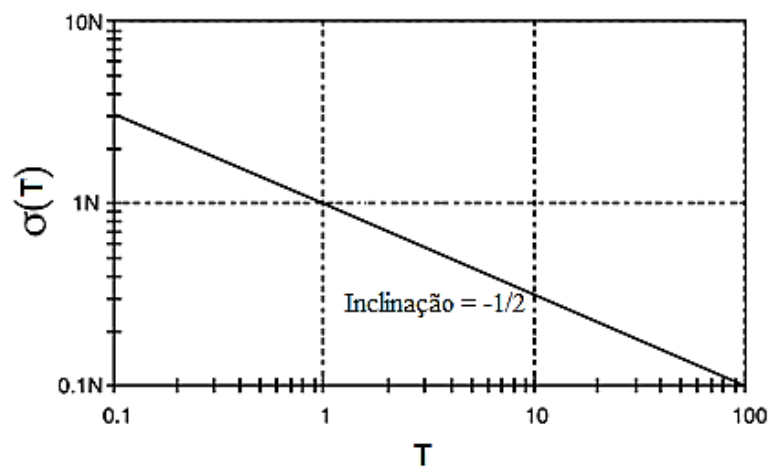


FIGURA 23: GRÁFICO PARA O RUÍDO DE *RANDOM WALK*
 FONTE: IEEE (1997) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

- b) **Bias Instability:** a variância de Allan associada ao coeficiente do ruído de *bias instability* (B) é expressa por:

$$\sigma(T) = \sqrt{\frac{2 \ln 2}{\pi}} B \cong 0,664 B \quad (42)$$

Para $T = \frac{1}{f_0}$

Em um gráfico log-log de $\sigma(T)$ em função do T, tem-se que o desvio padrão Allan começa com uma inclinação de 1 para $f_0 \ll 1 / T$ e atinge o valor assintótico de 0,664B (FIGURA 24). Assim, a região plana do gráfico pode ser examinada para

estimar o limite do ruído *bias instability*. Esse tipo de comportamento, especialmente a parte ascendente da curva, pode ser ofuscado pela influência de outros termos de ruído.

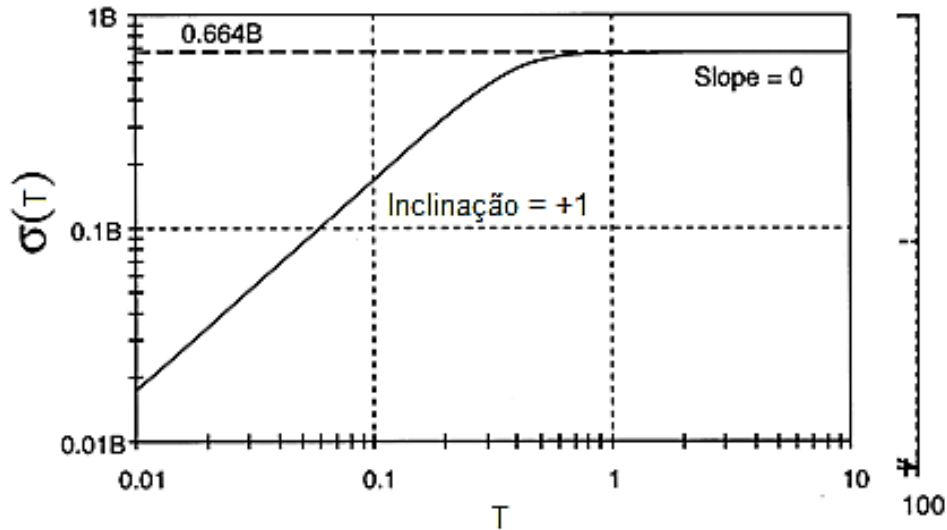


FIGURA 24: GRÁFICO DO *BIAS INSTABILITY*
 FONTE: IEEE (1997) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

c) **Taxa de *Random Walk*:** a variância de Allan associada ao coeficiente da taxa de *random walk* (K) é dada por:

$$\sigma(T) = K \sqrt{\frac{T}{3}} \quad (43)$$

A Taxa de *Random Walk* é representada por uma inclinação de $+1/2$ sobre um gráfico em escala logarítmica de $\sigma(T)$ em função T , como mostrado na figura 25. A magnitude deste ruído K pode ser lido diretamente na linha quando $T = 3$.

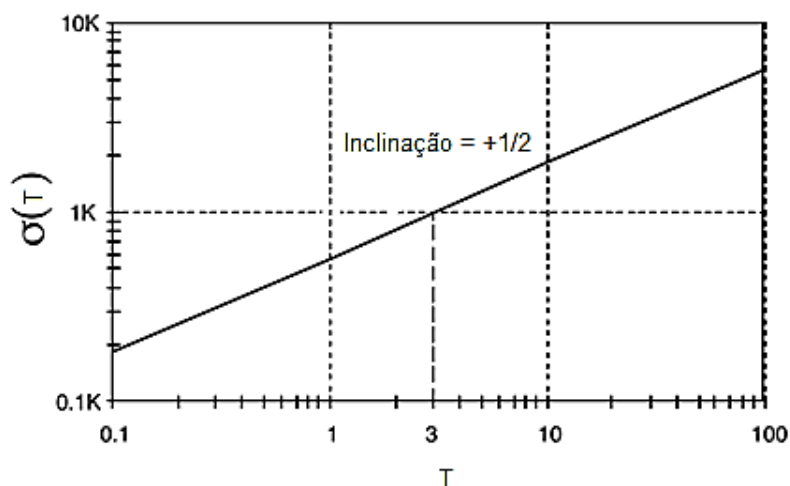


FIGURA 25: GRÁFICO DA TAXA DE *RANDOM WALK*
 FONTE: IEEE (1997) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

d) Drift Rate Ramp: a variância de Allan associada ao coeficiente *drift rate ramp* (R) é expressa por:

$$\sigma(T) = R \frac{T}{\sqrt{2}} \quad (44)$$

O *Drift Rate Ramp* tem inclinação igual a 1 no gráfico em escala logarítmica de $\sigma(T)$ em função de T, como mostrado na figura 26. O valor de R pode ser obtido pela inclinação em $T = \sqrt{2}$.

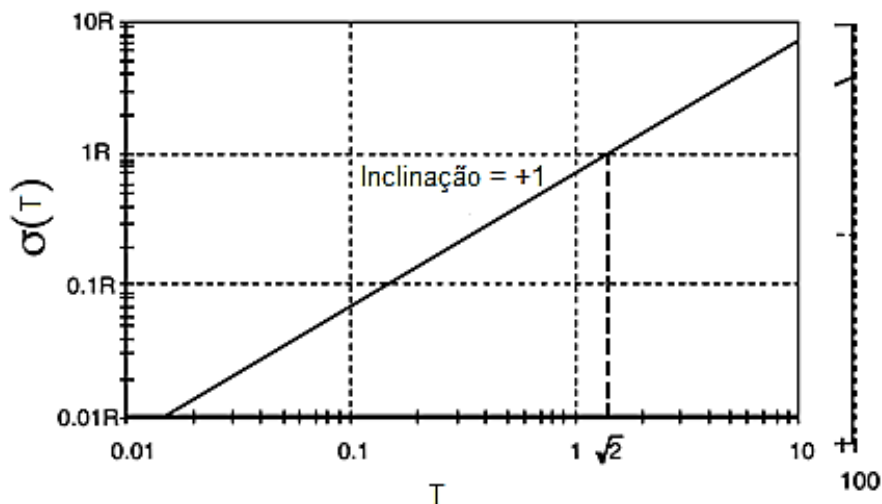


FIGURA 26: GRÁFICO DO *DRIFT RATE RAMP*
 FONTE: IEEE (1997) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

- e) **Ruído de Quantização:** a variância de Allan associada ao coeficiente do ruído de quantização (Q_z) é expressa por:

$$\sigma(T) = Q_z \frac{\sqrt{3}}{T} \quad (45)$$

O ruído de quantização é representado por uma inclinação de -1 em um gráfico log-log de $\sigma(T)$ em função de T , como mostrado na figura 27. A magnitude desse ruído pode ser lida na linha de inclinação em $T = \sqrt{3}$.

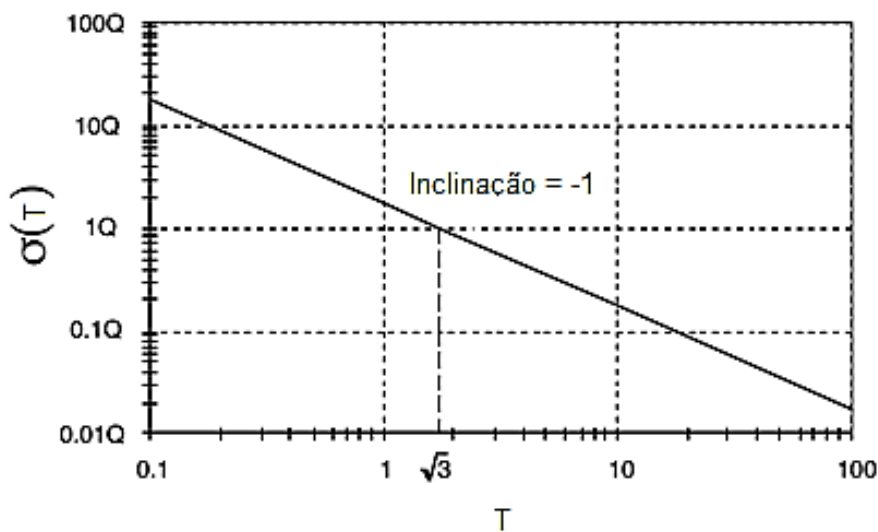


FIGURA 27: GRÁFICO DO RÚIDO DE QUANTIZAÇÃO
 FONTE: IEEE (1997) MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

2.6 ESTIMATIVA DE DESLOCAMENTOS POR MEIO DE ACELERAÇÕES

2.6.1 Integração

O deslocamento de um sensor pode ser calculado a partir da dupla integração das acelerações, conforme visto em 2.2.1. Em princípio, para realizar a dupla integração de um sinal de aceleração, deve-se conhecer a posição e a velocidade iniciais. Depois da primeira integração, a velocidade inicial deve ser adicionada, resultando na velocidade $v(t)$ (EQUAÇÃO 46).

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau \quad (46)$$

em que t_0 é o tempo inicial e $v(t_0)$ é a velocidade inicial, que é uma constante.

De forma semelhante, para obter a posição $x(t)$, a posição inicial $x(t_0)$ deverá ser somada após a segunda integração, conforme equação 47,

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau \quad (47)$$

Portanto, para uma dupla integração a ser executada na aceleração, devem ser conhecidas as duas condições iniciais de velocidade e posição, para evitar erros na etapa da integração (seção 2.2.6).

2.6.2 Métodos de Integração Digital

Existem diversos algoritmos de integração discreta para se realizar a integração numérica. A maneira mais simples para realizar a integração numérica é o método de integração retangular (SEIFERT E CAMACHO, 2007). Este método

utiliza um acumulador para somar todas as entradas amostradas e dividir pela taxa de amostragem. O sinal de aceleração é amostrado, tornando-se uma função de tempo discreta, com uma frequência de amostragem f_s , associado a ela. A integração retangular é representada pela equação 48 (SLIFTKA, p. 8, 2004):

$$y(n) = \frac{1}{f_s} \sum_{k=0}^n x(n-k) = y(n-1) + \frac{1}{f_s} x(n) \quad (48)$$

onde x é o integrando e y é a saída do integrador

Uma vez que a integral é considerada como sendo a área abaixo de uma curva, então a forma mais simples de calcular esta área é dividi-la em retângulos e somar as áreas individuais (ÇENGEL E PALM III, p. 511, 2014). A área acima da curva é considerada o erro (FIGURA 28).

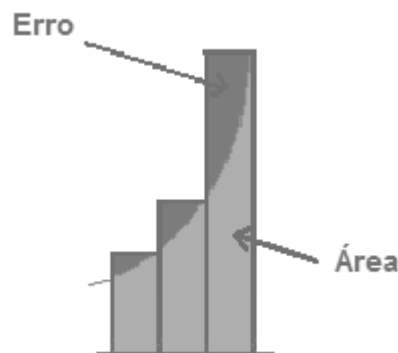


FIGURA 28: DUPLA INTEGRAÇÃO RETANGULAR
FONTE: SEIFERT E CAMACHO, 2007

Um outro método de integração numérica utiliza a regra trapezoidal, conforme equação 49:

$$y(n) = y(n-1) + \frac{1}{2f_s} [x(n-1) + x(n)], \quad n > 0 \quad (49)$$

Este método tem por objetivo reduzir os erros causados pela divisão da área abaixo da curva da integral em trapézios, conforme figura 29.

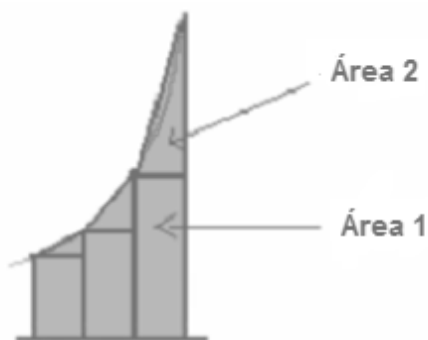


FIGURA 29: DUPLA INTEGRAÇÃO TRAPEZOIDAL
SEIFERT E CAMACHO, 2007

De acordo com Slifka (p. 9, 2004), pode-se considerar que a integração trapezoidal atua como uma função de primeira ordem, enquanto que a integração retangular atua como uma função de ordem zero. Logo, os resultados calculados pelo método trapezoidal são mais precisos do que com o método retangular. Na figura 30, pode-se observar uma onda senoidal integrada utilizando o método retangular (FIGURA 30a) e o método trapezoidal (FIGURA 30b).

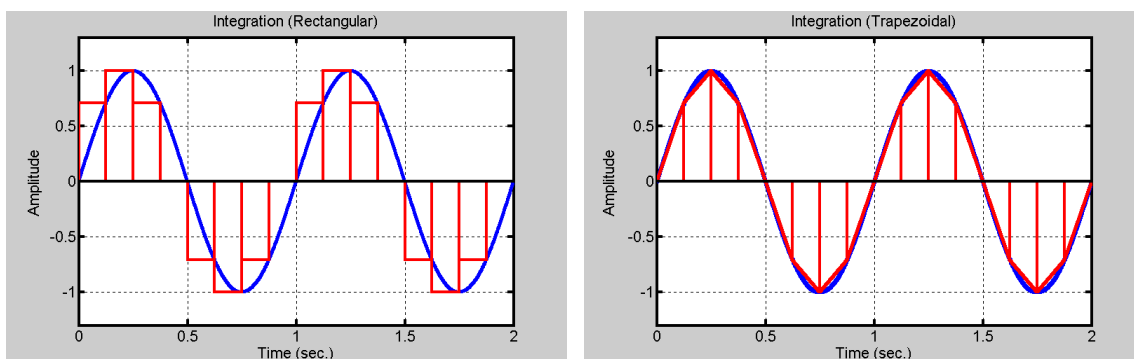


FIGURA 30: INTEGRAL (A) RETANGULAR E (B) TRAPEZOIDAL
FONTE: SLIFKA, 2004

2.6.3 Filtragem

Um acelerômetro mede todas as forças que estão atuando sobre ele (seção 2.2.1). Desta forma, cada pequena força atuante irá causar perturbações nas medidas. Enquanto a deriva do giroscópio faz com que em pouco tempo os valores de saída sejam devolvidos completamente errados, o acelerômetro, por outro lado, devolve um valor verdadeiro quando a aceleração é progressiva, porém, são facilmente corrompidos (WANG, HUANG E WANG, 2011).

Tipicamente, filtros são utilizados para extrair ruídos dos sinais de saída dos sensores. Estes podem ser do tipo:

- Filtro passa-baixa: Elimina as altas frequências e permite a passagem de baixas frequências, a partir da frequência zero até a frequência determinada.
- Filtro passa-alta: Elimina as baixas frequências. Este permite a passagem de determinada frequência até o limite superior.
- Filtro passa-faixa: permitem a passagem de componentes contidas em uma faixa de frequência especificada.
- Filtro rejeita-faixa: elimina as componentes contidas em uma determinada faixa de frequência.

Os filtros também podem ser classificados de acordo com o método de concepção:

a) Filtro de *Kalman*

Este filtro soluciona o problema geral de estimar o estado de um processo controlado em tempo discreto, a partir de equações estocásticas lineares (WELCH e GARY, 1995). Este filtro apresenta os melhores resultados, porém, também apresenta maior complexidade de implementação e de aplicação (HIGGINS, 1975); (YOO, et al. 2011); (SHIAU e WHANG, 2013).

b) Filtro Complementar

Este filtro é simultaneamente um filtro passa-alta e passa-baixa, de forma que os sinais do acelerômetro são processados pelo filtro passa-baixa e os sinais do giroscópio pelo filtro passa-alta (HENRIQUES, p. 55, 2011). Em seguida, os dados resultantes da filtragem são combinados. O filtro passa-baixa filtra sinais de alta frequência (como uma vibração no caso de um acelerômetro) e o passa alta filtra os sinais de baixa frequência (como a deriva do giroscópio).

c) Filtro Passa-Baixa *Butterworth*

São projetados para ter uma função de transferência com o mínimo de oscilações tanto na banda passante como na banda de corte. De acordo com Laghari et al. (2014), as principais aplicações de filtros Butterworth são no rastreamento de altas frequências e para suavização de sinais. A figura 31 apresenta a resposta típica deste filtro em diferentes ordens de frequência.

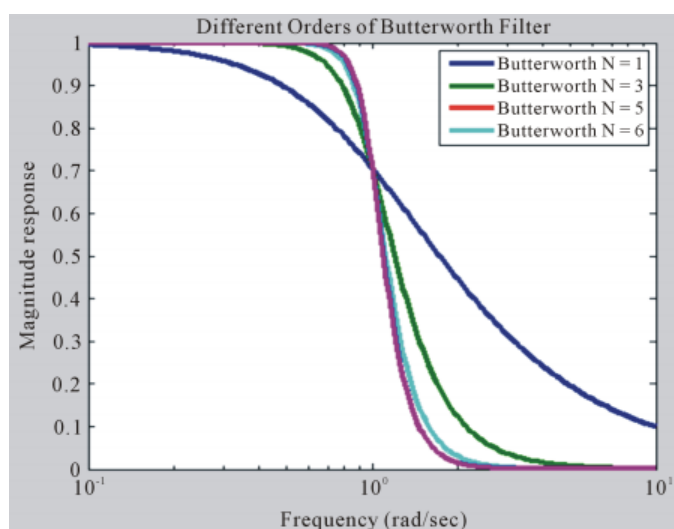


FIGURA 31: FILTRO BUTTERWORTH
FONTE: LAGHARI ET AL. 2014

d) Filtro *Chebyshev*

Atinge a zona de transição de forma abrupta, mas com uma banda passante suave. O filtro Chebyshev pode ser do tipo 1 ou 2 (FIGURAS 32a e 32b, respectivamente).

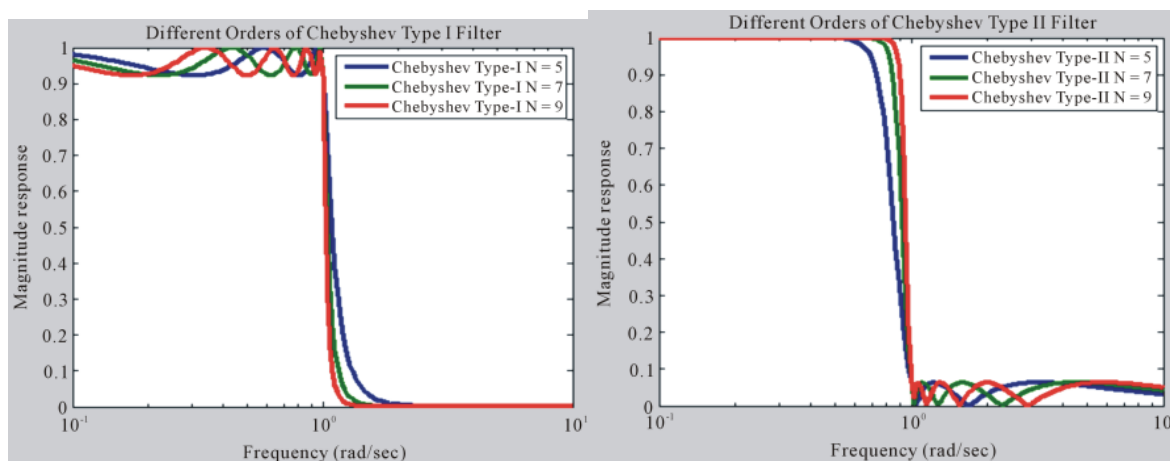


FIGURA 32: FILTRO *CHEBYSHEV* (A) TIPO 1 E (B) TIPO 2
 FONTE: LAGHARI *ET AL.* 2014

Filtro Elíptico

O filtro elíptico (FIGURA 33) atinge uma zona de transição mais abrupta do que o anterior, à custa de oscilações em todas as bandas.

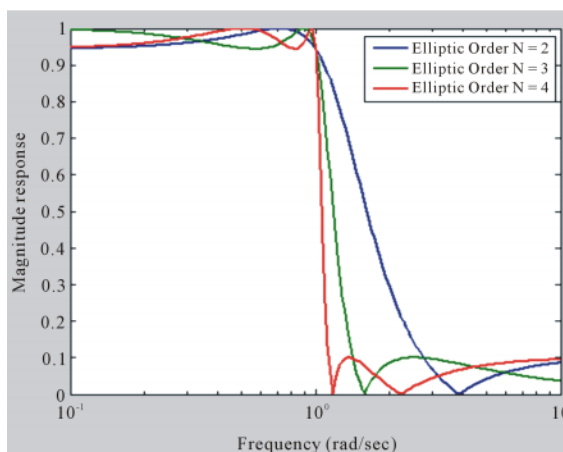


FIGURA 33: FILTRO ELÍPTICO
 FONTE: LAGHARI *ET AL.* 2014

3 METODOLOGIA

No capítulo anterior foram apresentados procedimentos que tem como objetivo melhorar o desempenho de sensores inerciais do tipo MEMS, no que se refere aos acelerômetros. O presente capítulo dedica-se a apresentar os equipamentos empregados, bem como a metodologia para a realização dos experimentos e simulações.

3.1 EQUIPAMENTOS

Foram testados os acelerômetros de três sistemas inerciais do tipo MEMS. O primeiro é uma UMI MEMS de baixo custo, modelo *Colibri*TM da marca Trivisio. O foco desta pesquisa é testar os acelerômetros deste sensor em particular, uma vez que, o *Colibri*TM será futuramente integrado à plataforma euleriana que compõe o sistema de monitoramento de desastres naturais (seção 2.1).

Foram ainda testados os acelerômetros de outros dois dispositivos, sendo estes o *MTi-G*TM e o *InertiaCube3*TM, ambos pertencentes a projetos de um pesquisador da UFPR. Escolheu-se testar diferentes acelerômetros devido à necessidade de se verificar o comportamento dos testes em sensores com diferentes tecnologias e aplicações. Na sequência são apresentadas as especificações técnicas destes sensores.

3.1.1 ColibriTM

É uma UMI de baixo custo produzido pela empresa *Trivisio* (FIGURA 34). Possui uma tríade de acelerômetros, de giroscópios e de magnetômetros. Segundo o fabricante, esta é indicada para aplicações em robótica, dispositivos para realidade virtual, *consoles* de videogames e controle de movimento com interface homem-máquina. O preço da UMI *Colibri*TM é de aproximadamente € 550,00.

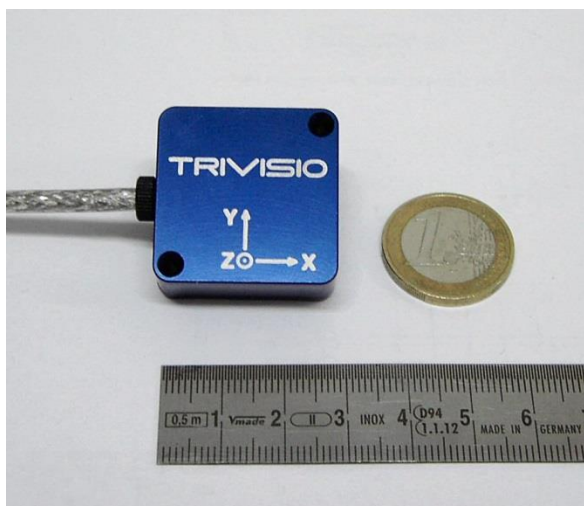


FIGURA 34: UMI COLIBRI
FONTE: TRIVISIO (2015)

No modo padrão, os eixos da UMI *Colibri*TM são convencionados com o eixo x_b orientado para frente, o eixo y_b para a esquerda e o eixo z_b apontando para cima, conforme figura 35.

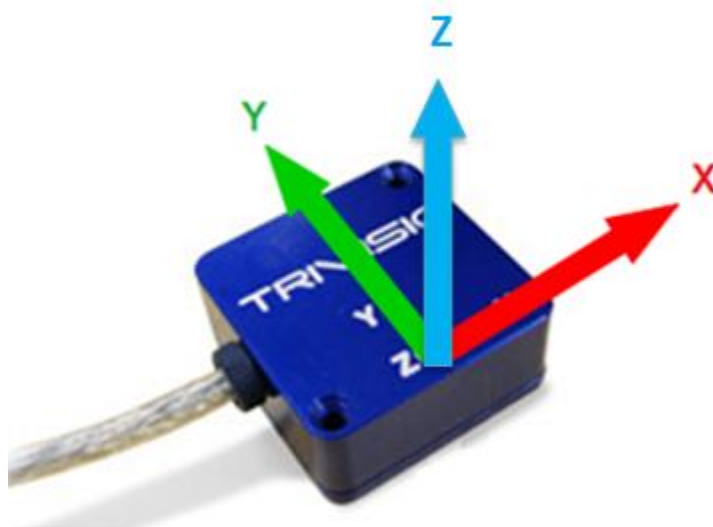


FIGURA 35: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – COLIBRI
FONTE: A AUTORA (2015)

A tabela 2 apresenta as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

TABELA 2: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - COLIBRI™

Acelerômetro	3 eixos Escala: ± 16 g Resolução: 13 bits
Giroscópio	3 eixos Escala: ± 1.500 °/s Resolução: 13 bits
Magnetômetro	3 eixos Escala: ± 110 μ T Resolução: 0,0263 μ T - 0,8421 μ T
Frequência de Operação	> 100 Hz
Intervalo de funcionamento de temperatura	0°C a +70°C
Peso	22 gramas
Dimensões	30 x 13 x 30 mm

FONTE: TRIVISIO (2015)

3.1.2 *InertiaCube3*™

É uma UMI fabricada pela empresa InterSense (FIGURA 36). Ela possui três acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, sendo que as operações são realizadas por um processador externo. Segundo recomendações do fabricante, esta UMI é indicada principalmente para simulação em biomecânica, *joysticks* de videogames e em aplicações industriais. O valor desta UMI é de aproximadamente US\$ 1.800,00.

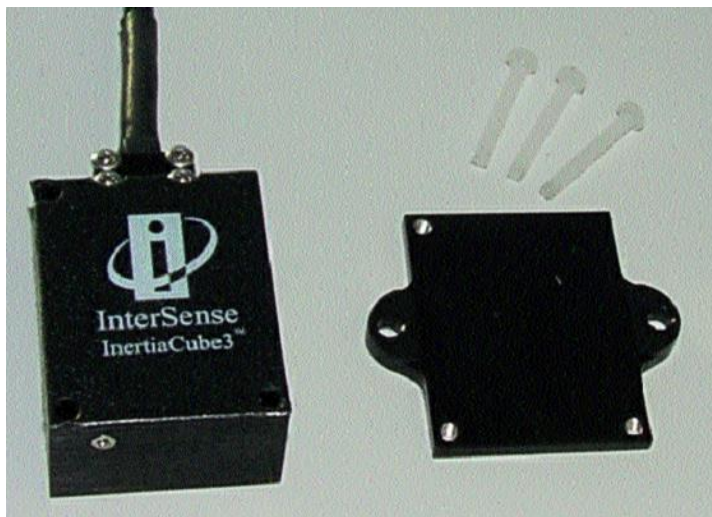


FIGURA 36: IMU *INERTIACUBE3™*
FONTE: INTERSENSE (2014)

No modo padrão, os eixos da UMI *InertiaCube3* são convencionados com o eixo x_b orientado para frente, o eixo y_b para a direita e o eixo z_b para baixo, conforme figura 37.

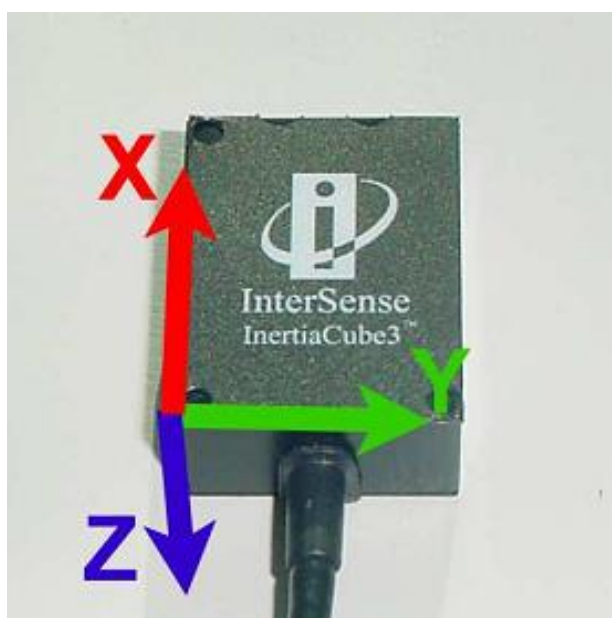


FIGURA 37: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – *INERTIACUBE3™*
FONTE: INTERSENSE (2015)

A tabela 3 apresenta as especificações técnicas do *InertiaCube3* fornecidas pelo fabricante.

TABELA 3: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS – *INERTIACUBE3™*

Resolução Angular	0,03°
Predição	> 50 milisegundos
Latência Mínima	2 milisegundos
Frequência de Operação	> 180 Hz
Intervalo de funcionamento de temperatura	0°C a +50°C
Peso	86 gramas
Dimensões	60 x 35 x 20 MM

FONTE: INTERSENSE (2014)

3.1.3 *MTi-G™*

O SNI *MTi-G™* (FIGURA 38) é fabricado pela empresa Xsens e possui uma tríade de acelerômetros, de giroscópios e de magnetômetros. Este possui suporte integrado para GPS e processador interno. Segundo o fabricante, o *MTi-G™* é indicado para aplicações em robótica, veículos autônomos e aeroespaciais. O valor deste SNI é de cerca de € 3.800,00.



FIGURA 38: SNI *MTi-G™*
FONTE: XSENS (2015)

Assim como nos demais dispositivos apresentados, as leituras do SNI *MTi-G™* são realizadas, por padrão, em um sistema dextrógiro. Este sistema é fixado ao corpo e é definido com o eixo x_b orientado para frente, o eixo y_b para a esquerda e o eixo z_b para cima (FIGURA 39).

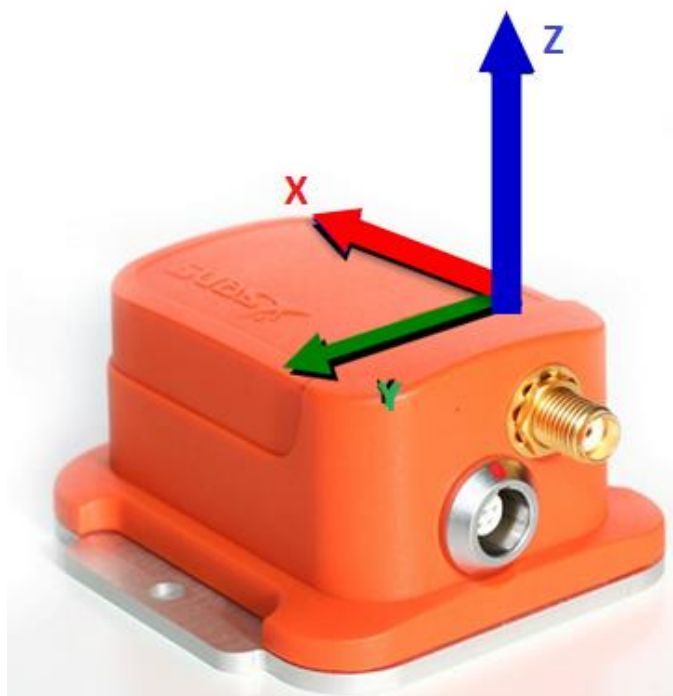


FIGURA 39: EIXOS DO SISTEMA DE REFERÊNCIA DO CORPO – *MTi-G™*
 FONTE: MODIFICADO DE XSENS (2015)

A tabela 4 apresenta as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante.

TABELA 4: ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS - *MTi-G™*

Acelerômetro	3 eixos Full Scale (padrão): $\pm 50 \text{ m/s}^2$ Linearidade: 0,2% do full scale Estabilidade Bias: 0,02% Fator de Escala: 0,03% Ruído: $0,002 \text{ m/s}^2/\sqrt{\text{Hz}}$ Erro de Alinhamento: 0,1 Hz Bandwidth: 30 Hz
Frequência de Operação	> 512 Hz
Intervalo de funcionamento de temperatura	-20°C a +60°C
Peso	68 gramas
Dimensões	58 x 58 x 33 mm

FONTE: XSENS (2015)

3.1.4 Bancada de Calibração Giroscópica

Os experimentos 2 (b) e 4, a serem descritos nas seções 3.2.1.2 e 3.2.2.4 respectivamente, foram realizados com o auxílio de uma bancada de calibração giroscópica. Este equipamento foi desenvolvido por Santos (2010) para simular movimentos rotacionais em três eixos. Esta bancada encontra-se instalada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

De acordo com Santos (2010), a bancada de calibração (FIGURA 40) possui três eixos de rotação caracterizados por uma junta esférica. Ela é capaz de executar ensaios estáticos com resolução de 0,18 segundos de arco e ensaios dinâmico-angulares com velocidades de até 450°/s, sob acelerações máximas de 1,125°/s². O sistema de acionamentos de cada junta articulada é composto por servomotores de corrente contínua com escovas. O sistema de transmissão utiliza correias dentadas e engrenagens do tipo *Harmonic-Drive*. Estes elementos podem inserir atrito que interferem na linearidade do movimento circular gerado, principalmente para movimentos de pequena magnitude.

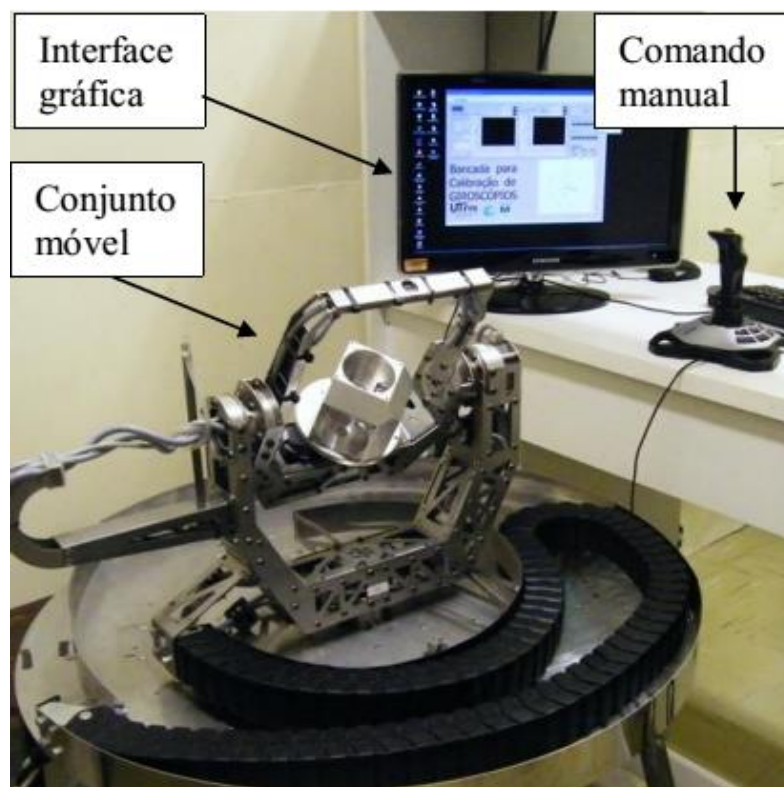


FIGURA 40: BANCADA DE CALIBRAÇÃO
FONTE: SANTOS (2010)

A base de estabilização constitui-se de um bloco em concreto armado, que pesa 440 kg, flutuante em piscina de areia grossa para dissipar as vibrações geradas pela bancada e filtrar as vibrações do solo para os sensores inerciais. O sistema de acionamento da bancada possui ainda um quarto eixo construído de forma independente dos demais eixos da bancada.

3.2 MÉTODOS

Nesta seção são apresentadas as etapas executadas para a realização dos testes propostos. A primeira etapa consiste na realização de experimentos em laboratório para a determinação dos erros sistemáticos e para a modelagem dos erros aleatórios. A segunda etapa consiste na execução de experimentos para a verificação das correções obtidas na primeira etapa, com procedimentos tanto em campo quanto em laboratório (TABELA 5).

TABELA 5: EXPERIMENTOS REALIZADOS

Testes Executados		<i>Colibri</i>	<i>InertiaCube3</i>	<i>MTi-G</i>
Testes para determinação de erros	1) Variância de Allan	✓	✓	✓
	2.a) Calibração Multiposições - sem equipamentos	✓	✓	✓
	2.b) Calibração Multiposições - Bancada	✓	✓	✓
Testes de Verificação	3) Trajeto com GPS	✓	✓	✓
	4) Deslocamento Vertical	✓	✓	✓

FONTE: A AUTORA (2015)

3.2.1 Experimentos para Estimativa/Determinação dos Erros Aleatórios e Sistemáticos

3.2.1.1 Experimento 1 - Variância de Allan

Consiste de um teste estático empregado na estimativa de erros aleatórios (seção 2.4.2). A figura 41 apresenta um diagrama para a metodologia seguida para a realização do teste da variância de Allan.

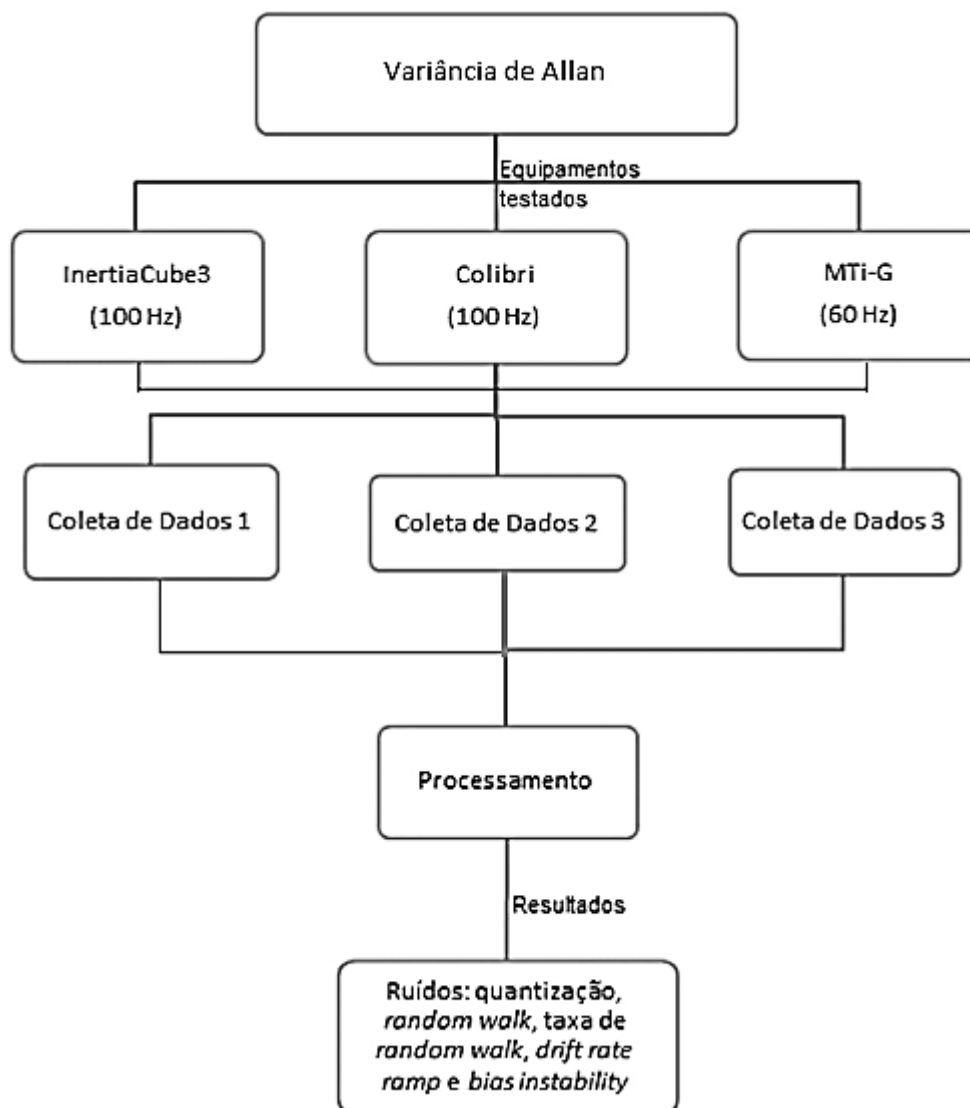


FIGURA 41: DIAGRAMA - VARIÂNCIA DE ALLAN
 FONTE: A AUTORA (2015)

a) Coleta de Dados

Neste teste os equipamentos permaneceram imóveis durante todo o período de coleta de dados. Os dados das acelerações foram coletados por um período de tempo de 2 horas. Para a UMI *Colibri* e o SNI *MTi-G*, utilizou-se uma frequência de amostragem igual 100 Hz. As acelerações do inercial *InertiaCube3* foram coletadas a uma frequência de amostragem de 60 Hz, devido a problemas no armazenamento do software de coleta de dados.

b) Processamento

Os dados foram exportados para arquivos em formato ASCII e separados por eixos. O processamento das acelerações foi realizado por um algoritmo implementado pela autora, em ambiente *Matlab 2012B*, com interface gráfica (FIGURA 42), conforme procedimento descrito na seção 2.5.2.1.

A partir do gráfico da variância de Allan plotado com relação ao tempo em escala logarítmica, foram estimados os ruídos de quantização, *random walk*, taxa de *random walk*, *drift rate ramp* e *bias instability*, vistos na seção 2.4.2.1.

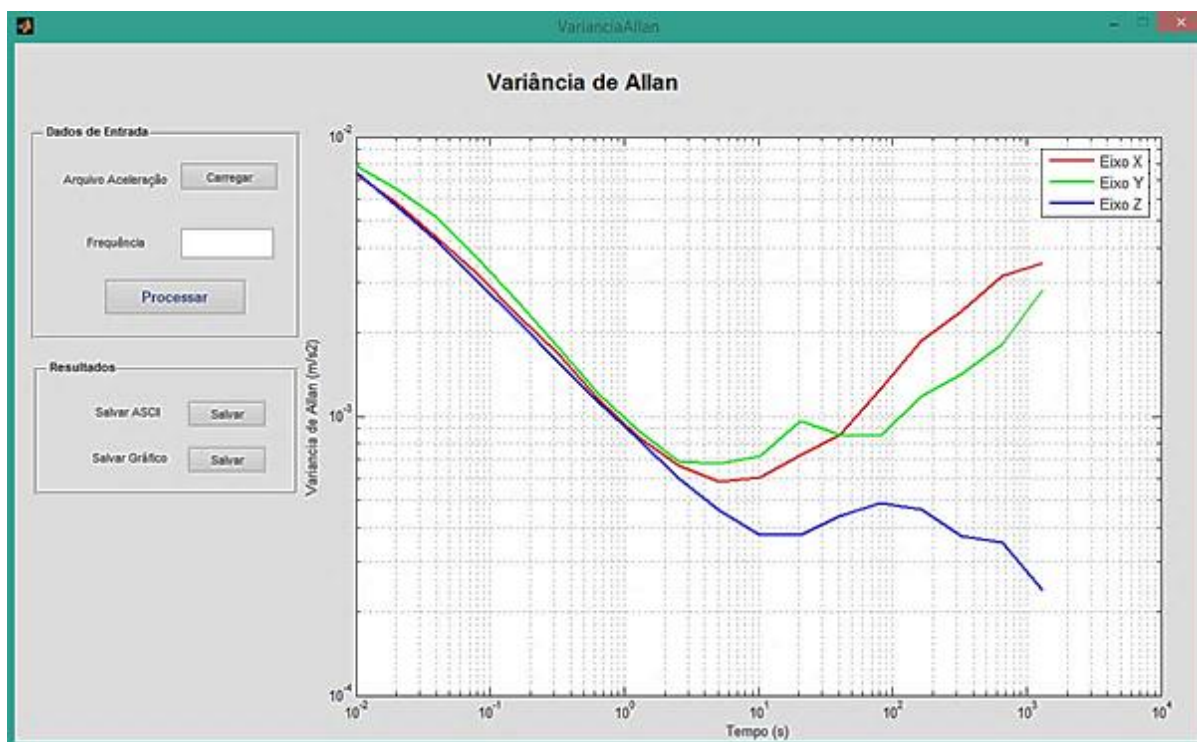


FIGURA 42: ALGORITMO PARA PROCESSAMENTO DA VARIÂNCIA DE ALLAN
FONTE: A AUTORA (2015)

3.2.1.2 Experimento 2 - Calibração pelo Método Multi-Posições Modificado

A Calibração pelo Método Multi-Posições Modificado tem como finalidade determinar os principais erros sistemáticos. Este foi executado em duas etapas, conforme procedimento exposto na seção 2.5.1.2.

a) Calibração Sem Equipamentos de Calibração

A figura 43 apresenta um diagrama para a metodologia seguida para a realização da calibração pelo Método Multi-Posições sem equipamentos específicos de calibração.

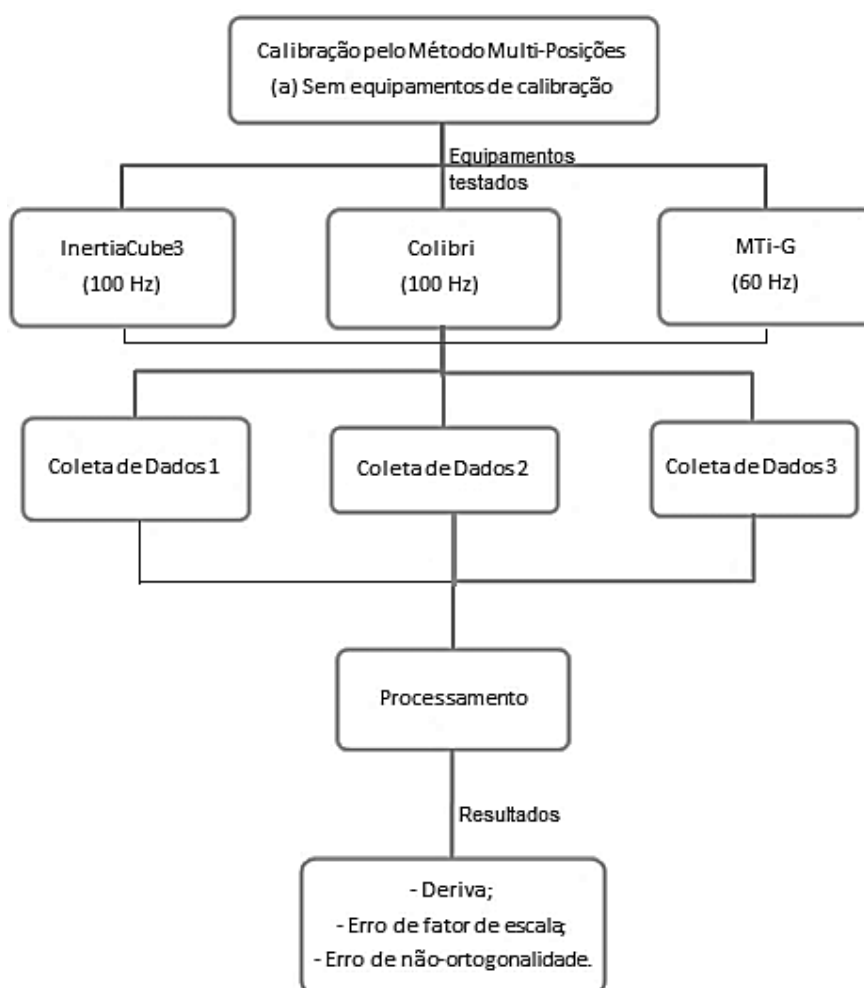
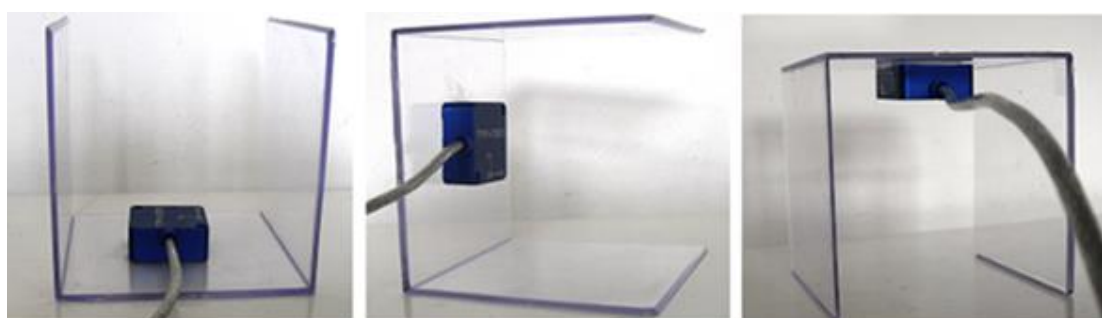


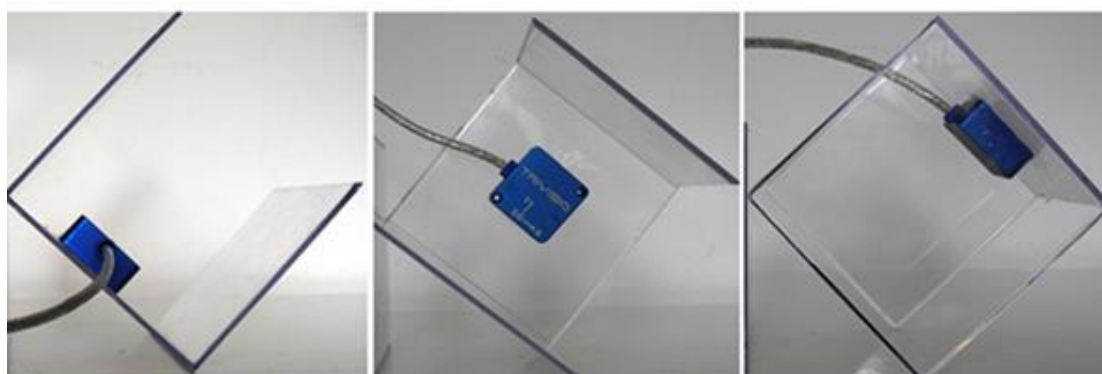
FIGURA 43: DIAGRAMA - CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES (SEM EQUIPAMENTOS DE CALIBRAÇÃO)
FONTE: A AUTORA (2015)

i. Coleta de Dados

Para a coleta de dados em diferentes atitudes, não é necessário nenhum equipamento ou aparelho específico de calibração, uma vez que são necessários apenas ângulos aproximados (seção 2.5.1.2). Para fins de praticidade, utilizou-se um cubo de acrílico para auxiliar na coleta de dados nas 26 posições. A figura 44 exemplifica a coleta de dados em algumas posições: (a) com as faces apontando para baixo, (b) as arestas e (c) as quinas, com a UMI *Colibri*.



(a) Faces para baixo



(b) Arestas para baixo



(c) Quinas para baixo

FIGURA 44: COLETA DE DADOS PARA CALIBRAÇÃO DA UMI COLIBRI
Fonte: A autora (2015)

A fim de verificar a variabilidade dos resultados para um mesmo sensor, quando realizada a mesma calibração em diferentes períodos de tempo, foram executados três ensaios com intervalos de 1-2 horas entre eles. Em cada ensaio foram coletados os dados de aceleração por um período de tempo de 40 segundos a 1 minuto, em cada uma das 26 posições.

ii. Processamento

Os dados coletados foram exportados para arquivos no formato ASCII. O processamento das acelerações foi realizado a partir de um algoritmo implementado pela autora em ambiente *Matlab 2012B* (FIGURA 45), de acordo com a metodologia para o ajustamento descrita na seção 2.5.1.2. O algoritmo permite o cálculo dos erros de deriva, de fator de escala e de não-ortogonalidade, e salvar os resultados do ajustamento.



FIGURA 45: ALGORITMO PARA CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES MODIFICADO
Fonte: A autora (2015)

b) Calibração Com uma Bancada de Calibração Giroscópica

A figura 46 apresenta um diagrama para a metodologia seguida para a realização da calibração pelo Método Multi-Posições sem equipamentos específicos de calibração.

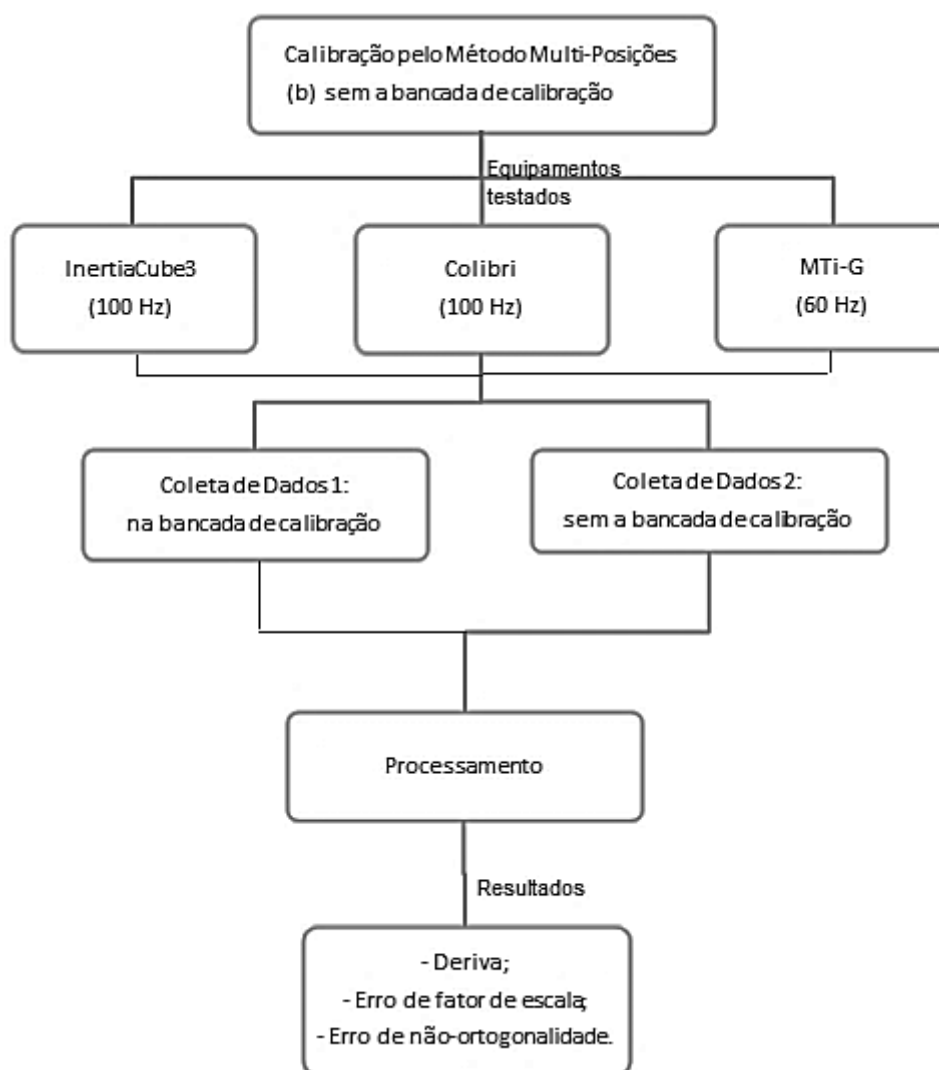


FIGURA 46: DIAGRAMA - CALIBRAÇÃO MULTI-POSICÕES (COM E SEM A BANCADA DE CALIBRAÇÃO)
FONTE: A AUTORA (2015)

i. Coleta de Dados

A coleta de dados das acelerações no experimento anterior foi realizada sem o auxílio de equipamentos de calibração. A fim de verificar se as posições com ângulos aproximados exercem uma influência significativa nos resultados da calibração, executou-se uma calibração pelo Método Multi-Posições Modificado com o auxílio de uma bancada de calibração giroscópica (seção 3.1.4). A figura 47 mostra o SNI *MTi-G* durante a coleta de dados.



FIGURA 47: COLETA DE DADOS DO SNI *MTi-G* COM AUXILIO DE UMA BANCADA DE CALIBRAÇÃO
FONTE: A AUTORA (2015)

Na sequência, com o inercial ainda ligado, realizou-se o mesmo procedimento sem a bancada. O objetivo de se manter os equipamentos ligados de uma coleta de dados para a outra é evitar a influência de variações *run-to-run* (seção 2.4.1).

ii. Processamento

O processamento foi realizado pelo mesmo procedimento do teste anterior (seção 3.2.1.1a).

3.2.2 Testes de Verificação

3.2.2.3 Experimento 3 - Trajetória com GPS e Acelerômetros

De modo a verificar se a aplicação dos parâmetros de calibração e da modelagem dos ruídos resulta em uma melhora significativa nos dados coletados, realizou-se um teste de uma trajetória com os acelerômetros, com relação a uma trajetória conhecida. A figura 48 apresenta um diagrama para a metodologia seguida para a realização deste teste.

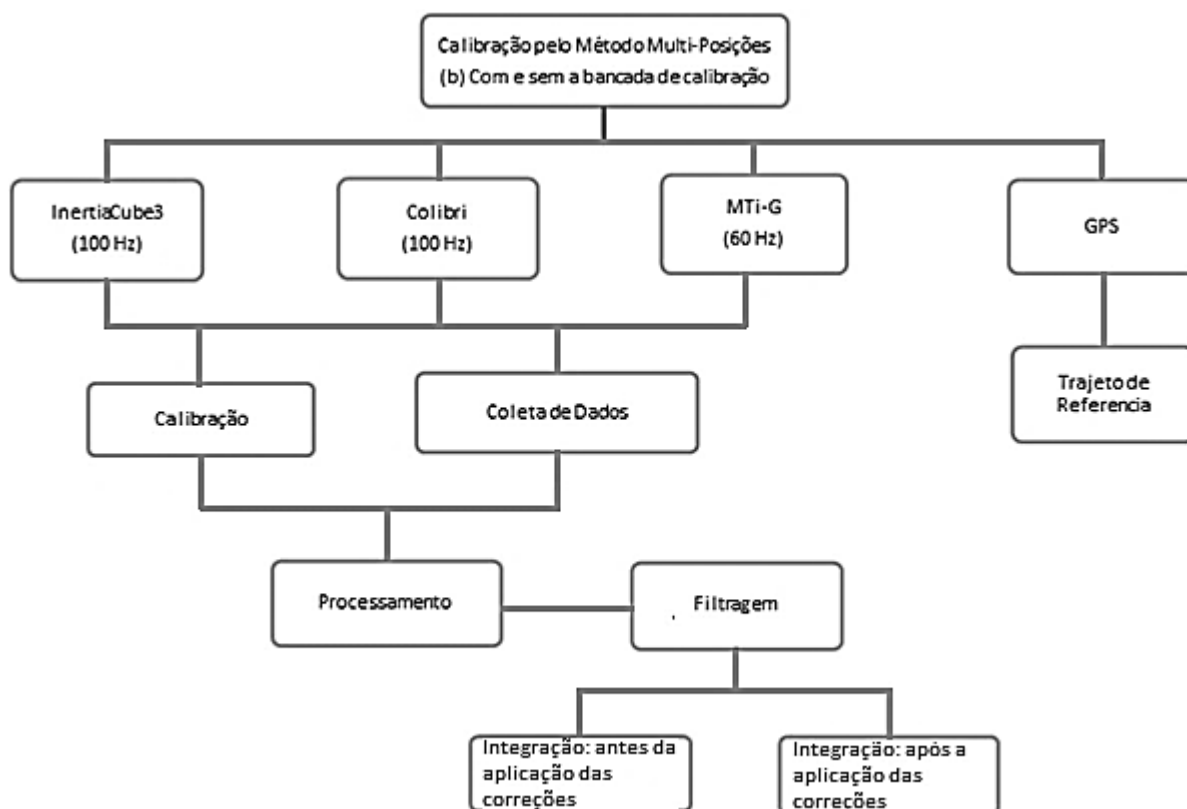


FIGURA 48: DIAGRAMA – TESTE DA TRAJETÓRIA
FONTE: A AUTORA (2015)

a) Coleta de Dados

Os dispositivos foram testados de forma autônoma e, por este motivo, escolheu-se um curto trajeto. A área escolhida para a realização do experimento foi em um estacionamento no Centro Politécnico da UFPR. Com os sensores em repouso, partiu-se de um ponto com coordenadas conhecidas via GPS e percorrendo uma trajetória aproximadamente retangular, até retornar ao ponto inicial (FIGURA 49). Os testes tiveram duração de aproximadamente 1 minutos e 30 segundos.

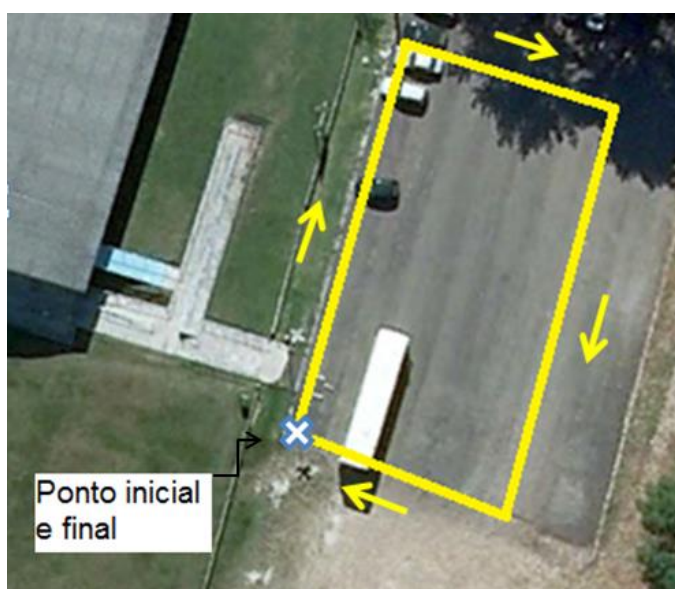


FIGURA 49: TRAJETÓRIA USADA PARA APLICAÇÃO DO TESTE DE DESLOCAMENTO
FONTE: GOOGLE EARTH, MODIFICADO PELA AUTORA (2015)

A trajetória de referência foi determinada com o auxílio de um receptor GPS *Leica SR-20*, pelo método relativo cinemático. O equipamento foi inicializado por um período de tempo de 10 minutos e o trajeto com GPS foi realizado a uma taxa de gravação de 1 segundo. Os dados foram pós-processados com código e fase da onda portadora. A figura 50 apresenta a antena GPS posicionada no ponto inicial durante a etapa de inicialização.



FIGURA 50: POSICIONAMENTO RELATIVO CINEMÁTICO
FONTE: A AUTORA (2015)

Durante o deslocamento, os inerciais foram fixados à lateral da antena GPS, tomando o cuidado para evitar rotação, uma vez que estas não foram consideradas no cálculo dos deslocamentos.

b) Processamento

A primeira etapa consistiu em transformar as acelerações em cada eixo para um mesmo referencial. Os deslocamentos foram calculados da seguinte forma:

- i. Aplicação do filtro *Butterworth* passa-baixa (seção 2.6.3.c) de quarta ordem às acelerações. Escolheu-se um filtro de quarta ordem a partir da realização de testes, uma vez que esta ordem permitiu um melhor ajuste dos deslocamentos calculados com relação ao deslocamento padrão;
- ii. Integração das acelerações filtradas pelo método trapezoidal (seção 2.6.2), resultando na velocidade;

- iii. Aplicação do filtro *Butterworth* passa-baixa de quarta ordem às velocidades;
- iv. Integração das velocidades filtradas pelo método trapezoide, resultando no deslocamento.

A figura 51 ilustra a aplicação do filtro *Butterworth* de quarta ordem à aceleração no eixo x da UMI *Colibri*. Em azul têm-se as acelerações brutas e em verde as acelerações filtradas.

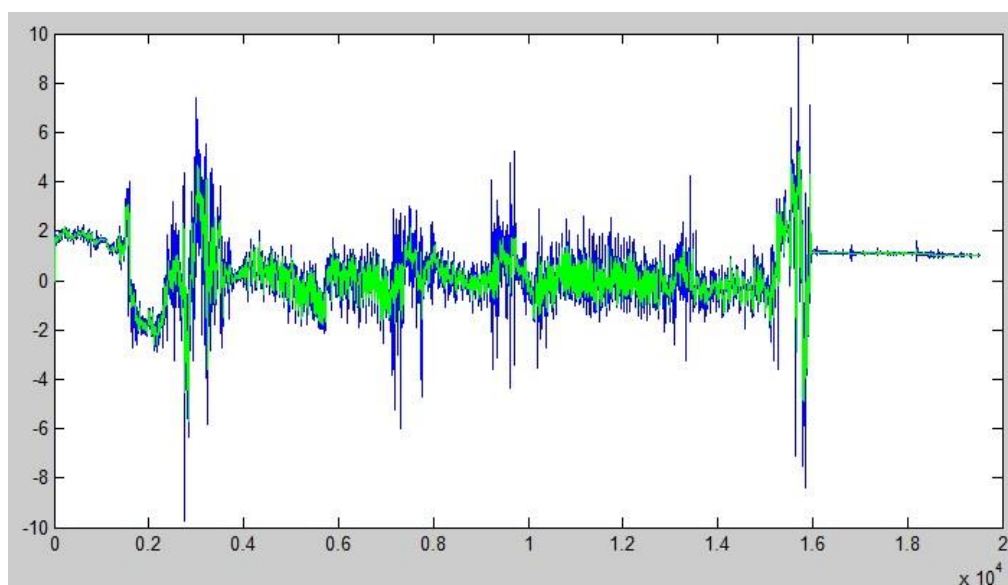


FIGURA 51: ACELERAÇÕES BRUTAS E FILTRADAS
FONTE: A AUTORA (2015)

Para verificar o efeito da aplicação dos parâmetros, as acelerações foram corrigidas dos erros de deriva, de fator de escala, de não-ortogonalidade e ruídos calculados, a partir das equações (23), (24) e (25). Na sequência, os deslocamentos foram recalculados a partir das acelerações corrigidas, seguindo as mesmas etapas anteriormente citadas.

Com o objetivo de facilitar a representação e visualização da trajetória descrita por GPS e por acelerômetros, as coordenadas do percurso GPS foram transformadas para referencial local. O levantamento com inercial foi executado sem uma referência externa. Porém, uma vez que nos interessa apenas as distâncias calculadas, o primeiro ponto do deslocamento via aceleração foi forçado a coincidir

com o primeiro ponto do deslocamento de referência, assim como sua orientação inicial nos primeiros pontos do percurso.

3.2.2.4 Experimento 4 - Deslocamento Vertical

Conforme visto na seção 1.1, a integração do inercial *Colibri* a uma boia de monitoramento visa auxiliar a detecção de variações bruscas do nível da água em casos de inundações repentinas. Tem-se esta preocupação uma vez que podem ocorrer perdas de sinal do GPS, mesmo que por curtos períodos de tempo, conforme visto na seção 1. Na sequência é apresentada a metodologia seguida para a realização deste teste.

a) Coleta de Dados

Utilizou-se um servomotor (FIGURA 53) correspondente ao quarto eixo da bancada de calibração (seção 3.1.4), que permitiu programar a execução de um deslocamento vertical de acordo com um tempo pré-determinado. Os inerciais ficaram suspensos, enquanto o servomotor executava os deslocamentos verticais no sentido ascendente.

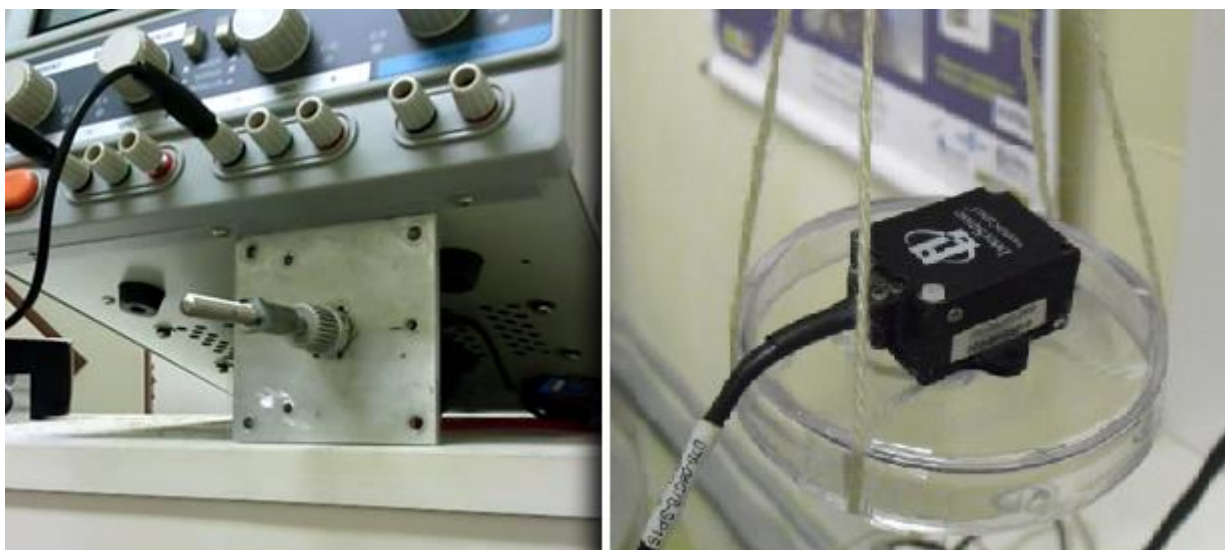


FIGURA 52: (A) SERVOMOTOR E (B) *INERTIACUBE3* DURANTE O TESTE VERTICAL
FONTE: A AUTORA (2015)

Apesar da difícil estimativa da variação do nível da água durante uma inundação (seção 2.1.1), com base nos dados apresentados na mesma seção, foram consideradas algumas situações hipotéticas para a execução dos testes. Estes foram executados pelo servomotor, com deslocamentos verticais de 2 cm, 5 cm, 10 cm e 20 cm, por um período de 5 minutos cada.

b) Processamento

O processamento foi realizado pelo mesmo procedimento do teste anterior (seção 3.2.2.3).

4 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação dos testes, bem como as respectivas análises.

4.1 EXPERIMENTO 1 - VARIÂNCIA DE ALLAN

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do teste exposto na seção 3.2.1.1. Foram obtidos os valores da Variância de Allan (APÊNDICE 2). Estes valores foram plotados em um gráfico em escala logarítmica com relação ao tempo.

a) UMI *Colibri*

A figura 54 apresenta o gráfico da variância de Allan para os três eixos dos acelerômetros da UMI *Colibri*. Neste gráfico é possível observar que a variância é máxima no início do teste. As acelerações no eixo x apresentam a menor variância, com valor igual a 0,0154 m/s/s. No eixo y este valor corresponde a 0,0223 m/s/s e 0,0237 m/s/s no eixo z.

Cerca de 20 segundos após o início do teste, a variância de Allan diminui e permanece aproximadamente estável por um determinado período. Os valores da variância para as acelerações nos eixos x, y, e z, no tempo igual a 20 segundos, são respectivamente, 0,0010 m/s/s, 0,0007 m/s/s e 0,0006 m/s/s.

Ao final do teste observa-se um discreto aumento na variância. Neste caso, as acelerações no eixo y apresentam a menor variância, com valor igual a 0,0005 m/s/s. As acelerações nos eixos x e z apresentam variâncias iguais a 0,0022 m/s/s e 0,0005 m/s/s, respectivamente.

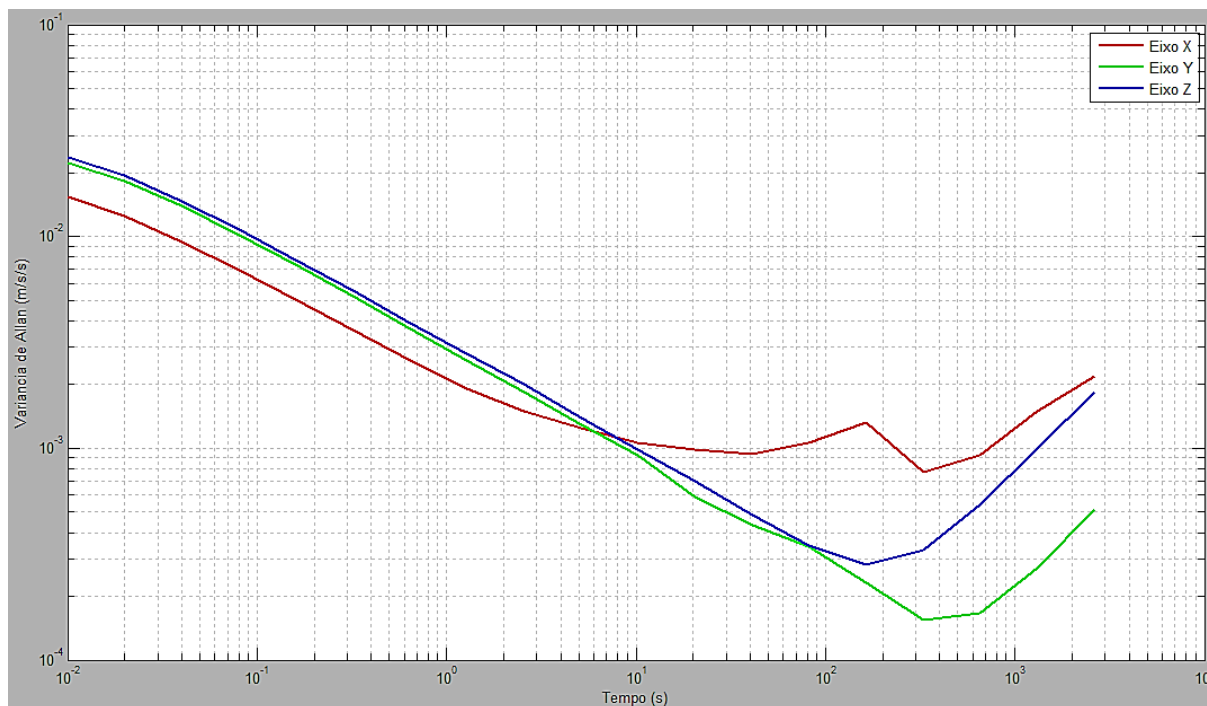


FIGURA 53: VARIÂNCIA DE ALLAN - COLIBRI
 FONTE: A AUTORA (2015)

b) UMI *InertiaCube3*

A figura 55 apresenta o gráfico da variância de Allan para os acelerômetros da IMU *InertiaCube3*. Neste gráfico é possível observar que a variância é máxima no início do teste. O eixo z apresenta a menor variância, com valor igual a 0,0186 m/s/s. Os valores da variância de Allan para as acelerações nos eixos x e y são, respectivamente, 0,0198 m/s/s e 0,0191 m/s/s.

Após o início do teste, observa-se uma queda acentuada nas variâncias, até cerca de 20 segundos. Após este período de tempo as variâncias permanecem aproximadamente estáveis até o final do teste. Na fração de tempo correspondente a 20 segundos, tem-se que as variâncias de Allan para as acelerações nos eixos x, y e z são iguais a 0,0007 m/s/s, 0,0008 m/s/s e 0,0004 m/s/s, respectivamente.

Ao final do teste, tem-se que os valores das variâncias de Allan para as acelerações nos eixos x, y e z são iguais a 0,0006 m/s/s, 0,0006 m/s/s e 0,0001 m/s/s, respectivamente.

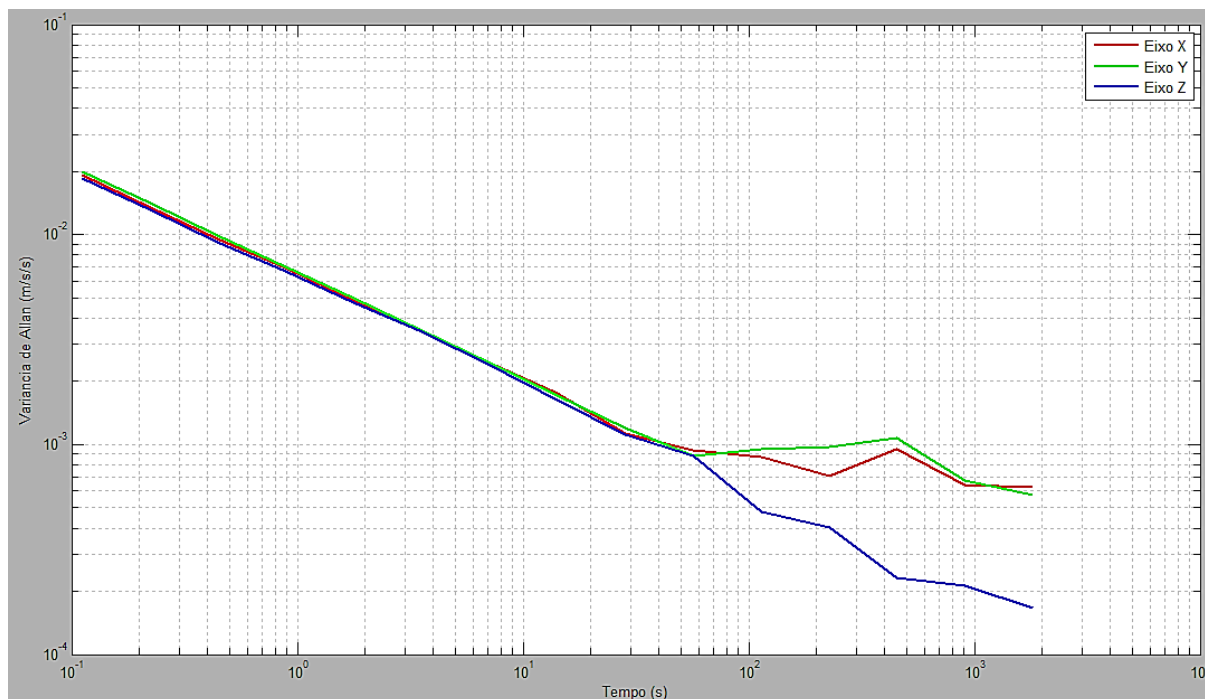


FIGURA 54: VARIÂNCIA DE ALLAN – INERTIACUBE3
 FONTE: A AUTORA (2015)

c) SNI *MTi-G*

Na figura 56 pode-se observar o gráfico da variância de Allan para os três eixos dos acelerômetros do SNI *MTi-G*. Neste gráfico é possível observar que, assim como nos dois casos anteriormente citados, a variância é máxima no início do teste. Neste caso, a variância é menor para as acelerações no eixo x, com valor igual a 0,0073 m/s/s. O valor das variâncias de Allan para as acelerações nos eixos y e z são, respectivamente, 0,0079 m/s/s e 0,0074 m/s/s.

Após o início do teste, observa-se uma queda acentuada nas variâncias, até cerca de 10 segundos. Neste período de tempo, tem-se que as variâncias de Allan para as acelerações nos eixos x, y e z são iguais a 0,0006 m/s/s, 0,0007 m/s/s e 0,0003 m/s/s, respectivamente.

Ao final do teste, observa-se um aumento nos valores das variâncias de Allan para as acelerações nos eixos x e y, correspondentes a 0,0035 m/s/s e 0,0028 m/s/s. No eixo z, a variância permanece relativamente estável, com valor igual a 0,0002 m/s/s.

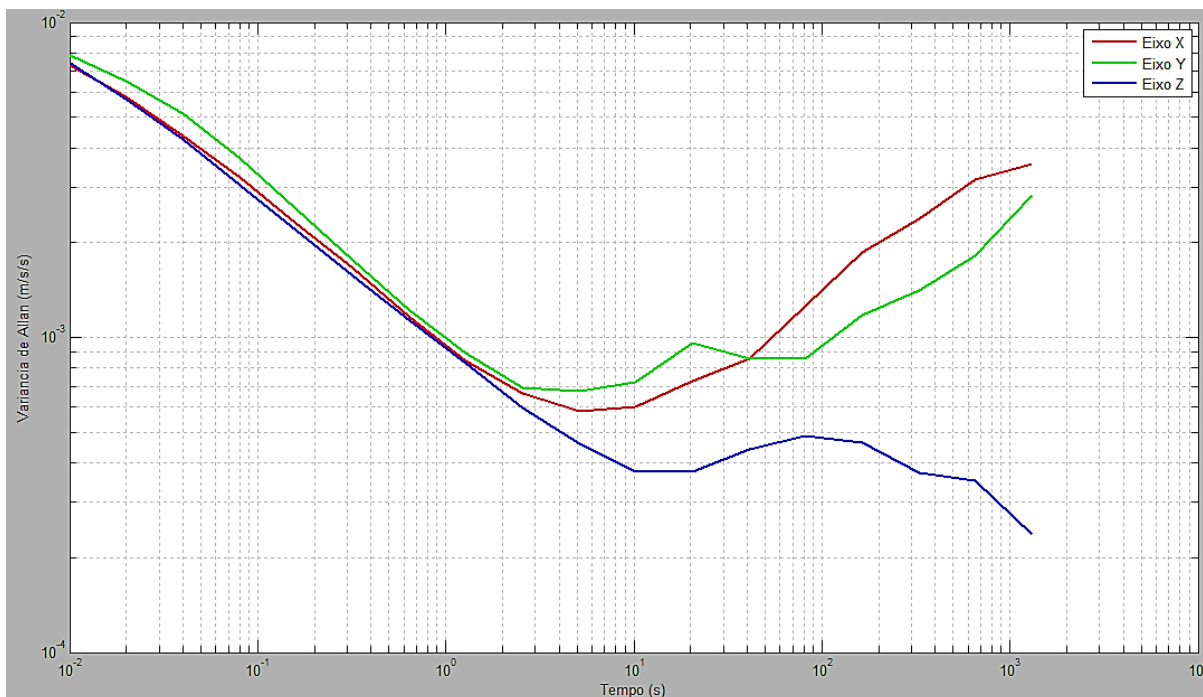


FIGURA 55: VARIÂNCIA DE ALLAN – MTI-G™
 FONTE: A AUTORA (2015)

4.1.1 Ruídos

Conforme visto na seção 2.5.2.1.1, a partir do gráfico da variância de Allan é possível estimar os valores de diferentes tipos de ruídos. As tabelas 6 a 10 apresentam os valores dos ruídos de quantização, *random walk*, *drift rate ramp*, *bias instability* e taxa de *random walk*, respectivamente.

Ao analisar a tabela 6, pode-se verificar que os dados de aceleração da UMI *InertiaCube3* apresentam os maiores níveis de ruídos de quantização. Os menores níveis são apresentados para o SNI *MTi-G*, sendo que para este dispositivo, as acelerações foram menores no eixo x e maiores para o eixo z.

TABELA 6: RUÍDO DE QUANTIZAÇÃO

Ruído de Quantização (m/s)			
Acelerômetro	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
<i>Colibri</i>	0,00947	0,00735	0,01077
<i>InertiaCube3</i>	0,08185	0,01708	0,01585
<i>MTi-G</i>	0,00075	0,00719	0,00503

FONTE: A AUTORA (2015)

Assim como ocorre com o ruído de quantização, os níveis de ruído de *random walk* são menores para as acelerações do SNI *MTi-G* (TABELA 7). Porém, as acelerações do UMI *Colibri* apresentam níveis de *random walk* discretamente maiores do que aqueles apresentados pela UMI *InertiaCube3*.

TABELA 7: RANDOM WALK

Random Walk (m/s/s ^{1/2})			
Acelerômetro	X	Y	Z
<i>Colibri</i>	0,01395	0,01609	0,02153
<i>InertiaCube3</i>	0,01346	0,01416	0,01314
<i>MTi-G</i>	0,00657	0,00079	0,00042

FONTE: A AUTORA (2015)

A tabela 8 apresenta os valores dos ruídos de *drift rate ramp* para os três dispositivos testados. Conforme pode-se observar, os níveis de ruído foram menores para a UMI *Colibri* nos eixos x e y. No eixo z verifica-se que o menor valor deste ruído foi obtido pelo SNI *MTi-G*. Para a UMI *InertiaCube3* o *drift rate ramp* não foi detectado ou não modelado.

TABELA 8: DRIFT RATE RAMP

Drift Rate Ramp (m/s/s ²)			
Acelerômetro	X	Y	Z
<i>Colibri</i>	0,00185	0,00027	0,00077
<i>InertiaCube3</i>	-	-	-
<i>MTi-G</i>	0,00212	0,00084	0,00046

FONTE: A AUTORA (2015)

Assim como ocorre com o ruído de *drift rate ramp* (TABELA 8), os ruídos de *bias instability* (TABELA 9) e taxa de *random walk* (TABELA 10) não foram identificados ou modelados em alguns dos eixos das UMI's *Colibri* e *InertiaCube3*.

TABELA 9: *BIAS INSTABILITY*
Bias Instability (m/s/s)

Acelerômetro	X	Y	Z
<i>Colibri</i>	0,00093	-	-
<i>InertiaCube3</i>	-	0,00095	-
<i>MTi-G</i>	0,00058	0,00068	0,00038

FONTE: A AUTORA (2015)

TABELA 10: TAXA DE *RANDOM WALK*
Taxa de Random Walk (m/s/h/s^{1/2})

Acelerômetro	X	Y	Z
<i>Colibri</i>	0,00119	-	0,00044
<i>InertiaCube3</i>	0,00083	-	-
<i>MTi-G</i>	0,00066	0,00129	0,00041

FONTE: A AUTORA (2015)

4.2 EXPERIMENTO 2 - CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação da calibração pelo Método Multi-Posições, conforme exposto na seção 3.2.1.2. Neste teste foram determinados os valores dos erros sistemáticos de deriva, de fator de escala e de não-ortogonalidade.

a) Com o auxílio de um cubo de acrílico

O primeiro cenário de calibração pelo Método Multi-Posições procedeu-se sem o auxílio de equipamentos de calibração. Apenas foi utilizado como apoio um cubo de acrílico, conforme descrito na seção 3.2.1.2. Optou-se por realizar três ensaios, com intervalo de 1-2 h entre cada coleta de dados, a fim de verificar se há grande variabilidade dos parâmetros calculados de uma calibração para outra.

A tabela 11 apresenta os resultados da calibração para os acelerômetros da UMI *Colibri*. Os valores do erro de fator de escala nos três eixos permaneceram os mesmos, nos três ensaios realizados. Já a deriva apresenta variações maiores, na ordem da segunda casa decimal para o eixo x, e da primeira casa decimal para os eixos y e z.

TABELA 11: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – COLIBRI

<i>Colibri</i>					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Variância
Deriva (g)	x	-0,06996	-0,05108	-0,06502	$6,4 \times 10^{-5}$
	y	0,03056	0,16336	-0,01878	$5,9 \times 10^{-3}$
	z	0,05925	-0,11613	0,28604	$2,7 \times 10^{-2}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99803	-1,99853	-1,99943	$3,4 \times 10^{-7}$
	y	-1,01161	-1,03752	-1,01230	$1,5 \times 10^{-4}$
	z	-1,00643	-0,99400	-1,00080	$2,6 \times 10^{-5}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00018	0,00018	0,00018	0
	y	0,00182	0,00182	0,00182	0
	z	0,00167	0,00167	0,00167	0

FONTE: A AUTORA (2015)

A tabela 12 apresenta os resultados da calibração para os acelerômetros da UMI *InertiaCube3*. Verifica-se que os erros de fator de escala e de não-ortogonalidade apresentam uniformidade de um ensaio para o outro. O erro de fator de escala possui variações na ordem da terceira casa decimal para os eixos x e y, e da quarta casa decimal para o eixo z. No erro de não-ortogonalidade, o valor do eixo x permanece o mesmo para os três ensaios, enquanto os valores nos eixos y e z apresentam variações a partir da quinta casa decimal.

Por outro lado, os valores dos erros de deriva apresentam maior variação de uma calibração para outra. As diferenças são observadas a partir da segunda casa

decimal. Estas inconsistências podem ser causadas tanto pela componente fixa quanto pela componente dinâmica da deriva, conforme seção 2.4.1.1.

TABELA 12: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – *INERTIACUBE3*

<i>InertiaCube3</i>					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Variância
Deriva (g)	x	-0,05158	-0,06760	-0,06344	$4,6 \times 10^{-5}$
	y	-0,00809	0,01121	-0,00968	$9,1 \times 10^{-5}$
	z	-0,04434	-0,05727	-0,07045	$1,1 \times 10^{-4}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99638	-1,99508	-1,99498	$4,1 \times 10^{-7}$
	y	-0,99057	-0,98903	-0,99157	$1,1 \times 10^{-6}$
	z	-0,99456	-0,99495	-0,99481	$2,6 \times 10^{-8}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00018	0,00018	0,00018	0
	y	0,00182	0,00182	0,00187	$5,6 \times 10^{-10}$
	z	0,00167	0,00167	0,00174	$1,2 \times 10^{-9}$

FONTE: A AUTORA (2015)

Os erros sistemáticos determinados para os acelerômetros do SNI *MTi-G* são apresentados na tabela 13. Assim como ocorre com as UMI's *Colibri* e *InertiaCube3*, as maiores discrepâncias são verificadas para o erro de deriva. As variações verificadas a partir da segunda e terceira casa decimal. Já no erro fator de escala, as variações são da ordem da terceira casa decimal, enquanto para o erro de não-ortogonalidade os valores não apresentam variação.

TABELA 13: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – *MTi-G*

<i>Mti-G</i>					
Erro	Eixo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Variância
Deriva (g)	x	0,01260	0,02722	0,01037	$5,6 \times 10^{-5}$
	y	0,01099	0,01530	0,01359	$3,1 \times 10^{-6}$
	z	-0,01392	0,01931	0,02210	$2,7 \times 10^{-4}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99985	-1,99967	-1,99867	$2,7 \times 10^{-7}$
	y	-0,99094	-0,99215	-0,99468	$2,4 \times 10^{-6}$
	z	-0,99568	-0,98907	-0,99281	$7,3 \times 10^{-6}$
Erro de Não Ortogonalidade (rad)	x	0,00001	0,00001	0,00001	0
	y	0,00018	0,00018	0,00018	0
	z	0,00017	0,00017	0,00017	0

FONTE: A AUTORA (2015)

b) Com uma bancada de calibração e o cubo de acrílico

Com o objetivo de verificar se a realização do teste com o auxílio de um equipamento que executa as rotações entre as posições com maior acurácia exerce alguma influência nos resultados, foram realizados os ensaios conforme procedimento descrito em 3.2.1.2b. Os dados de aceleração relativos às atitudes foram coletados na bancada de calibração e na sequência o mesmo procedimento foi realizado fora da bancada.

Os resultados obtidos para a UMI *Colibri* podem ser visualizados na tabela 14. Observa-se que, assim como os resultados dos testes anteriormente descritos, as discrepâncias para os erros de fator de escala e de não-ortogonalidade são inferiores ao erro de deriva. O mesmo pode ser verificado para os parâmetros calculados pela calibração com as acelerações da UMI *InertiaCube3* e do SNI *MTi-G*, respectivamente, tabelas 15 e 16.

TABELA 14: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (*COLIBRI*)

<i>Colibri</i>				
Erro	Eixo	Bancada	Cubo	Variância
Deriva (g)	x	-0,07800	-0,07525	$1,9 \times 10^{-6}$
	y	-0,03237	0,03393	$1,1 \times 10^{-3}$
	z	0,06568	0,09878	$2,7 \times 10^{-4}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99865	-1,99941	$1,4 \times 10^{-7}$
	y	-1,02011	-1,01474	$7,2 \times 10^{-6}$
	z	-1,01339	-1,01321	$8,1 \times 10^{-9}$
Erro de Não Ortog. (rad)	x	0,00001	0,00001	0
	y	0,00018	0,00018	0
	z	0,00035	0,00035	0

FONTE: A AUTORA (2015)

TABELA 15: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (*INERTIACUBE3*)

<i>InertiaCube3</i>				
Erro	Eixo	Bancada	Cubo	Variância
Deriva (g)	x	-0,03581	-0,05848	$1,3 \times 10^{-4}$
	y	-0,02013	-0,00154	$8,6 \times 10^{-5}$
	z	-0,05194	-0,03764	$5,1 \times 10^{-5}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99445	-1,99670	$1,3 \times 10^{-6}$
	y	-0,99047	-0,98858	$8,9 \times 10^{-7}$
	z	-0,99489	-0,99355	$4,5 \times 10^{-7}$
Erro de Não Ortog. (rad)	x	0,00002	0,00002	0
	y	0,00088	0,00088	0
	z	0,00086	0,00086	0

FONTE: A AUTORA (2015)

TABELA 16: CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES – BANCADA (*MTI-G*)

<i>MTI-G</i>				
Erro	Eixo	Bancada	Cubo	Variância
Deriva (g)	x	0,01017	-0,00218	$3,8 \times 10^{-5}$
	y	-0,03595	0,00674	$4,6 \times 10^{-4}$
	z	0,11000	0,07329	$3,4 \times 10^{-4}$
Erro de Fator de Escala (10^3 ppm)	x	-1,99986	-1,99998	$3,6 \times 10^{-9}$
	y	-0,99622	-0,98985	$1,0 \times 10^{-5}$
	z	-1,00361	-1,00253	$2,9 \times 10^{-7}$
Erro de Não Ortog. (rad)	x	0,00001	0,00001	0
	y	0,00018	0,00018	0
	z	0,00017	0,00017	0

FONTE: A AUTORA (2015)

Uma vez que os testes foram realizados consecutivamente, sem que os equipamentos fossem desligados, pode-se considerar que esta variação é influenciada apenas pela componente dinâmica, conforme seção 2.4.1.1. Porém, é necessário levar em consideração outros fatores não abordados, como o tempo que os equipamentos permaneceram ligados (cerca de 30 minutos para ensaio) e seu aquecimento durante todo período de coleta de dados.

Como exemplo, pode-se citar a UMI Colibri. No início da coleta de dados no primeiro ensaio, ou seja, com o auxílio da bancada, o sensor interno de temperatura registrou $30,5^{\circ}\text{C}$. Ao final da coleta de dados no segundo ensaio, isto é, sem o auxílio da bancada, a temperatura registrada era de $38,8^{\circ}\text{C}$.

4.3 EXPERIMENTO 3 - TRAJETÓRIA COM GPS E ACELERÔMETROS

Nesta seção são apresentados os resultados da aplicação do teste exposto na seção 3.2.2.3. Foi realizado um pequeno trajeto com os acelerômetros, com o objetivo de verificar se a aplicação dos parâmetros de calibração e dos ruídos anteriormente calculados resulta uma melhora nos deslocamentos calculados por meio das acelerações.

A figura 57 ilustra os deslocamentos calculados a partir das acelerações da UMI *Colibri*, com a aplicação do filtro *Butterworth* (SEÇÃO 2.6.3), mas sem a aplicação das correções referentes aos erros sistemáticos e aleatórios.

Nesta figura pode-se observar que conforme há um afastamento do ponto de partida, o deslocamento passa a apresentar maiores discrepâncias com relação ao trajeto de referencia. Isso é resultado do fato de que os acelerômetros acumulam erros ao longo do tempo, resultando na perda de confiabilidade das acelerações medidas.

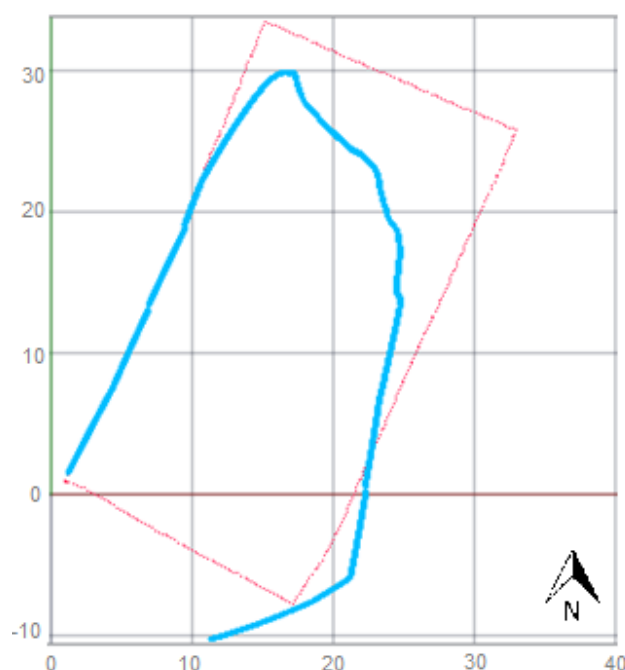


FIGURA 56: TRAJETÓRIA COLIBRI ANTES DAS CORREÇÕES
FONTE: A AUTORA (2015)

Na figura 58 são representados os deslocamentos calculados a partir das acelerações da UMI *Colibri*, com a aplicação do filtro e das correções obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Apesar de que este trajeto ainda possui uma discrepância com relação ao trajeto de referencia, pode-se observar uma melhora visível com relação aos deslocamentos calculados sem as correções (FIGURA 58). No trajeto calculado após as correções, pode-se observar que os contornos aparecem mais preservados e o ponto final está mais próximo do ponto final de referencia.

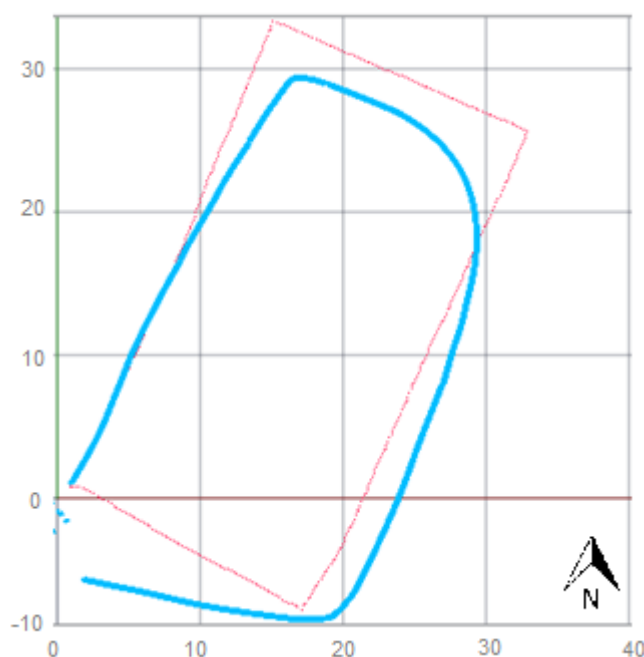


FIGURA 57: TRAJETÓRIA COLIBRI APÓS AS CORREÇÕES
FONTE: A AUTORA (2015)

Assim como ocorre com o sensor da UMI *Colibri*, os dados da UMI *InertiaCube3* perdem confiabilidade com o passar do tempo (FIGURA 59). O trajeto realizado apresenta deformação nos contornos e nas distâncias. O ponto correspondente ao final do trajeto, que deveria coincidir com o ponto inicial, apresenta-se bastante deslocado.

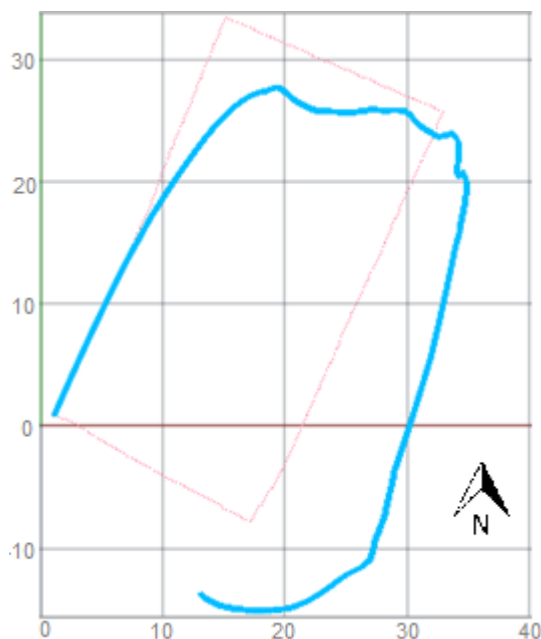


FIGURA 58: TRAJETÓRIA *INERTIACUBE3* ANTES DAS CORREÇÕES
FONTE: A AUTORA (2015)

Na figura 60 são representados os deslocamentos calculados a partir das acelerações da UMI *InertiaCube3*, com a aplicação do filtro e das correções obtidas nas seções 4.1 e 4.2. Após a aplicação das correções, é possível observar uma melhora significativa nos deslocamentos calculados. O trajeto apresenta distâncias mais preservadas e o ponto final está mais próximo do ponto final de referência.

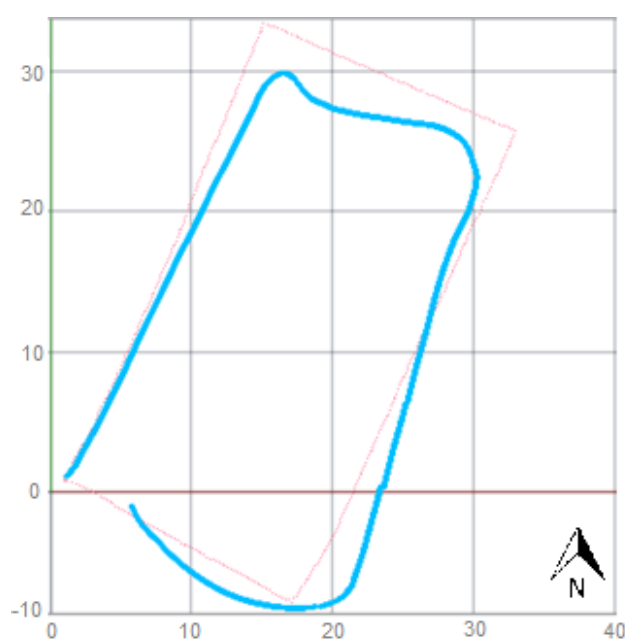


FIGURA 59: TRAJETÓRIA *INERTIACUBE3* APÓS AS CORREÇÕES
FONTE: A AUTORA (2015)

As figuras 61 e 62 ilustram os deslocamentos calculados para o SNI *MTi-G*, antes e após a aplicação das correções, respectivamente. Com relação aos testes de trajetória anteriores citados, os dados deste sensor apresentam os melhores resultados. Conforme se pode observar na figura 62, após a aplicação das correções o trajeto fica próximo do trajeto de referência. Ainda assim, o último ponto do deslocamento aparece afastado do ponto final de referência.

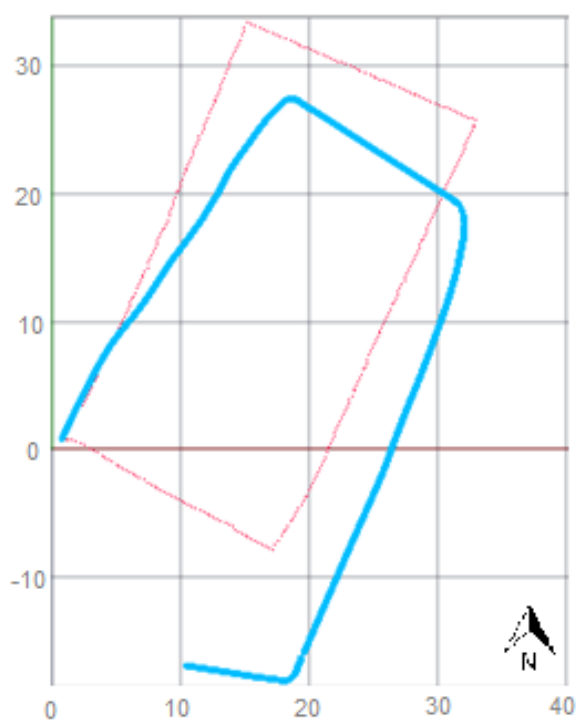


FIGURA 60: TRAJETÓRIA *MTi-G* ANTES DAS CORREÇÕES
FONTE: A AUTORA (2015)

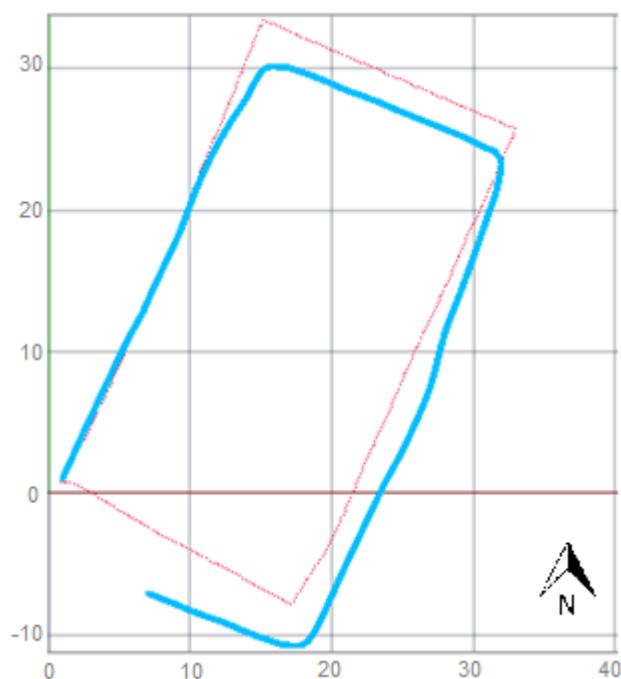


FIGURA 61: TRAJETÓRIA *MTi-G* APÓS AS CORREÇÕES
 FONTE: A AUTORA (2015)

Uma forma de se avaliar o rendimento deste teste consiste em se considerar o ponto inicial e final como sendo um ponto de controle. Uma vez que o trajeto foi iniciado e finalizado no mesmo ponto, logo, no caso de medições perfeitas, a distância entre estes deveria ser igual à zero. A tabela 17 apresenta os resultados desta verificação.

Conforme pode-se observar, a menor distância entre o ponto inicial e final foi obtida pela UMI Colibri. Em contrapartida, apesar do SNI MTi-G apresentar visualmente o melhor ajuste com relação ao trajeto de referência (FIGURAS 61 e 62), este apresentou as maiores distâncias entre o ponto final e inicial do trajeto realizado.

TABELA 17: DISTÂNCIA ENTRE O PONTO INICIAL E FINAL

Dispositivos	Distâncias (m)		
	Colibri	InertiaCube3	MTi-G
Antes das Correções	15,3	18,8	17,2
Após as Correções	1,6	5,1	9,6

FONTE: A AUTORA (2015)

4.4 EXPERIMENTO 4 - DESLOCAMENTO VERTICAL

Neste teste os deslocamentos foram calculados tanto antes quanto após a aplicação das correções dos erros sistemáticos e aleatórios. As tabelas 18, 19 e 20 apresentam o resultado da aplicação do teste exposto na seção 3.2.2.4 nos equipamentos testados, respectivamente, *Colibri*, *InertiaCube3* e *MTi-G*. Os acelerômetros foram testados por um período de 5 minutos para cada experimento.

Conforme pode-se observar na tabela 18, em um deslocamento realizado pelo servomotor referente a 1 cm/min, pelo acelerômetro vertical este valor correspondeu a 10,4 cm antes e 6,2 cm após a aplicação das correções para os acelerômetros da UMI *Colibri*. Isso significa que a diferença entre o valor calculado pelas acelerações com relação ao deslocamento de referência diminuiu de 5,4 cm antes da aplicação das correções para 1,2 cm após as correções. Da mesma forma, é possível observar melhora nos resultados com valores de referência de 2 cm/min e 4 cm/min.

TABELA 18: DESLOCAMENTOS VERTICAIS - COLIBRI

Deslocamento – Servomotor (Referência)	Sem Correções (cm)	Diferença Referência/ Antes (cm)	Após correções (cm)	Diferença Referência/ Após Correções (cm)
1 cm/min	10,37	5,37	6,2	1,2
2 cm/min	24,12	14,12	17,72	7,72
4 cm/min	34,31	14,31	29,61	9,61

FONTE: A AUTORA (2015)

Os piores valores foram observados para os deslocamentos verticais calculados a partir das acelerações da UMI *InertiaCube3* (TABELA 18). Ainda assim, pode-se verificar uma melhora após a aplicação das correções. A melhora mais significativa foi observada para os resultados do deslocamento vertical calculados a partir dos dados de aceleração do SNI *MTi-G* (TABELA 19).

TABELA 19: DESLOCAMENTOS VERTICAIS - *INERTIACUBE3*

Deslocamento – Servomotor (Referência)	Sem Correções (cm)	Diferença Referência/ Antes (cm)	Após correções (cm)	Diferença Referência/ Após (cm)
1 cm/min	22,8	17,8	17,56	12,56
2 cm/min	31,94	21,94	19,83	9,83
4 cm/min	38,69	18,69	28,27	8,27

FONTE: A AUTORA (2015)

TABELA 19: DESLOCAMENTOS VERTICAIS - *MTI-G*

Deslocamento – Servomotor (Referência)	Sem Correções (cm)	Diferença Referência/ Antes (cm)	Após correções (cm)	Diferença Referência/ Após (cm)
1 cm/min	3,34	1,66	4,59	0,41
2 cm/min	20,5	10,5	12,37	2,37
4 cm/min	31,06	11,06	24,06	4,06

FONTE: A AUTORA (2015)

5 CONCLUSÃO

Nesta seção, são apresentadas as conclusões para os testes obtidos na seção 4, assim como as recomendações para trabalhos futuros.

a) Variância de Allan

Através das simulações e testes apresentados, pode-se afirmar que a variância de Allan é um método eficaz para análise das características dos ruídos aleatórios presentes nas acelerações medidas. Uma vez que os ruídos são causados por diferentes fontes, conclui-se que o método tem como vantagem permitir uma fácil caracterização e identificação de fontes de erro, o que contribui para uma melhor estimativa da magnitude total dos ruídos.

Os resultados obtidos a partir da análise dos dados indicam que:

- O SNI *MTi-G* apresenta os menores níveis de ruídos, o que era esperado considerando as especificações técnicas deste equipamento (SEÇÃO 3.1).
- O ruído de *drift rate ramp* não foi detectado ou modelado pela UMI *InertiaCube3*. O mesmo ocorreu com os ruídos de *bias instability* e taxa de *random walk* para alguns eixos das UMI's *InertiaCube3* e *Colibri*. Isto deve-se ao fato de que, ou estes ruídos não existem para tais dispositivos, ou eles não foram identificados devido ao conjunto de dados analisado não ser longo o suficiente com relação ao tempo, conforme Hou (2004).

Com base nestes resultados verifica-se que, através da utilização da variância Allan, os usuários podem maximizar o desempenho dos sensores de acordo com os sinais de ruído existentes nos dados de saída.

b) Calibração pelo Método Multi-Posições

Uma dificuldade ao analisar os parâmetros de erros obtidos pela calibração consiste no fato de que não há um valor de referência para os equipamentos testados. Assim como ocorre com a maioria dos sensores inerciais MEMS de baixo custo, os fabricantes destes equipamentos não disponibilizam estes parâmetros nas especificações técnicas.

Porém, verificou-se que os resultados obtidos apresentam as mesmas características que os apresentados nas principais referências pesquisadas e citadas nesta pesquisa, tais como, Artese e Trecrosi (2008), Hayal (2010), Syed *et al.* (2007), Shin e El-Sheimy (2002).

Analisando os resultados dos experimentos de calibração, verifica-se que os parâmetros dos erros de fator de escala e de não-ortogonalidade sofrem pouca ou nenhuma variação para calibrações executadas em diferentes ensaios. A maior variabilidade é verificada para os parâmetros do erro de deriva. Este resultado apresenta-se de acordo com o esperado, uma vez que, conforme visto na seção 2.4.1.1, a deriva é afetada por uma componente estática e uma dinâmica. Isso explica porque a deriva sofre as maiores variações tanto de um ensaio para o outro, quando para duas calibrações em que os equipamentos permaneceram ligados devido à temperatura.

Com relação aos experimentos realizados na bancada de calibração, verificou-se que a deriva sofre variações da mesma ordem de grandeza daqueles realizados sem a bancada. Outra observação com relação a este experimento é que os equipamentos não foram desligados de uma calibração para outra, o que sugere que a variação deveria ser mínima. Porém, é necessário considerar que os acelerômetros sofrem outros efeitos não considerados nesta pesquisa, como a temperatura do ambiente e o aquecimento do próprio equipamento devido ao tempo de funcionamento.

A partir dos resultados dos experimentos realizados, verifica-se que a calibração pelo Método Multi-Posições Modificado é um método eficiente, rápido e simples de ser executado, além de não exigir custos adicionais.

Conclui-se que este método de calibração é especialmente eficaz para ser aplicado em campo antes de cada utilização, uma vez que, conforme resultados obtidos, verificou-se que a deriva dos acelerômetros apresentam variações de uma operação para outra. Além do mais, não há necessidade de realizar esta calibração por meio de equipamentos em laboratório. Entretanto, caso sejam necessários os dados de velocidade angular, obtidos a partir dos giroscópios, é necessário uma mesa de calibração de alta precisão.

c) Testes de Verificação

Foram realizados dois experimentos com o objetivo de verificar a aplicação dos parâmetros calculados pela calibração Método Multi-Posições (deriva, erro de fator de escala e erro de não-ortogonalidade) e pela variância de Allan (ruídos).

O primeiro experimento de verificação diz respeito à análise de uma trajetória calculada por meio de acelerações com relação a um trajeto de referência. Neste teste pode-se verificar que a aplicação das correções resulta em uma melhora significativa nos deslocamentos bidimensionais ao longo do trajeto realizado. Esta melhora visual de ajuste com relação ao trajeto de referência foi observada para os deslocamentos calculados a partir das acelerações dos três equipamentos avaliados, em especial para o SNI *MTi-G*. Em contrapartida, quando comparadas as distâncias obtidas com relação a um ponto de controle, verificou-se que a UMI Colibri obteve o melhor rendimento.

O segundo teste corresponde à realização de um deslocamento vertical executado com o auxílio de um servomotor para simular um aumento no nível da água. Neste teste os movimentos foram realizados muito lentamente, com a magnitude dos deslocamentos variando de 1 cm/min a 4 cm/min. Após a calibração, verificou-se uma melhora efetiva nos deslocamentos calculados a partir das leituras dos três dispositivos testados.

Deve-se considerar ainda que o teste de deslocamento vertical foi realizado linearmente de forma contínua. Em uma aplicação real na plataforma flutuante,

existe ainda a influência das ondulações da água. Desta forma, é necessária a execução de testes com os acelerômetros instalados na plataforma.

Cabe enfatizar que nos dois testes de verificação realizados, a diferença entre o deslocamento calculado e o de referência sofre influência da técnica de filtragem utilizada. Neste caso, utilizou-se o filtro passa-baixa *Butterworth*, que é um filtro simples e rápido de ser implementado, mas que causa distorções devido a suavização do sinal. Porém, o objetivo desta pesquisa não era o de analisar o quão próximo aos deslocamentos se aproximam do trajeto de referência, mas sim se existe melhora ao aplicar os parâmetros de erro nas acelerações medidas.

Com base nos resultados dos dois testes de verificação, foi observada uma melhora após a aplicação das correções dos erros sistemáticos e aleatórios dos três equipamentos. Porém, ainda se verificou uma discrepância com relação aos dados de referência. Esta discrepância é causada pelo fato de que a calibração não permite determinar e corrigir todos os erros sistemáticos de um sensor. Da mesma forma que não é possível realizar uma perfeita modelagem de todos os ruídos aleatórios presentes nas acelerações medidas.

Assim, pode-se concluir que apesar das limitações dos acelerômetros, os parâmetros de erros foram calculados e aplicados com êxito. Conclui-se ainda que o conhecimento das componentes de erro dos acelerômetros MEMS possibilita aperfeiçoar os seus resultados. Isso permite que durante um posicionamento, principalmente quando integrado a outras técnicas de navegação como o GPS, as leituras possam ser compensadas por estes parâmetros de forma mais acurada, principalmente nos períodos de perda ou ausência do sinal do GPS.

5.1 RECOMENDAÇÕES

- Um fator de grande influência nos sistemas inerciais que não foi considerado nesta pesquisa é a influência da temperatura. Para analisar esta componente recomenda-se a execução de testes em um ambiente onde a temperatura

possa ser controlada ou por meio de câmaras térmicas (ver AGGARWAL, 2008).

- Dependendo da aplicação, recomenda-se uma calibração que determine outros parâmetros, como por exemplo, uma calibração para vibrações e choques (ISO 16063).

REFERÊNCIAS

ABDEL-HAMID, W. **Accuracy Enhancement of Integrate MEMS-IMU/GPS Systems for Land Vehicular Navigation Applications**. Calgary: PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2005.

AGGARWAL, P., SYED, Z., NIU, X. AND EL-SHEIMY, N. **A Standard Testing and Calibration for Low Cost MEMS Inertial Sensors and Units**. Journal of Navigation, 611, 323-336, 2008.

AGGARWAL, P.; SYED, Z.; EL-SHEIMY, N. **MEMS-Based Integrated Navigation**; 1. ed. Boston: Artec House, 2010.

AGOSTINO, M.; MANZINO, A. M.; PIRAS, M. **Performances Comparison of Different MEMS-based IMUs**. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE/ION, 187 –201, 2010.

ARTESE, G.; TRECROCI, A. **Calibration of a Low Cost MEMS INS Sensor for an Integrated Navigation System**. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008.

ANG, W.T.; KHOSLA, P.K.; RIVIERE. C.N. **Nonlinear Regression Model of a Low-g MEMS Accelerometer**. IEEE Sensors Journal, Vol.1, No. 1, p. 81-87, 2007.

BAGGIO FILHO, H. **Rainfalls and natural disasters: the 2011- 2012 events in Minas Gerais State Brazil**. Alumni Seminar Natural Hazards - Research On Natural Disasters, Civil Defense, Disaster Prevention, And Aid, Teresópolis/RJ, 2012.

BARNES-SVARNEY. P.; SVARNEY, T. E. **Skies of Fury: Weather Weirdness Around the World Paperback**. 1. ed. New York: Touchstone, 1999.

BBC. **Floods threaten Dresden as Prague river levels fall**. Londres, 2013. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/world-europe-22752544>>. Acesso em 2013.

BEER F. P.; JOHNSTON R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros – Estática**. 3ª São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1980.

BEER F. P.; JOHNSTON R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros – Dinâmica**. 5ª São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1991.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Planejamento em Defesa Civil**. Vol.1. Brasília: Ministério da Integração Nacional/Departamento de Defesa Civil, 1999.

ÇENGEL, Y. A.; PALM III, W.J. **Equações Diferenciais**. 1. ed. São Paulo: McGraw Hill Brasil Ed., 2014.

DURÃO, C. R. C. **Utilização de Unidades de Medidas Inerciais Baseadas em Sistemas Microeletromecânicos em Navegadores Integrados**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

FANG, B.; CHOW, W.; DING, L. **An Optimal Calibration Method for a MEMS Inertial Measurement Unit**. International Journal of Advanced Robotic Systems. Vol. 14, p. 16062-16081., 2014.

FINKL, C. W. **Coastal hazards**. Vol. 6., Edition: Coastal Research Library. Florida: Springer, 2013.

FREITAS, S. R. C. **Posicionadores inerciais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), CPGCG, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1980.

GAD-EL-HAK, M. **MEMS: Introduction and Fundamentals**. 2. ed. Florida: CRC Taylor & Francis, 2006.

GAMBIS, D. **Allan variance in earth rotation time series analysis**. Advances in Space Research. v.30, n.2, p207–212, 2002.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994.

GREWAL, M. S.; ANDREWS, A. P. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**. 2. ed. Canada: Wiley-Interscience, 2007.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multi-sensor Integrated Navigation Systems**. 1. ed. Norwood: Artech House Ed., 2008.

HAYAL, A. G. **Static Calibration of Tactical Grade Inertial Measurement Units**. Report No. 496, The Ohio State University, 2010.

HENRIQUES, B. S. M. **Estimation and Control of a Quadrotor Attitude**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

HIGGINS, W. T. Jr. **A Comparison of Complementary and Kalman Filtering**. IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. AES-1. 1, NO. 3. MAY, 1975.

HOU, H. **Modeling Inertial Sensors Errors Using Allan Variance**. M.S. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, 2004.

IBGE. **MUNIC 2013: Enchentes Deixaram 1,4 Milhões de Desabrigados ou Desalojados entre 2008 e 2012**. Disponível em <<http://goo.gl/CCn0nb>>. Acesso em: abril de 2014.

IEEE Std 952-1997. **IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single –Axis Interferometric Fiber Optic Gyros**.

IEEE Std 1293-1998. **IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear, Single-Axis, Non-gyroscopic Accelerometers**.

Intersense. Disponível em <<http://www.intersense.com>>. Acesso em: 2014.

JEKELI, C. **Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications**. Berlin: Walter de Gruyter, 2001.

KESHNER, M. S. **1/f Noise**. Proceedings of the IEEE, vol.70, no.3, pp.212-218, 1982.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.;

MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de desastres naturais – Conceitos Básicos**. 1. ed. Florianópolis: Ed. Organic Trading, 2006.

LAGHARI, W. M.; BALOCH, M. U.; MENGAL, M .A.; SHAH, S. J. **Performance Analysis of Analog Butterworth Low Pass Filter as Compared to Chebyshev Type-I Filter, Chebyshev Type-II Filter and Elliptical Filter**. Scientific Research. Circuits and Systems, 5, 209-216, 2014.

LAWRENCE, A. **Modern Inertial Technology – Navigation, Guidance and Control**. 2. ed. New York: Springer, 1998.

LÖTTTERS, J. C.; SCHIPPER, J.; VELTINK, P. H.; OLTHUIS, W.; BERGVELD, P. **Procedure for in-use calibration of triaxial accelerometers in medical applications**. Sensors and Actuators A: Physical, 68 (1-3), pp. 221-228, 1998.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS Utilizando Sensores Inerciais Baseados em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)**. Tese de Doutorado. CPGCG-UFPR, 2005.

MAKSIMOVIC, C. **Urban drainage in specific climates – Volume I: Urban Drainage in Humid Tropics**. International Hydrological Programme. Technical Documents in Hydrology, no. 40. UNESCO, Paris, 2001.

MARKHEVKA, F. A. Static calibration of accelerometers and accelerographs by means of a centrifugal device. Measurement Techniques, Volume 2, Issue 7, p 516-518, 1959.

MUNSART, C.A. **American History Through Earth Science**. Westport: Teacher Ideas Press, 1997.

NEPOT E DURRANT-WHYTE. **Initial calibration and alignment of Low cost Inertial Navigation Units for land vehicle applications**. Journal of Robotics Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 81-92, February 1999.

NIEMINEN, T; KANGAS, J; SUURINIEMI, S; KETTUNEN, L. **An enhanced multi-position calibration method for consumer grade inertial measurement units applied and tested**. Measurement Science and Technology, vol. 21, no. 10, p. 105204, 2010.

OHI. **MANUAL DE HIDROGRAFIA**. 1. Ed., Versão Traduzida para Português Publicada pelo Instituto Hidrográfico – Portugal, 2010.

RENAULT, 2013. **MEMS Inertial Sensors Technology**. Studies on Mechatronics. Swiss Federal Institute of Techlogy Zurich, Zurich, 2013.

SANTANA, D.D.S. **Navegação Terrestre Usando Unidade de Medição Inercial de Baixo Desempenho e Fusão Sensorial Com Filtro de Kalman Adaptativo Suavizado**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, 2011.

SANTOS, W. E. **Bancada para Calibração de Giroscópios**. VISBEIN VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, 2010, Rio de Janeiro.

SAUSEN, T.M.; NARVAES, I.S. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Inundação**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Caderno Didático Nº 7. São José dos Campo, 2013.

SEIFERT, K.; CAMACHO, O. **Implementing Positioning Algorithms Using Accelerometers**. Freescale Semiconductor Application Note. AN3397. Rev 0, 02/2007

SHEN, S.C.; CHEN, C.J.; HUANG, H.J. **A New Calibration Method for Low Cost MEMS Inertial Sensor Module**. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 6, pp. 819-824, 2010.

SHIAU, J.; WANG, C. **Unscented Kalman Filtering for Attitude Determination Using MEMS Sensors**. Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 165176, 2013.

SHIN, E. H; EL-SHEIMY, N. **A New Calibration Method for Strapdown Inertial Navigation system**. Z. Vermess. 127 1-10, 2002.

SLIFTKA, L. C. **An Accelerometer Based Approach to Measuring Displacement of a Vehicle Body**. Michigan: Thesis for degree of Master of Science in Engineering. Department of Electrical and Computer Engineering, *University of Michiga*, 2004.

SILVA, L.E.R. **Calibração dos Acelerômetros de uma Unidade de Medição Inercial utilizando um Manipulador Robótico**. Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SYED, Z.F., AGGARWAL, P., GOODALL, C., NIU, X. AND EL-SHEIMY, N. **A New MultiPosition Calibration Method for MEMS Inertial Navigation Systems.** Measurement Science and Technology, 18, 1897-1907, 2007.

TITTERTON, D. H.; WESTON, J. L.; **Strapdown Inertial Navigation Technology.** 2. ed. London: Reston, Institution of Electrical Engineers, 2004.

TOBIN, G. A; MONTZ, B. E. **Natural hazards: explanation and integration.** New York: The Guilford Press, 1997.

Trivisio. Disponível em <<http://www.trivisio.com>>. Acesso em: 2014.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

VISKI, A. **Plataformas Lagrangeanas e Eulerianas Aplicadas ao Monitoramento de Massas de Água.** In: Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente, 2012.

VRIES, J.J.; WALDRON, J.; CUNNINGHAM, V. **Field Tests of the New Datawell DWR-G GPS Wave Buoy.** Published in Sea Technology December, 2003.

WANG, W.; HUANG, B.; WANG, L. **Analysis of Filtering Methods for 3D Acceleration Signals in Body Sensor Network.** Bulletin of Advanced Technology Research. Vol. 5 No.7/ Jul, 2011.

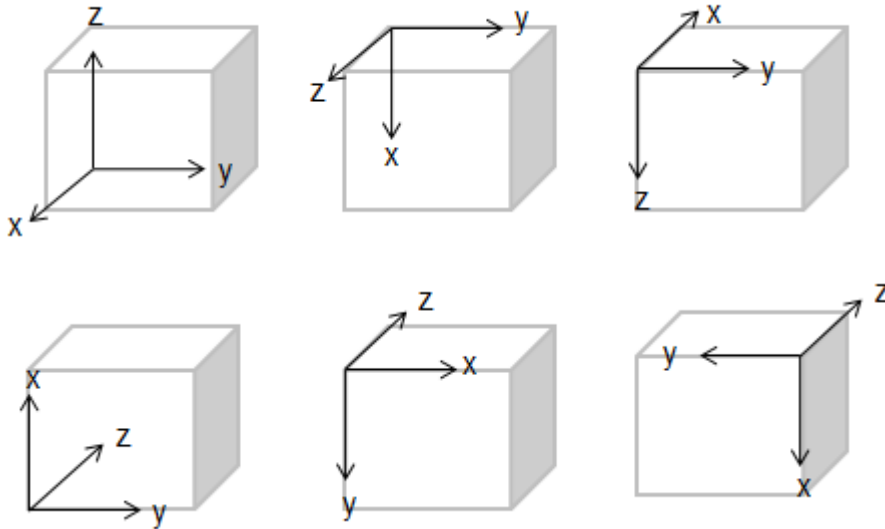
WELCH, G.; GARY, B. **An Introduction to the Kalman Filter.** Technical Report TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.

Xsens. Disponível em <<http://www.xsens.com>>. Acesso em: 2014.

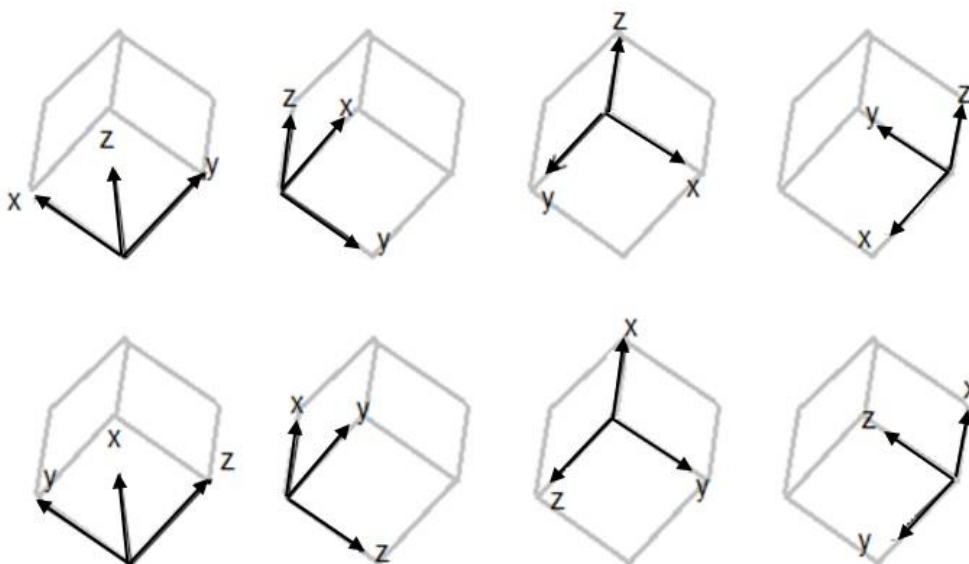
YOO, T. S.; HONG, S. K.; YOON, H. M.; PARK, S. **Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System.** Sensors Journal, 11, 3816-3830, 2011.

APÊNDICE 1 – ATITUDES PARA CALIBRAÇÃO MULTI-POSIÇÕES

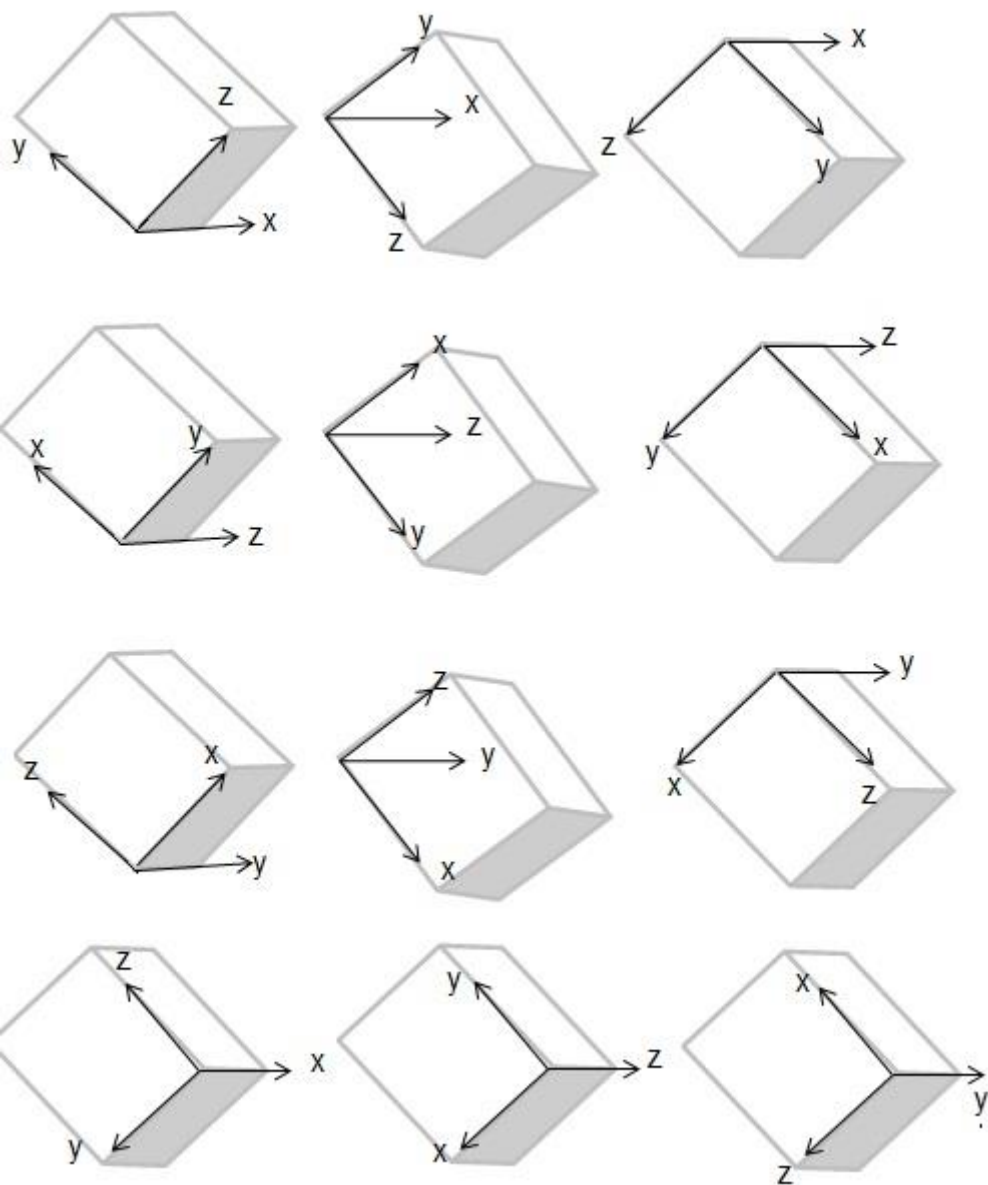
Faces:



Quinas:



Arestas:



APÊNDICE 2 – VARIÂNCIA DE ALLAN

Nesta seção são apresentados os valores calculados para as variâncias de Allan dos equipamentos testados. São apresentadas as variâncias nos eixos x, y, e z, e o respectivo valor de tempo de cada compartimento, representado por tau. Este valor representa o tempo no início de cada compartimento.

Variância de Allan - Colibri			
Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Tau (s)
0,0154	0,0223	0,0237	0,01
0,0125	0,0183	0,0194	0,02
0,0095	0,0139	0,0147	0,04
0,0069	0,0102	0,0108	0,08
0,0050	0,0073	0,0077	0,16
0,0036	0,0053	0,0055	0,32
0,0026	0,0037	0,0039	0,64
0,0019	0,0026	0,0028	1,28
0,0015	0,0019	0,0020	2,56
0,0012	0,0013	0,0014	5,12
0,0011	0,0009	0,0010	10,24
0,0010	0,0006	0,0007	20,48
0,0009	0,0004	0,0005	40,96
0,0011	0,0003	0,0003	81,92
0,0013	0,0002	0,0003	163,84
0,0008	0,0002	0,0003	327,68
0,0009	0,0002	0,0005	655,36
0,0015	0,0003	0,0010	1310,72

Variância de Allan - MTi-G			
Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Tau (s)
0,0073	0,0079	0,0074	0,01
0,0058	0,0065	0,0057	0,02
0,0044	0,0051	0,0042	0,04
0,0032	0,0037	0,0030	0,08
0,0023	0,0026	0,0022	0,16
0,0017	0,0018	0,0016	0,32
0,0012	0,0012	0,0011	0,64
0,0008	0,0009	0,0008	1,28
0,0007	0,0007	0,0006	2,56
0,0006	0,0007	0,0005	5,12
0,0006	0,0007	0,0004	10,24
0,0007	0,0010	0,0004	20,48
0,0009	0,0009	0,0004	40,96
0,0013	0,0009	0,0005	81,92
0,0019	0,0012	0,0005	163,84
0,0024	0,0014	0,0004	327,68
0,0032	0,0018	0,0004	655,36
0,0035	0,0028	0,0002	1310,72

Variância de Allan - InertiaCube3			
Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Tau (s)
0,0191	0,0198	0,0186	0,11
0,0135	0,0142	0,0131	0,22
0,0095	0,0099	0,0092	0,44
0,0069	0,0070	0,0067	0,89
0,0049	0,0050	0,0047	1,78
0,0034	0,0035	0,0035	3,56
0,0024	0,0024	0,0024	7,11
0,0018	0,0017	0,0016	14,22
0,0011	0,0012	0,0011	28,44
0,0009	0,0009	0,0009	56,89
0,0009	0,0009	0,0005	113,78
0,0007	0,0010	0,0004	227,55
0,0010	0,0011	0,0002	455,11
0,0006	0,0007	0,0002	910,21
0,0006	0,0006	0,0002	1820,43