

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/AUTOMAÇÃO

CAROLINE DAL MOLIN GRANDO
RODRIGO RUBIM DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA USO DA BANCADA DE
CALIBRAÇÃO DE GIROSCÓPIOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/AUTOMAÇÃO

CAROLINE DAL MOLIN GRANDO
RODRIGO RUBIM DE OLIVEIRA

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA USO DA BANCADA DE
CALIBRAÇÃO DE GIROSCÓPIOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina Metodologia Aplicada ao TCC, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – DAELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Winderson E dos Santos

CURITIBA

2015

Caroline Dal Molin Grando
Rodrigo Rubim de Oliveira

Proposta de Metodologia para Uso da Bancada de Calibração de Giroscópio

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de bacharel, do curso de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 12 de Fevereiro de 2015.

Prof. Paulo Sergio Walenia, Especialista
Coordenador de Curso
Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Automação

Prof. Amauri Assef, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Industrial Elétrica com ênfase em Automação
do DAELT

ORIENTAÇÃO

Prof. Winderson Eugenio dos Santos, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Eng. Rafael Vieira

Prof. Guilherme Luiz Moritz, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Automação

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às nossas famílias por estarem sempre presente, incentivando, corrigindo, cobrando, e fazendo com que mais esta etapa de nossas vidas chegasse ao fim.

Agradecemos ao orientador Professor Doutor Winderson Eugênio dos Santos por nos guiar neste trabalho com muita paciência. Mesmo que durante suas férias mostrou interesse em nos ajudar, e se dispôs até a perder um dia de praia para que o trabalho fosse concluído.

Certamente não nos esqueceremos de agradecer a Stefanie Von Randow Souza pelas diversas tardes ocupadas nos auxiliando no georreferenciamento dos marcos no prédio da Universidade, e por se mostrar sempre disponível quando precisamos de sua ajuda.

Agradecemos a todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente neste trabalho, pedimos desculpas àqueles que não foram incluídos nestas palavras e ressaltamos a importância de todos.

Às pessoas que já não estão presentes neste mundo, porém que pudemos sentir suas presenças também sempre a nosso favor para trilharmos o melhor caminho possível, não poderíamos deixar de agradecer.

RESUMO

GRANDO, Caroline D M; OLIVEIRA, Rodrigo R. Proposta de Metodologia para uso da bancada de Calibração de Giroscópio. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica/Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta uma proposta para o desenvolvimento de uma metodologia de calibração de giroscópios com o uso de uma bancada de calibração desenvolvida em conjunto com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no campus Curitiba. Enfoca o funcionamento de dispositivos do tipo giroscópio e os tipos de erros envolvidos em medições, assim como o que se faz necessário avaliar para obtenção de resultados confiáveis. A metodologia é desenvolvida a partir de análises geodésicas para o correto posicionamento tanto da bancada quanto do sensor em relação ao planeta, uma vez que a velocidade de rotação do mesmo interfere em medições de velocidade e deslocamento angular. Ensaios para determinação de possíveis erros de medições são apresentados e executados. Os dados obtidos são analisados com o auxílio de *softwares* e ferramentas matemáticas com o intuito de verificação da metodologia proposta. Traz como resultados valores de incertezas de medição que são diretamente comparados com dados fornecidos pelo fabricante do giroscópio para avaliação da confiabilidade do método de calibração desenvolvido. Sugere ainda maneiras atuais para calibração segundo os dados obtidos.

Palavras-chave: Calibração. Giroscópio. Velocidade Angular. Georreferenciamento.

ABSTRACT

GRANDO, Caroline D M; OLIVEIRA, Rodrigo R. Proposition of Methodology for use of the Gyroscope Calibration Stand. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Industrial Elétrica/Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

This thesis presents a propose for the development of a methodology of calibration of gyroscope using a stand for gyroscope calibration developed at Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Curitiba. It is focused on the operation of sensors of type gyroscope and the type of errors involved in the measurements, as well as what needs evaluation in order to get reliable results. The methodology is developed from de analysis geodesic for the correct positioning of the stand and the sensor relative to the planet, once the rotation speed of the planet interferes in measurements of velocity and angular displacement. Experiments to determine de possible errors of measurement are presented and executed. The data's obtained are analyzed with help of software and mathematic tools in order to verify the methodology proposed. The results are values of measurement uncertainty, which are directly compared with data provided by the manufacturer of the sensor to evaluate de reliability of the method of calibration developed. Finally it suggests current methods to calibration according to obtained data.

Keywords: Calibration. Gyroscope. Angular Velocity. Georeferencing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Giroscópio	10
Figura 2: Segway	11
Figura 3: Esquema de funcionamento do giroscópio óptico	13
Figura 4: Foto da bancada instalada em laboratório da UTFPR	15
Figura 5: Esfera contendo 4 giroscópios usados na GP-B (NASA)	21
Figura 6: Giroscópio mecânico com indicação angular em dois eixos	22
Figura 7: Princípio de funcionamento de um giroscópio a cristal	23
Figura 8: Princípio de funcionamento de um giroscópio de fibra óptica	24
Figura 9: Bloco-diagrama de um sistema de medição angular por giroscópio	25
Figura 10: Influência da rotação da Terra na medição do giroscópio	26
Figura 11: Erro de Bias.....	28
Figura 12: Forma de onda da velocidade angular com erro de Bias	28
Figura 13: Erro de fator de escala	29
Figura 14: <i>Random Walk</i> em um giroscópio.....	32
Figura 15: Partes da Bancada de Calibração.....	36
Figura 16: O conjunto móvel da bancada.....	37
Figura 17: Acionamento da bancada.....	38
Figura 18: Interface entre a bancada e o usuário.....	41
Figura 19: O planeta Terra e o referencial da bancada.....	42
Figura 20: Localização dos marcos no prédio da UTFPR	43
Figura 21: GNSS Leica 900CS.....	44
Figura 22: Estação Total Leica TCR407 Power	44
Figura 23: Localização dos pontos de referência	45
Figura 24: Luneta utilizada para medição dos ângulos entre os marcos.....	46
Figura 25: Triângulo para demonstração da lei dos cossenos	49
Figura 26: Localização dos pontos P1, P2, P3 e Ba.	50
Figura 27: Triângulo para descobrir a distância entre P2 e Ba no plano horizontal ..	51
Figura 28: Espelhamento no plano horizontal da distância entre P3 e Ba	52
Figura 29: Espelhamento no plano horizontal da distância entre P2 e P3	53
Figura 30: Triângulo formada pelos marco A2, A3 e Ba no plano Norte e Este	53
Figura 31: Triângulo retângulo para calculo de coordenadas.....	54
Figura 32: Localização do ponto C1	55
Figura 33: Localização do ponto C2.....	56
Figura 34: Eixo de Rotação da Terra X Eixo de Sensibilidade do Giroscópio paralelos	58
Figura 35: Eixo de Rotação da Terra X Eixo de Sensibilidade do Giroscópio perpendiculares.....	59
Figura 36: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio em paralelo ao eixo de rotação do planeta	61
Figura 37: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio em paralelo ao eixo de rotação do planeta e rotacionado em 180 graus.....	62
Figura 38: Dados do primeiro ensaio em paralelo.....	62
Figura 39: Interpolação por mínimos quadrados grau 1 do primeiro ensaio paralelo	63
Figura 40: Ampliação da curva de interpolação da Figura 29	64

Figura 41: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio perpendicular ao eixo de rotação do planeta	65
Figura 42: Dados do ensaio com 10000x a rotação da Terra.....	68
Figura 43: Ruído presente nos ensaios de 10 e 100x	69
Figura 44: Ruído presente nos ensaios de 500 e 1000x	69
Figura 45: Ruído presente nos ensaios de 5000 e 10000x	70
Figura 46: Estímulos aplicados X Valores medidos	72
Figura 47: Estímulos aplicados X Valores medidos - Escala linear	72
Figura 48: Inclinação da reta de interpolação.....	73
Figura 49: Sistema de coordenadas com objeto	79
Figura 50: Representação de um ponto do objeto em relação a um referencial	81
Figura 51: Giroscópio óptico Fizoptika VG949PD	83
Figura 52: Folha de dados de calibração do fabricante FISOPTIKA do giroscópio VG949PD, número de série 322004	84
Figura 53: Representação de um giroscópio de fibra óptica em configuração tipo malha aberta com entrada e saída comuns	84
Figura 54: Formato dos dados transmitidos pelo giroscópio	86
Figura 55: Fluxograma do programa do giroscópio	87
Figura 56: Esquema de ligação para transmissão de dados via RS232	88
Figura 57: Marcação manual para testes	88
Figura 58: Posicionamento inicial e final para teste de aquisição do giroscópio	89
Figura 59: Gráfico obtido através do instrumento virtual	89

LISTA DE SÍMBOLOS

ω	Velocidade angular
ω_{Terra}	Velocidade angular da terra
T1	Torque de entrada
T2	Torque de saída
θ_1	Posição angular do eixo de entrada
θ_2	Posição angular do eixo de saída
η	Relação de redução do <i>harmonic drive</i>
J	Inércia do <i>harmonic drive</i>
J1	Inércia da polia de entrada
J2	Inércia da polia de saída
N1	Número de dentes da polia de entrada
N2	Número de dentes da polia de saída
K	Constante de rigidez do <i>harmonic drive</i>
K12	Constante de rigidez da correia de entrada
La	Latitude
Lo	Longitude
h	Altura
P1	Marco 1
P2	Marco 2
P3	Marco 3
Ba	Bancada
C1	Ponto imaginário 1
C2	Ponto imaginário 2

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	TEMA	12
1.1.1	Delimitação do tema	12
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3	OBJETIVO	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	JUSTIFICATIVA	16
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	GIROSCÓPIOS	19
2.1	APLICAÇÃO DOS GIROSCÓPIOS	20
2.2	TECNOLOGIAS ATUAIS	21
2.2.1	Giroscópios Mecânicos	21
2.2.2	Giroscópios Piezoelétricos	22
2.2.3	Giroscópios Ópticos	23
2.2.4	Medições Com Giroscópios	24
2.2.5	Influência da Rotação do Planeta	26
2.2.6	Erros Sistemáticos	27
2.2.7	Erros Aleatórios	30
3	A BANCADA	33
3.1	DEFINIÇÕES DA BANCADA	33
3.1.1	O Projeto Mecânico Da Bancada	34
3.1.2	Objetivos e especificações	34
3.1.3	Elementos de Transmissão	39
3.1.4	Servo-Acionamentos	39
3.1.5	Interface com a Bancada	40
4	PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	42
4.1	ALINHAMENTO COM O EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA	42
4.1.1	Escolha dos marcos na UTFPR	43
4.1.2	Georreferenciamento dos marcos	44
4.1.3	Determinação dos ângulos entre os marcos	46
4.1.4	Determinação da distância entre cada marco e a bancada	48
4.1.5	Cálculo das coordenadas da bancada	51
4.1.6	Apontado a bancada para o Norte	55
4.2	ENSAIOS	57
4.2.1	Ensaio para Determinação de Erro de Bias e Desvio de Bias	57
4.2.2	Ensaio para Confirmação do Erro de Bias, e Determinação do Ruído	58
4.2.3	Ensaio para Determinação do Fator de Escala	60
5	RESULTADOS E ANÁLISES	61
5.1	RESULTADOS DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DE ERRO DE BIAS E DESVIO DE BIAS	61
5.2	RESULTADOS DO ENSAIO PARA CONFIRMAÇÃO DO ERRO DE BIAS, E DETERMINAÇÃO DO RUÍDO	65

5.3	RESULTADOS DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ESCALA	71
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICES	78
	APÊNDICE A – Referencial e matriz de rotação.....	78
	APÊNDICE B – Giroscópio óptico Fizoptika.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados técnicos da bancada	40
Tabela 2: Coordenadas dos marcos	46
Tabela 3: Movimento realizado pelos motores da bancada (passos).....	47
Tabela 4: Distância entre os marcos e a bancada	50
Tabela 5: Coordenadas da bancada de calibração de giroscópio	55
Tabela 6: Coordenadas do ponto C1	55
Tabela 7: Coordenadas do ponto C2	56
Tabela 8: Latitude e Longitude da bancada de calibração de giroscópio	57
Tabela 9: Valores obtidos pelos ensaios.....	66
Tabela 10: Erro de Bias para ensaio em sentido horário.....	66
Tabela 11: Erro de Bias para ensaio em sentido anti-horário.....	66
Tabela 12: Mapa de correção de Bias.....	67
Tabela 13: Desvios de Bias calculados.....	68
Tabela 14: Valores da densidade espectral de potência	70
Tabela 15: Média dos sinais dos ensaios.....	71

1 INTRODUÇÃO

Inventado em meados de 1850, por Jean Bernard Léon Foucault, o giroscópio foi usado inicialmente com a finalidade de mostrar e provar que o planeta Terra, na verdade, gira sobre seu próprio eixo. Com seu funcionamento baseado no princípio da inércia, um giroscópio simples é constituído por um rotor suspenso por um suporte formado por dois círculos articulados, com juntas do tipo “cardan”, deixando-o livre para girar em qualquer direção. Porém ao analisar o eixo de rotação do rotor, o mesmo se opõe à qualquer mudança de direção, sendo possível assim a movimentação do giroscópio como um todo, mas o eixo do rotor tende a se manter apontado para a mesma direção. Um clássico exemplo de tal efeito seria o de uma roda de bicicleta suspensa pelo eixo. Quando é dada velocidade angular à roda, a mesma consegue se manter suspensa pelo surgimento de tal efeito. Para melhor entendimento, a Figura 1 abaixo apresenta um modelo de giroscópio onde é mostrado a armação do giroscópio (Gyroscope frame), o eixo de giro (Spin axis), o cardan (Gimbal) e rotor (Rotor).

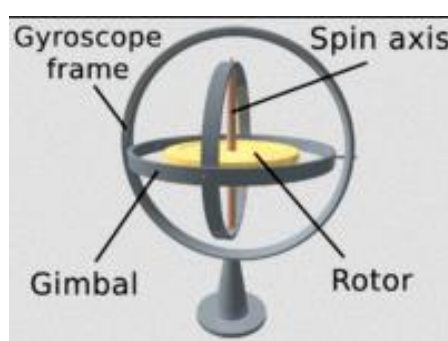


Figura 1: Modelo de Giroscópio
Fonte: Google Imagens, pesquisa para “Giroscópio”

Giroscópios são usados em múltiplas aplicações, como por exemplo em sistemas de navegação marítima, quando é colocado um giroscópio assim como o mostrado acima na Figura 1 com o rotor alinhado paralelamente com o piso do navio. Com o auxílio de sensores, é possível medir a inclinação deste com o nível do mar, ou seja, se o navio rotacionar em seu eixo longitudinal, o giroscópio tende a

manter o eixo do rotor apontado para mesma direção, e assim é possível medir este desvio angular, e posteriormente o corrigir.

Outra aplicação interessante é a do veículo de duas rodas onde o motorista se utiliza apenas de um guidão para sua condução, e graças à giroestabilização consegue se manter em equilíbrio na maioria das situações, inclusive em colisões. Tal veículo, chamado de Segway, pode ser visualizado na Figura 2 abaixo.



Figura 2: Segway
Fonte: Site do fabricante

Não se limitando a estas, giroscópios possuem aplicações em estabilização de equipamentos de tiro, navegação de aviões, bússolas giroscópicas, estabilização de balões meteorológicos, gravimetria, ajustes finos de telescópios, posicionamento de plataformas de petróleo, uso em vídeo games atuais, entre outras várias aplicações em tecnologias de ponta. Porém não se deve esquecer de que, assim como um giroscópio faz possível uma série de avanços tecnológicos, se o mesmo não possuir uma calibração correta, pode ser o responsável desde simples resultados indesejáveis, até prejuízos incalculáveis.

Com todas as aplicações mencionadas acima, é possível perceber a grande importância na calibração correta de tais instrumentos para suas respectivas aplicações. A necessidade de um método para calibração de giroscópios de alta tecnologia, deixa de ser uma opção, e passa a ser imprescindível para o desenvolvimento correto de sua função.

1.1 TEMA

O giroscópio é um instrumento de medição muito usado atualmente para variadas aplicações, onde se necessita medir ângulos a partir de uma plataforma inercial. Assim como outros sensores, é necessário sua calibração para o funcionamento adequado, e portanto, uma metodologia para calibração se torna indispensável.

1.1.1 Delimitação do tema

Atualmente no mercado são encontrados diversos tipos de giroscópios com funcionamentos distintos. Alguns deles são: *Floated Rate Integrating Gyroscope* (RIG), *FreeGyroscope*, *Eletrostatic Spherical Gyrom Fiber Optic Gyro* (FOG) e *Dry Tuned Gyro* (D.T.G).

O *Floated Rate Integrating Gyroscope* é um giroscópio composto por dois cilindros separados por um fluido que tem a função de amortecimento e de os manter suspensos, sendo essa a razão do nome *Floated*. O cilindro interno é completamente selado, contendo um rotor que gira graças a um motor síncrono. O segundo cilindro (externo), que contém o primeiro, também é devidamente selado, sendo ele a carcaça do giroscópio. A medição a partir desse giroscópio se dá por meio de um *pickoff* (sinal correspondente a uma capacitância parasita entre um cilindro e outro). Um torque funciona com momentos proporcionais ao deslocamento angular, como se fosse uma mola. Conhecendo os parâmetros de fluido que separa os cilindros, o torque, o ângulo deslocado é proporcional ao sinal do *pickoff*.

O FreeGyro é outra modalidade de giroscópio. Esse instrumento é composto por rotor em forma cilíndrica que é colocado a girar por um motor síncrono suportado por mancais e isolado dos movimentos externos. Sensores angulares, *pickoffs* medem o ângulo entre os anéis. Esses ângulos são diretamente proporcionais ao ângulo ao qual o giroscópio está submetido.

Ring Laser Gyro é o nome de um tipo de giroscópio a laser. Esse aparelho funciona a partir de espelhos dielétricos, que refletem o laser, formam uma trajetória fechada, a qual pode ser tanto triangular como quadrada. Dois feixes de laser,

gerada por descargas de um gás hélio neônio, que ocupam a mesma cavidade do giroscópio, atravessam o aparelho ao mesmo tempo, um deles em sentido horário e outro em sentido anti-horário. Um desses feixes passa por um prisma óptico e é refletido de modo a ficar quase paralelo ao outro feixe. Esses feixes sensibilizam fotodiodos, formando um padrão de franjas, graças ao pequeno ângulo formado entre os feixes. Quando o giroscópio sofre uma velocidade angular no sentido perpendicular ao plano formado pela cavidade óptica, a trajetória de um feixe fica maior que a outra, causando variação no caminho óptico dos feixes mudando, assim, a distância entre as franjas. Os fotodiodos captam essa mudança na distância das franjas que ele forma, e essa alteração é proporcional a velocidade angular sofrida pelo giro laser.

O giroscópio óptico é um tipo de giroscópio que utiliza a diferença de angulação de dois feixes de luz provenientes de lados opostos para medir velocidade angular e assim apresentar dados de variação na sua rotação. Este fenômeno ocorre devido a característica da luz manter sua velocidade constante independentemente da velocidade do meio condutor que a transporta.

Este modelo de giroscópio tem várias características significantes. Entre elas está a baixa incerteza dos valores medidos, diferente dos giroscópios mecânicos, não necessita de uma aceleração inicial, é robusto, mais preciso e de melhor resolução.

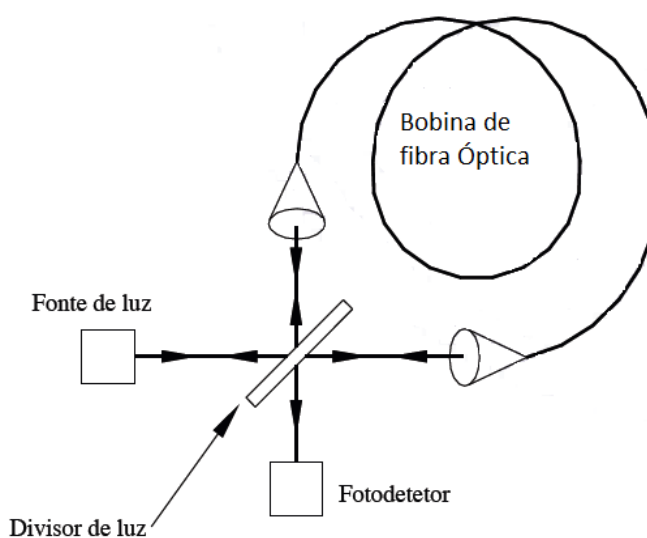


Figura 3: Esquema de funcionamento do giroscópio óptico
Fonte: ROQUETTE, Pedro. Sensores Inerciais e Procedimentos de Calibração.

A Figura 3 descreve o funcionamento de um FOG (*FiberOpticGyro*). O feixe de luz, a uma frequência específica, pela fonte de luz e primeiramente atinge o divisor de luz. Ele divide esse feixe de luz na metade, fazendo com que cada metade desse feixe percorra a bobina em um sentido. Após percorrer a bobina, a luz passa novamente pelo divisor de luz e segue para o fotodetector, um sensor de luz, que entrega uma potencia proporcional à intensidade dos dois feixes de luz combinados.

A velocidade angular utilizada pelo FOG para detecção de suas rotações, é obtida através do tempo que os dois feixes de luz, que estão na bobina de fibra óptica, demoram para se encontrar nela quando o aparelho é submetido a qualquer rotação.

A calibração é o nome do conjunto de procedimentos utilizados para garantir que um instrumento medidor está funcionando de acordo com o esperado. Para isso é utilizado o instrumento de calibração e uma referência correspondente ao sistema que se quer medir. Esse tipo de procedimento é importante para garantir que os valores medidos pelos instrumentos estão de acordo com os valores considerados reais. No caso do giroscópio esse procedimento é essencial. Ele garante que os dados de rotação estejam de acordo com os ângulos aos quais o instrumento foi submetido, garantindo nas diversas utilizações do giroscópio, um funcionamento adequado.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Sistemas que usam giroscópios necessitam de uma calibração otimizada pois erros poderiam acarretar nas mais diversas consequências. Quando se fala do exemplo de navegação marítima citado na introdução, um erro de calibração em seu giroscópio poderia levar facilmente um navio ao naufrágio, enquanto o mesmo erro no veículo de duas rodas simplesmente o faria não funcionar. A importância da calibração passa a ser crucial.

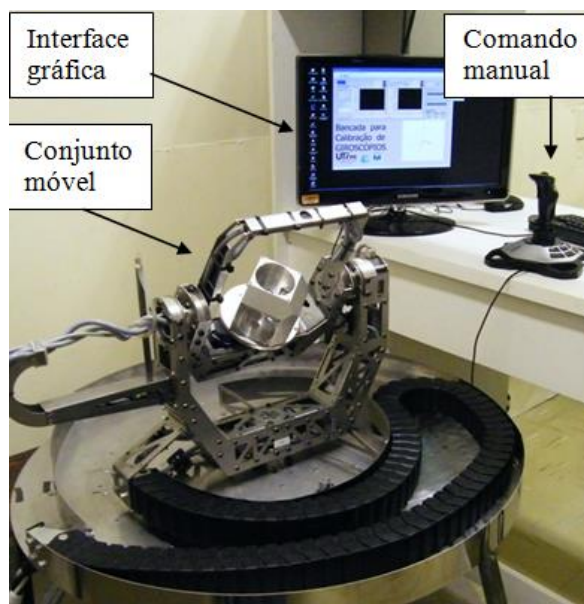
Segundo Roquette (2007), calibração é:

“o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição

ou valores representados por uma medida materializada, e os valores das grandezas estabelecidas por padrões.”

Para a calibração de um giroscópio é então necessário obter valores padrões. Isto pode ser obtido através de um mecanismo dotado de acionamentos de precisão a fim de impor rotações e ângulos controlados ao giroscópio sobre teste. Para tal, uma bancada móvel tri axial de calibração de giroscópios foi desenvolvida na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, e encontra-se atualmente em fase de testes iniciais.

No presente momento, a bancada desenvolvida na UTFPR (SANTOS, 2011) possibilita o desenvolvimento de métodos para calibração de diferentes tipos de giroscópios, fornecendo elementos necessários para identificar desvios como fator de escala, ruído, estabilidade, Bias, dentre outros. A Figura 4 abaixo apresenta a bancada, que se encontra no laboratório Q-001 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



**Figura 4: Foto da bancada instalada em laboratório da UTFPR
Fonte: SANTOS, 2010.**

A bancada já possui um conjunto de recursos iniciais necessários para o desenvolvimento de métodos para calibração de giroscópios.

Assim, o problema principal a ser resolvido, trata da questão do uso dos recursos disponíveis nesta bancada para que giroscópios de diversas naturezas possam ser calibrados.

Os autores partem da premissa que de posse dos dados de projeto da bancada, associada aos métodos de calibração para giroscópios encontrados na literatura, seja possível propor uma metodologia específica para esta bancada em particular.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo Geral

Propor uma metodologia de calibração de giroscópios utilizando a plataforma móvel que se encontra na UTFPR.

1.3.2 Objetivos Específicos

Revisar a literatura sobre de sistemas inerciais, a fim de auxiliar na compreensão teórica do assunto;

Conhecer o projeto da bancada de calibração de giroscópios e compreender seu funcionamento;

Estudar os diferentes tipos de giroscópio e seus métodos de funcionamento;

Estudar e compreender a teoria de calibração de instrumentos de medição;

Definir a metodologia de calibração apropriada à bancada;

Realizar um conjunto de ensaios de calibração;

Analisar os resultados.

1.4 JUSTIFICATIVA

A necessidade do desenvolvimento de uma metodologia para calibração de instrumentos como giroscópios se faz cada vez mais indispensável quando se leva em consideração os dias atuais, onde a tecnologia exige que os resultados envolvidos em projetos possuam uma margem de erro mínima.

A criação de novas metodologias de calibração de instrumentos são de fundamental importância para a engenharia como um todo, que sempre busca melhores resultados para o desenvolvimento da área.

Considerando um curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Automação Industrial, poder contar com uma metodologia eficiente para realização de ensaios de calibração em giroscópios torna-se relevante, uma vez que um dos objetivos do curso é a aplicação de técnicas específicas em um determinado processo de engenharia com o objetivo de melhorar resultados de desempenho.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente, foi fundamental um entendimento sobre sistemas inerciais para então atingir uma compreensão detalhada da bancada de calibração de giroscópios e seu funcionamento.

Em seguida, foram realizados estudos relacionados a giroscópios e seus diferentes modos de funcionamento. Paralelamente compreendeu-se a teoria sobre calibração assim como instrumentos de medição necessários.

Então se procedeu para uma proposta de metodologia de ensaios com o tipo de giroscópio a ser estudado, visando a otimização da calibração do mesmo.

Finalmente os resultados obtidos foram analisados.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura do presente trabalho será a seguinte:

Capítulo 1: introdução do trabalho, composta por tema, delimitação do tema, objetivo específico e justificativa.

Capítulo 2: no segundo capítulo deste trabalho será apresentado o embasamento teórico sobre giroscópios. Tratando tanto de diferentes tecnologias construtivas assim como das fontes de erros e incertezas de medição.

Capítulo 3: o terceiro capítulo apresentará o embasamento teórico sobre rotações e deslocamentos espaciais. Nele, também estará presente uma revisão sobre as especificações técnicas e de projeto da bancada a ser utilizada.

Capítulo 4: nessa parte será descrito os procedimento para realização dos ensaios.

Capítulo 5: Serão disponibilizados então os resultados obtidos e a discussão dos resultados finais.

Capítulo 6: E em uma última seção, as Conclusões e Considerações finais.

2 GIROSCÓPIOS

Baseado na associação de dois termos gregos, *gyros*, que significa rotação, e *skopein*, que quer dizer observar, a palavra giroscópio traz o sentido de observar a rotação.

Os primeiros giroscópios tinham seu princípio de funcionamento definidos pela rotação de um disco rígido. E este, por ação da inércia, tende a se opor a qualquer mudança de direção nos eixos ortogonais ao central de giro. Ou seja, seu eixo de rotação aponta sempre para mesma direção, de forma independente de estar se apoiando em alguma superfície, por isto chamado de inercial. Este efeito é bem explicado pelas Leis do movimento de Newton, e pode ter uma observação cotidiana pela de um brinquedo conhecido como pião. Este mesmo efeito é o responsável também pelo equilíbrio de uma bicicleta ou motocicleta em movimento mantendo seu movimento retilíneo.

Aplicados principalmente como um importante recurso para navegação, desde sua invenção, os giroscópios contribuem até os dias atuais em diversas outras aplicações. Com a evolução da tecnologia e a necessidade de resultados sempre mais precisos e confiáveis, cada vez mais se aprimoram os conhecimentos e inovações na área de medição inercial de rotações.

2.1 APLICAÇÃO DOS GIROSCÓPIOS

Na maioria das aplicações, giroscópios são usados como sensores inerciais, por sua propriedade de se opor à mudanças de direção são dispositivos sensíveis às velocidades angulares. Tendo como referência o seu próprio eixo de rotação, são capazes de determinar uma variação de quantidade de movimento angular no tempo, o que significa dizer que medem velocidade angular, e normalmente definido pela unidade de medição graus por segundo [graus/s].

Dentre os vários usos atuais do efeito giroscópico, se destacam alguns deles, como a grande utilização em navios como giroestabilizadores que têm por função reduzir a inclinação lateral da estrutura quando navegando sob condições climáticas adversas, o uso em aeronaves como controladores de piloto automático, quando o piloto está sem visibilidade por condições climáticas, com o uso de sensores a giroscópio é possível manter o rumo da aeronave sem desvios angulares em sua rota. Na indústria e na mineração também é possível encontrar aplicações, como registrar curvas e graus, ou mais especificamente determinar uma rota precisa de perfuração de um poço de petróleo. Na área militar, uma das primeiras áreas a fazer uso da tecnologia, os giroscópios corrigem a direção de mísseis teleguiados e torpedos, são utilizados em miras automáticas dentro de aviões de combate para suas metralhadoras, foguetes e bombas, melhoram a mira de armamentos antiaéreos, e também controlam a navegação de satélites e veículos aeroespaciais. Os giroscópios para uso bélico e aeroespacial possuem características superiores de precisão, e por isso são classificados internacionalmente como dispositivos “sensíveis”. Fato que torna extremamente difícil obter licença para importação dos mesmos.

Outra aplicação interessante do uso de giroscópios foi feita com o intuito de comprovar a teoria geral da relatividade de *Albert Einstein* prevista há cem anos. A sonda espacial *Gravity probe B* (GP-B) criada pela NASA, carregando quatro giroscópios contidos em uma esfera com rotação uniforme de frequência de dez mil rotações por minuto, foi enviada ao espaço no ano de 2004 sabendo que a única interferência capaz de mudar os eixos de rotação de sua direção original seria a deformação da estrutura espaço tempo criado pela força da gravidade dos grandes

corpos do espaço. Embora na prática a precisão esperada pelos cientistas não ter sido atingida, o efeito previsto por Einstein pode ser comprovado. A Figura 5 a seguir, ilustra a esfera contendo os giroscópios usados na GP-B.



Figura 5: Esfera contendo 4 giroscópios usados na GP-B (NASA)

2.2 TECNOLOGIAS ATUAIS

Atualmente existem três principais tecnologias de giroscópios: os mecânicos, os piezoelétricos, os ópticos, cada um deles com suas características indicadas às suas respectivas aplicações, diferenciando entre si por preço, dimensão, precisão, facilidade de manuseio, facilidade de confecção, características do meio em que vai ser usado, dentre outras a serem pré-definidas no projeto de aplicação.

2.2.1 Giroscópios Mecânicos

Os giroscópios do tipo mecânico são baseados em uma roda presa a um eixo central, a qual normalmente por intermédio de um motor elétrico adquire movimento de rotação e assim também energia cinética pelo momento angular que o mantém em movimento enquanto a velocidade for suficiente. Desta maneira o eixo central tende a manter sua direção fixa tornando-o sensível à qualquer mudança da mesma.

Giroscópios mecânicos apresentam geralmente dimensões relativamente grandes para certas aplicações, além de se fazer necessário uma fonte de rotação para seu funcionamento, por isso não são muito usados em aplicações de alta tecnologia. A Figura 6 a seguir ilustra um giroscópio mecânico com indicação angular em dois eixos.

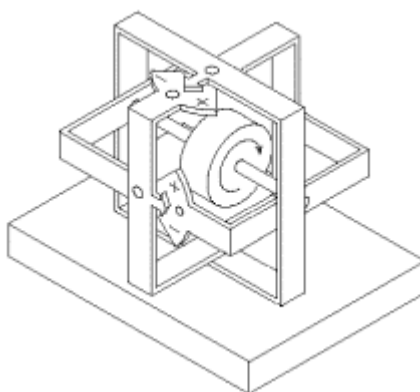


Figura 6: Giroscópio mecânico com indicação angular em dois eixos (SANTOS, 2003)

2.2.2 Giroscópios Piezoelétricos

Outra forma mais recente da obtenção do fenômeno do efeito giroscópico é obtido com o uso de cristais piezoelétricos, que segundo SANTOS (2003), é realizada através da tecnologia de micro-máquinas. Neste caso um fragmento de cristal, inserido numa pastilha de circuito impresso (CHIP), é colocado em movimento vibratório linear. Assim, quando ocorre uma tendência de movimento rotacional no eixo ortogonal do movimento linear, surgirá uma aceleração Coriolis proporcional a este movimento rotacional e ortogonal aos demais eixos. Esta aceleração então é detectada na forma da força que a mesma produz, indicando desta maneira a intensidade do movimento rotacional.

Esta maneira de se adquirir tais medições pode ser implementada em dimensões bastante reduzidas e assim se tornar mais adaptável para certos tipos de

aplicações, além de possuir melhor precisão nas medições. A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento de um giroscópio a cristal.

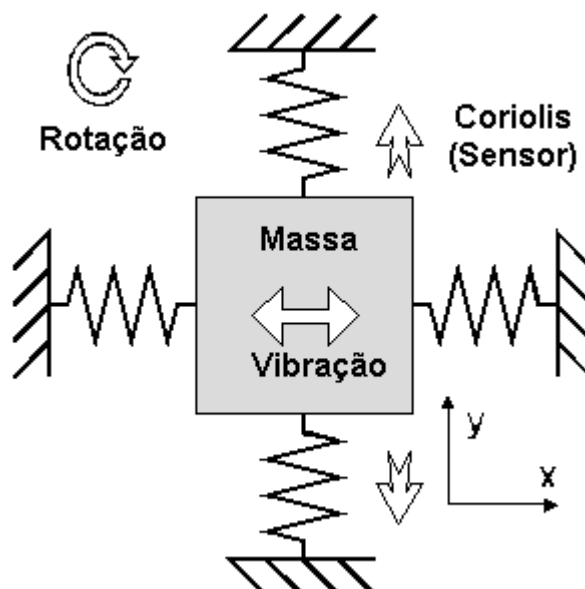


Figura 7: Princípio de funcionamento de um giroscópio a cristal (SANTOS, 2003)

2.2.3 Giroscópios Ópticos

Este tipo de giroscópio segue um princípio descoberto em 1913 por um pesquisador francês, chamado de efeito Sagnac, no qual um raio de luz inicialmente dividido em dois percorre o mesmo caminho, porém em sentidos opostos. Como a velocidade da luz permanece constante, quando o sistema possui movimento de rotação, os raios de luz produzem um padrão de interferência em que a distância entre a posição original das franjas e suas novas posições dependem diretamente da velocidade angular do sistema. Este efeito então é medido como se o caminho percorrido por um dos feixes fosse maior que o outro. Assim se tornando possível a medição do deslocamento angular. Este é o princípio de funcionamento dos giroscópios de anel de laser (*RLG – Ring Laser Gyro*) como pode ser observado através da Figura 8 a seguir.

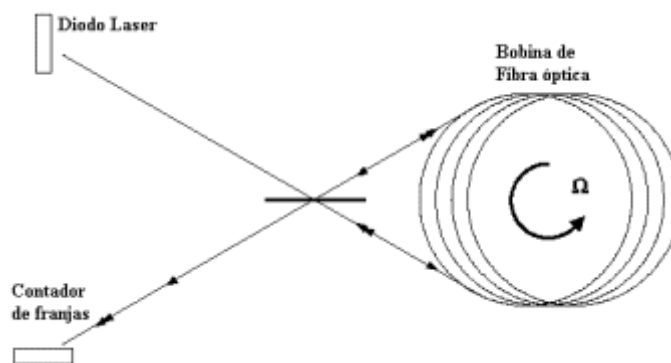


Figura 8: Princípio de funcionamento de um giroscópio de fibra óptica

O diodo Laser servindo como fonte de luz, introduz feixes na bobina de fibra óptica, e conforme um movimento rotacional do sistema em que se encontra o giroscópio, o contador de franjas detecta e mede a diferença de tempo que os feixes levam para percorrer o caminho proposto.

Sendo um dos métodos mais avançados atualmente, esta tecnologia disponibiliza alta precisão em suas medições, imunidade a acelerações ou impactos mecânicos, e outra grande vantagem é a não necessidade de aceleração inicial.

2.2.4 Medições Com Giroscópios

Instrumentos do tipo giroscópio são usados em sua grande maioria de aplicações para medir velocidade angular, porém os sinais obtidos após um estímulo de entrada se encontram em função do tempo, ou seja, a saída retorna um valor de posição angular pelo tempo normalmente apresentados em graus por segundo ($^{\circ}/s$), o que traz a necessidade da integração deste para que se tenha um valor de apenas orientação, em graus. Esta integração, apesar de necessária, acaba por introduzir e amplificar os erros e devem ser levados em conta na informação da medição realizada.

Em medições com giroscópios, assim como em qualquer outro dispositivo de medição, existem erros do tipo sistemático, que ocorrem normalmente devido aos defeitos de fabricação e interferências externas, e do tipo aleatório, que incluem os ruídos, sinais normalmente aditivos e de alta frequência.

Além dos erros já conhecidos em sistemas de medições com giroscópio, outra influência que deve ser levada em consideração é a rotação do planeta, uma vez que esta também influencia nas medições. Esta influência, assim como os erros nas medições, serão detalhados na seção 2.2.5.

Um sistema de medição, que se aproxima da realidade, pode ser visualizado na Figura 9 a seguir, uma vez que esta leva em consideração alguns dos principais erros no sinal de saída.

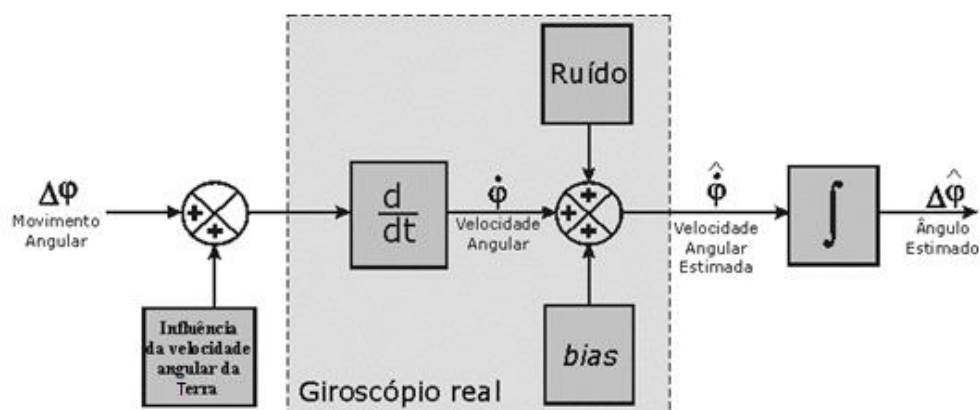


Figura 9: Bloco-diagrama de um sistema de medição angular por giroscópio (SANTOS, 2003)

O diagrama de blocos visto na Figura 9 exemplifica um sistema de medição à giroscópio já acrescido de alguns erros importantes, e ainda segundo SANTOS (2003), a integração do sinal de velocidade de um giroscópio retorna um valor composto por três parcelas: i) a posição angular propriamente dita; ii) um termo que cresce com o tempo de forma proporcional ao Bias estimado, acrescido da influência de rotação da Terra e; iii) passo angular aleatório que cresce proporcional ao desvio padrão e à raiz quadrada da velocidade angular.

2.2.5 Influência da Rotação do Planeta

O planeta Terra possui movimento de rotação angular constante sob um eixo imaginário central norte-sul, o valor desta rotação é de aproximadamente $0,00417807 \text{ }^\circ/\text{s}$. Por possuir movimento angular sob seu eixo central, a Terra causa interferência em medições feitas com giroscópios.

Ao se alinhar paralelamente o eixo de sensibilidade de um giroscópio ao eixo de rotação da Terra, e desconsiderando erros de medição, o dispositivo mesmo estando imóvel irá medir um valor de velocidade angular constante. Mas por outro lado se o eixo de sensibilidade for alinhado perpendicularmente, a velocidade angular percebida pelo giroscópio imóvel será nula. Inclinações intermediárias causarão desvios de medição proporcional ao ângulo fazendo com que o eixo do vetor de rotação do planeta; consistindo portanto num fator de incerteza da medição realizada. A Figura 10 a seguir ilustra este efeito de interferência do planeta em medições feitas com giroscópios.

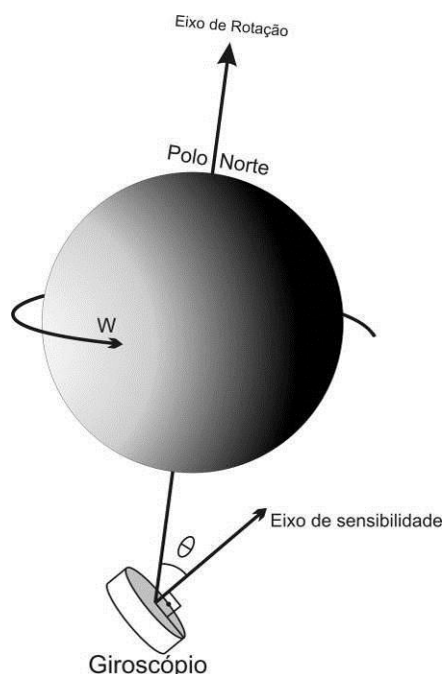


Figura 10: Influência da rotação da Terra na medição do giroscópio (EMMENDOERFER et al. , 2006)

A influência da rotação da Terra em medições feitas com giroscópios pode ser calculada pela Equação (2.1).

$$\omega = \omega_{terra} \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

Onde ω é a rotação medida pelo instrumento devido a rotação da Terra, ω_{terra} é a velocidade angular de rotação da Terra, e θ é o ângulo formado pelo eixo de rotação do giroscópio e o eixo de rotação da Terra.

2.2.6 Erros Sistemáticos

2.2.6.1 Bias

O erro de Bias pode ser entendido como uma diferença entre o valor esperado da medição e o valor real requerido. Em uma situação ideal, o valor medido na saída de um giroscópio em repouso, sem nenhum tipo de estímulo de entrada, deveria ser igual a zero, porém isso não acontece na prática, então um *offset* entre um estímulo de entrada e o sinal de saída é chamado de erro de Bias. A Figura 11 a seguir ilustra um erro de Bias segundo uma perspectiva de sinal de entrada e sinal medido.

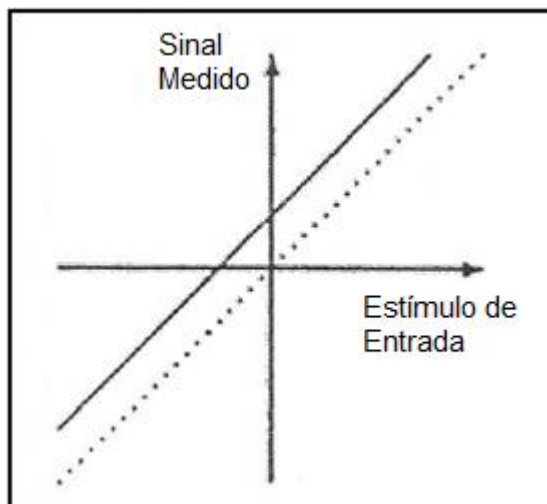


Figura 11: Erro de Bias
(GREWAL et al. , 2007, modificado pelo autor)

Um erro de Bias sem correção na medição pode causar erros significativos no sinal de saída do dispositivo, pois a integração do sinal para determinação do deslocamento angular em um giroscópio acontece em uma etapa final como pode ser visto na Figura 9, o que indica um aumento do erro no sinal de saída com o passar do tempo.

A Figura 12 a seguir mostra um erro de Bias em um sinal medido com o giroscópio em repouso.

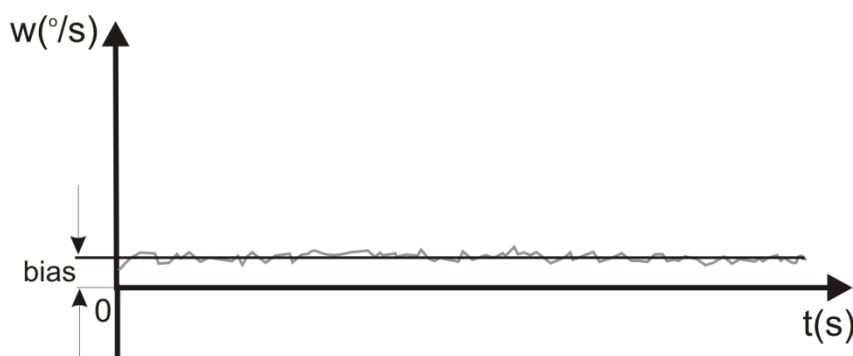


Figura 12: Forma de onda da velocidade angular com erro de Bias
(EMMENDOERFER et al. , 2006)

A Figura 12 representa uma forma de onda da velocidade angular com erro de Bias medido por um giroscópio, porém antes da integração para determinação da posição angular. A correção deste erro pode ser feita nesta etapa com um ajuste do offset para zero.

2.2.6.2 Fator De Escala

O fator de escala pode ser caracterizado quando ocorre uma variação no sinal de saída do giroscópio conforme um estímulo de entrada controlado, e pode ser estimado como uma inclinação em uma linha reta, sinal ideal de saída, conforme mostra a Figura 13 a seguir.

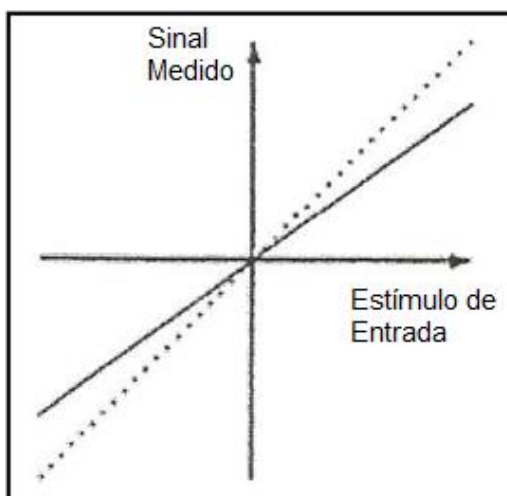


Figura 13: Erro de fator de escala (GREWAL et al. , 2007, modificado pelo autor)

A diferença de inclinação entre o sinal medido e o sinal de entrada determina o erro de fator de escala, e segundo AGGARWAL et al. (2010), um sensor ideal tem um fator de escala igual a 1. Assim, qualquer fator de escala diferente de 1 está contaminado.

O erro desloca a precisão de cada ponto de transdução por uma constante, e é expresso normalmente em ppm (parte por milhão), ou em porcentagem para sensores de baixo custo.

2.2.6.3 Temperatura de Operação

A temperatura de operação de cada instrumento de medição é normalmente informada pelo próprio fabricante, normalmente expressa por uma faixa de temperatura não ideal de trabalho. As altas taxas de variação da temperatura também podem ocasionar erros nas medições, dependendo do material que o dispositivo é feito.

Um erro de temperatura pode ser designado como uma variação no sinal de saída do giroscópio causado por uma operabilidade em ambiente com temperatura não indicada ou não controlada, ou ainda uma variação abrupta na temperatura do sensor, localmente.

2.2.7 Erros Aleatórios

2.2.7.1 Ruídos

Os ruídos são perturbações irregulares de natureza aleatória, imprevisíveis em certo grau, e que podem variar rapidamente. Em um circuito os ruídos podem se classificar basicamente em ruído inerente, que é aquele gerado pelo próprio circuito, e ruído de interferência ou transmitido, o que é originado por fontes externas ao circuito em análise. Os ruídos inerentes podem ser classificados como:

Tipo *Johnson*: é caracterizado pela natureza discreta da corrente elétrica, pois um fluxo de corrente é formado pelo movimento de cargas. A magnitude do ruído Johnson é constante sobre uma ampla faixa de frequências. Por isto, ele é chamado de “ruído branco”, numa analogia à luz branca que é composta por todas as frequências do espectro visível. A tensão do ruído é normalmente apresentada em função da raiz quadrada da frequência.

Tipo *Shot*: é resultado da ação de correntes fluindo por semicondutores. A presença de um ruído branco seguido por picos aleatórios em amplitude no mesmo, caracteriza um ruído do tipo *Shot*.

Tipo Rosa: tanto a tensão quanto a corrente de ruído apresentam uma densidade espectral aproximadamente proporcional a $1/f$, onde f representa a frequência. Também chamado de ruído *flicker*, este é mais pronunciado em frequências abaixo de 100 Hz, na qual muitos sensores operam.

Tipo *Popcorn*: é causado por defeitos que são dependentes das técnicas de produção dos circuitos integrados. Se assemelha a um sinal digital com períodos de variados milissegundos. Atualmente este ruído foi drasticamente reduzido nos dispositivos semicondutores mais modernos.

Tipo *Seebeck*: é resultante da ação do efeito Seebeck, o qual se manifesta pela geração de uma força eletromotriz quando na junção de materiais diferentes submetidos a diferentes temperaturas. Deve ser levado em consideração quando a precisão absoluta requerida é da ordem de 10 à 100 μV . Este ruído pode ser reduzido quando a temperatura de operação é controlada.

2.2.7.2 Random Walk

O *Random Walk* nada mais é que a integração de todas as formas de ruído presente na saída do sensor. Este erro aumenta exponencialmente com o passar do tempo. Segundo GREWAL et al.(2007), o “ângulo do *Random Walk*” de um giroscópio é equivalente ao ruído branco presente nos sinais de saída angular. A Figura 14 a seguir ilustra vários caminhos de erro de *Random Walk* na saída de um sensor do tipo giroscópio.

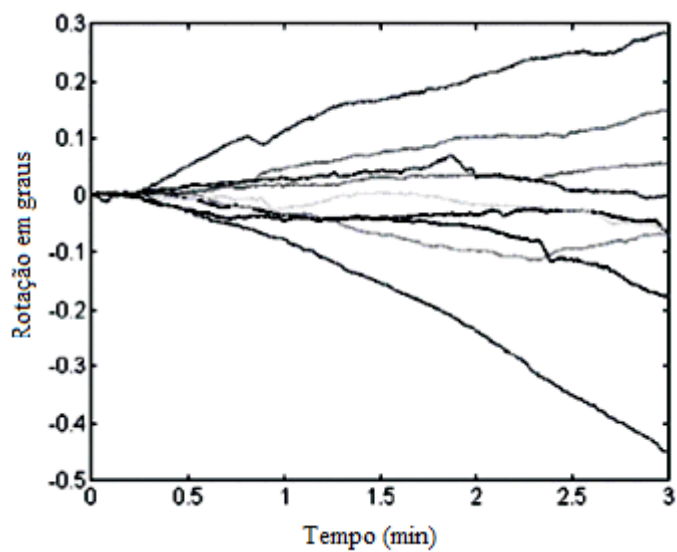


Figura 14: *Random Walk* em um giroscópio (SANTOS, 2003)

Em giroscópios o ruído é normalmente apresentado em termos de graus por segundo por raiz de hertz ($^{\circ}/s\sqrt{\text{Hz}}$), ou ainda em graus por raiz de hora ($^{\circ}/\sqrt{\text{hora}}$). Numericamente é possível demonstrar que um grau por segundo por raiz de hertz é igual a um grau por raiz de hora ($1^{\circ}/\text{min}/\sqrt{\text{Hz}} = 1^{\circ}/\sqrt{\text{hora}}$).

3 A BANCADA

3.1 DEFINIÇÕES DA BANCADA

Para aplicações que usem com frequência o uso das mesmas unidades inerciais, é recomendável, não só que calibrações sejam feitas periodicamente mas também que se tenha a disposição a estrutura necessária para esse tipo de ensaio.

A bancada tratada nesse trabalho, foi desenvolvida para calibração dos giroscópios utilizados no projeto PIG Inercial (SANTOS, 2008), que teve como objetivo a identificação de trajetória de dutos. Isso faz com que o objetivo principal da bancada seja a identificação dos seguintes parâmetros do sistema de referência inercial individualmente:

- Fator de escala;
- Deriva;
- Assimetria;
- Zona morta;
- Influências térmicas;
- Ruídos e outras não linearidades;
- Erros de desalinhamento.

De acordo com SANTOS (2008) além da utilização para o projeto PIG, a bancada pode ajudar também no lado acadêmico servindo como base de experimentação de pesquisa de softwares simuladores, métodos de filtragem de sinais, e outras modelagens de incertezas presentes em sistemas de navegação inerciais puros. Podem servir ainda em experimentos como a identificação de parâmetros inerciais através de métodos robóticos ou implementação de filtros não lineares.

3.1.1 O Projeto Mecânico Da Bancada

No projeto mecânico da bancada, foi definida a arquitetura da bancada, a dinâmica, redutores, motores e potencia elétrica necessária para acionar a bancada. Para garantir características metrológicas, foram usados conceitos de mecânica de precisão.

3.1.2 Objetivos e especificações

O objetivo inicial do projeto, foi desenvolver uma bancada de três eixos. Um deles deveria explorar ao máximo a maior parcela de dinâmica de um giroscópio, e os outros dois eixos, teriam que atender a dinâmica necessária para orientar o eixo principal. Essa bancada deveria apresentar a resolução 5 vezes maior que a resolução do giroscópio utilizado na ocasião (*Honeywell*), e incerteza de posicionamento angular 5 vezes melhor que a estabilidade de Bias somado ao passo aleatório.

São apresentadas por Santos et al. as seguintes medidas de desempenho da bancada:

Capacidade de massa na carga da mesa..... 6 kg

Volume máximo da carga:

Diâmetro..... 200 mm

Altura..... 200 mm

Faixas de movimento:

Junta1..... livre

Junta2..... $\pm 360^\circ$ ($\pm 2\pi$ rad)

Junta3..... $\pm 270^\circ$ ($\pm 3\pi/2$ rad)

Dinâmica esférica (qualquer um dos eixos):

Velocidade máxima.....	190 °/s (3,34 rad/s)
Aceleração máxima.....	260 °/s ² (4,53 rad/s ²)
Ângulo de aceleração.....	70,4 ° (1,23 rad)
Tempo de aceleração.....	0,74 s

Dinâmica de calibração (apenas na junta 1):

Velocidade máxima.....	450 °/s (7,85 rad/s)
Aceleração máxima.....	1125 °/s ² (19,6 rad/s ²)
Ângulo de aceleração.....	90 ° ($\pi/2$ rad)
Tempo de aceleração.....	0,4 s

3.1.2.1 O Conjunto Da Bancada

A bancada, como apresentada na Figura 15, é formada por 5 partes: base de estabilização, pernas ajustáveis, mesa estacionária, conjunto móvel e unidade de potencia.

A base tem 1,4 metros de diâmetro circunscrito, ela é composta de uma base de concreto armado pesando 440 Kg, que está assentada sobre uma piscina de areia grossa, utilizada para amenizar vibrações tanto geradas pela bancada como vindas do solo. As pernas da bancada estão configuradas em plataforma Stewart, com um conjunto de seis pernas retráteis que permitem que a bancada seja nivelada como desejado.

A mesa é constituída de uma circunferência que tem como objetivo fixar e orientar o terceiro eixo da bancada. O formato circular da bancada possibilita a alocação de uma esteira porta cabos que permite rotação em 540°.

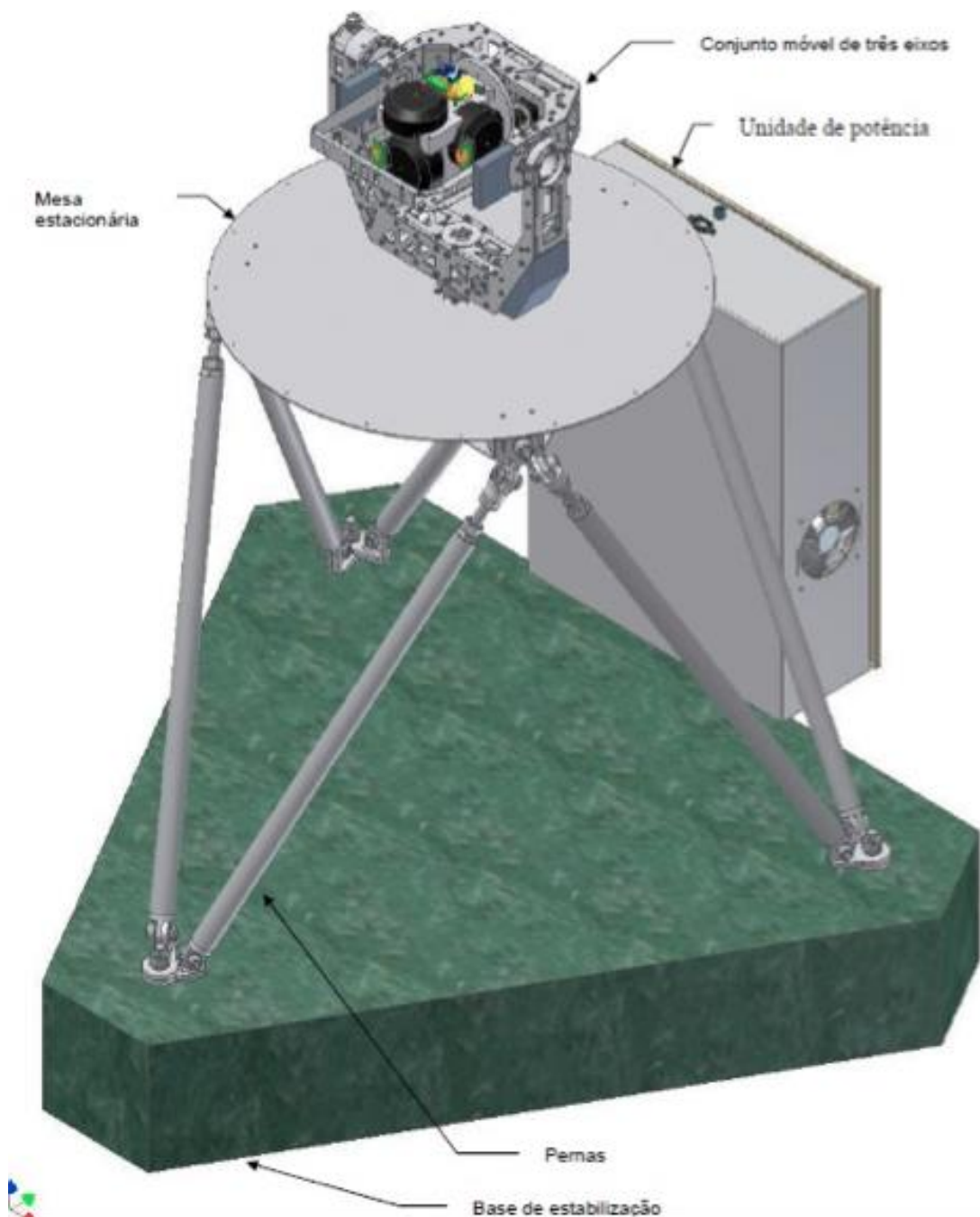


Figura 15: Partes da Bancada de Calibração
Fonte: SANTOS, 2010.

3.1.2.2 Conjunto Móvel De Três Eixos

O conjunto móvel de três eixos, conforme a Figura 16, é dividido em 11 partes: mesa, acionamento do eixo 1, elo 12, lastro de contrapeso do eixo 2,

acionamento do eixo 2, mancal auxiliar, calha porta cabos, elo 23, acionamento do eixo 3, lastro de contrapeso do eixo 3 e base adaptável à mesa.

O eixo 1 é o que possui o motor de potencia mais representativa, 150W, somado a um amplificador leve de velocidade. Ele tem capacidade dinâmica plena de calibrar o giroscópio. Os eixos 2 e 3, tem um motor de 60W de potencia e um redutor com relação de 2,0308. Eles são responsáveis pela dinâmica de simulação de trajetórias. Para todos os eixos, o acoplamento entre o motor e o eixo de entrada do redutor foram implementados a partir de uma correia do tipo *High Torque Drivers* (HTD). Isso contribui não só com o casamento de impedâncias mecânicas, como o torque de atrito do redutor *harmonic drive* e do *encoder*.

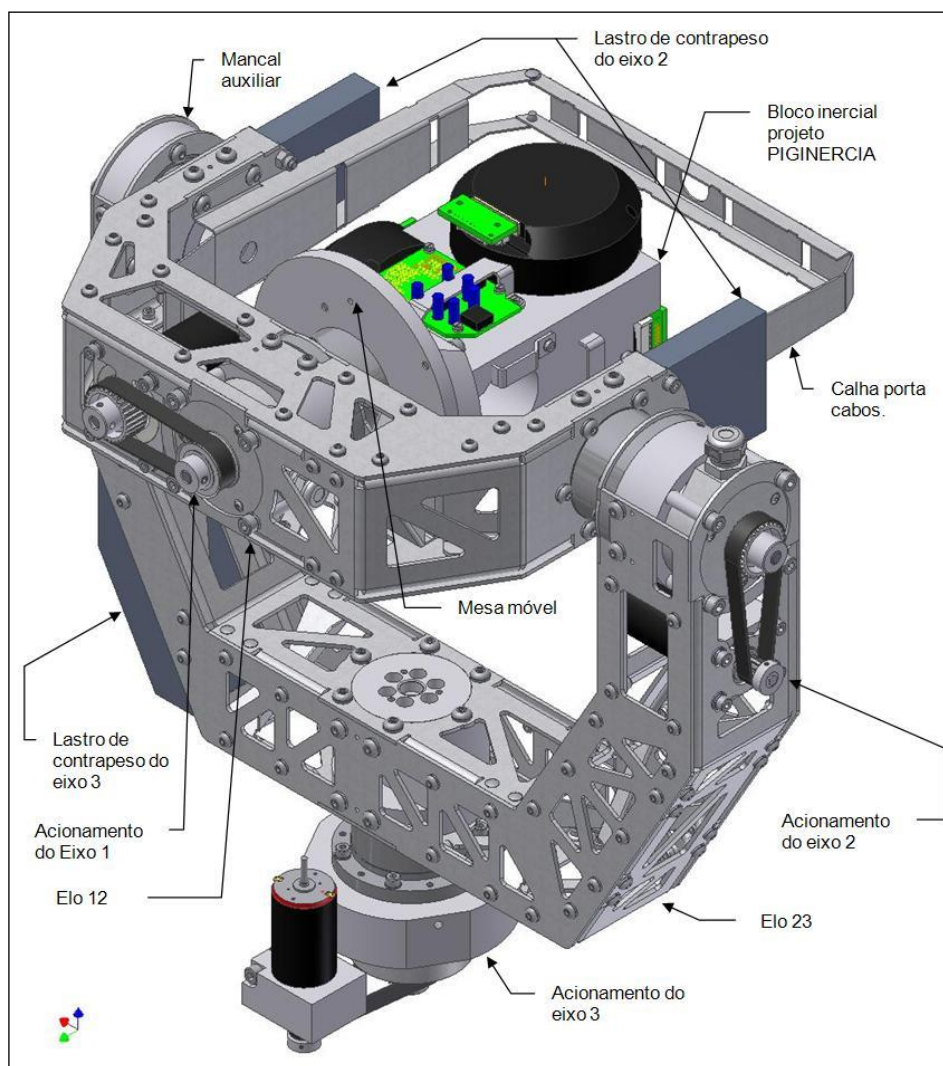


Figura 16: O conjunto móvel da bancada
Fonte: SANTOS 2010.

Os elos 12 e 23 são estruturas tipo berço constituídas de chapas de aço inoxidável cortadas a laser e cubos usinados de alumínio. Eles foram criados para garantir alta rigidez e baixo peso. Uma calha porta cabos é utilizada para levar os cabos até o instrumento a ser calibrado.

A massa do conjunto dos eixos 12 e 23, é muito alto, e não pode ser suportado apenas pelo mancal do eixo dois. Por isso foi dimensionado um mancal auxiliar, que ainda permite a passagem de cabo de alinhamento entre os elos 12 e 23, no seu interior.

3.1.2.3 Acionamentos

Diferentemente do convencional, na bancada os acionamentos são feitos, como mostrado na Figura 17. Ao invés de utilizar o redutor principal acoplado a um redutor com o *encoder*, é utilizado o *encoder* acoplado à saída de um redutor sem folga e rígido, o *harmonic drive*. O encoder em mancais rígidos e o *harmonic drive* forma um acoplamento do tipo Oldham. Na extremidade do *encoder* foi alocada a polia de um redutor por correia dentada servindo de acoplamento para o motor, resultando em um layout mais compacto do conjunto com o motor paralelo ao redutor.

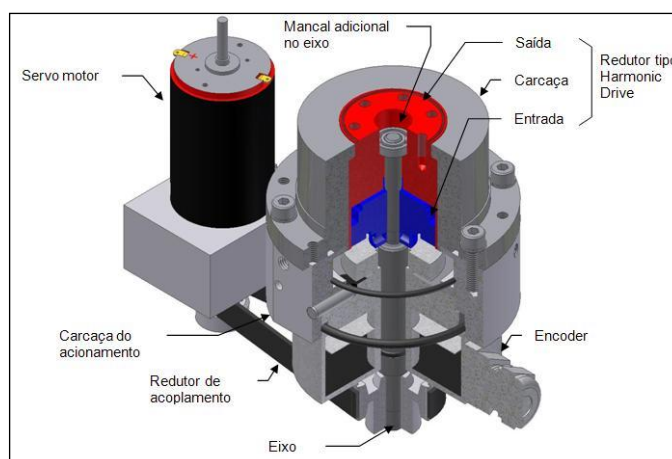
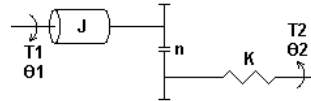


Figura 17: Acionamento da bancada
Fonte: SANTOS, 2010.

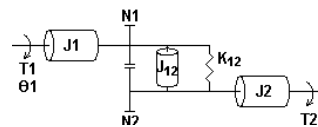
3.1.3 Elementos de Transmissão

Tratando-se de movimentação e torque, o projeto é formado basicamente por redutores *harmonic drives* e de conjuntos de polias e correias, com a seguinte representação:

Harmonic drives:



Polias e correias:



Sendo:

$T1$ e $T2$ os torques na entrada e saída;

$\theta1$ e $\theta2$ a posição angular do eixo na entrada e saída;

η a relação de redução do *harmonic drive*;

J é a inércia do *harmonic drive*;

$J1$ e $J2$ são as inércias das polias de entrada e de saída;

$N1$ e $N2$ são o numero de dentes das polias de entrada e saída;

K é a constante de rigidez do *harmonic drive*;

K_{12} é a constante de rigidez da correia dentada

3.1.4 Servo-Acionamentos

O acionamento de cada junta da bancada é feito a partir de servomotores de corrente contínua com escovas fabricados pela empresa *Maxon Motor*. Esse tipo de motor foi escolhido por atender ao requisitos da bancada demandar o acionamento de cargas de baixo atrito e alta inércia. A potencia dos motores da bancada varia de 60W até 150W.

A tabela a seguir descreve os principais dados técnicos da bancada:

Tabela 1: Dados técnicos da bancada
Fonte: SANTOS (2010)

MODELO DO MOTOR (código do fabricante)	310009	148877
Potência	60	150
Tensão nominal	48	48
Velocidade a vazio	8490	7580
Torque de pico	1020	2500
Gradiente velocidade/torque	8.33	3.04
Corrente a vazio (I_0)	78.5	68.6
Corrente de partida	19.0	41.4
Resistência dos enrolamentos (R_a)	2.52	1.16
Max. velocidade permitida (ω_{max})	12000	8200
Max. corrente média (I_{dcmax})	1.72	3.3
Max. torque médio (T_{max})	88.2	201.0
Max. eficiência	88.0	91.8
Constante de torque (K_t)	53.8	60.3
Constante de velocidade (K_v)	178	158
Constante de tempo mecânica	3.01	4.26
Inércia do rotor (J_m)	34.5	134.0
Indutância dos enrolamentos	0.513	0.330
Resistência térmica carcaça-ambiente	6.00	4.65
Resistência térmica rotor-carcaça	1.70	1.93
Massa	238	480

A unidade de potencia é composta principalmente pelos servo-amplificadores, pela interface de controle, e das fontes de alimentação. Secundariamente a esses componentes, compõe a unidade de potencia: interruptor, porta-fusível, conector de entrada de energia, tomada auxiliar de energia, transformador toroidal, botoeira de emergência, ventiladores e conectores da bancada com a unidade de potencia.

3.1.5 Interface com a Bancada

A interface entre a bancada e o usuário é feita através de um programa desenvolvido no LabView. Como pode ser visto na Figura 18, através da interface desenvolvida, existem várias maneiras de utilizar a bancada. O usuário pode escolher as rotações que deseja que sejam feitas pela bancada, escolher o tipo de coordenada a ser utilizada, e ainda escolher como deseja controlar os movimentos. Caso ele queria um controle grosseiro, pode utilizar os campos dentro dos quais será colocado o ângulo da rotação, ou pode usar ainda um *joystick* para controlar a bancada utilizando um ajuste mais fino dos ângulos.

O software de interface da bancada mostra ainda, um referencial que acompanha as movimentações exercidas pela bancada, ou seja, o usuário consegue acompanhar as rotações realizadas pela bancada através de um referencial que se move em tempo real junto a bancada.

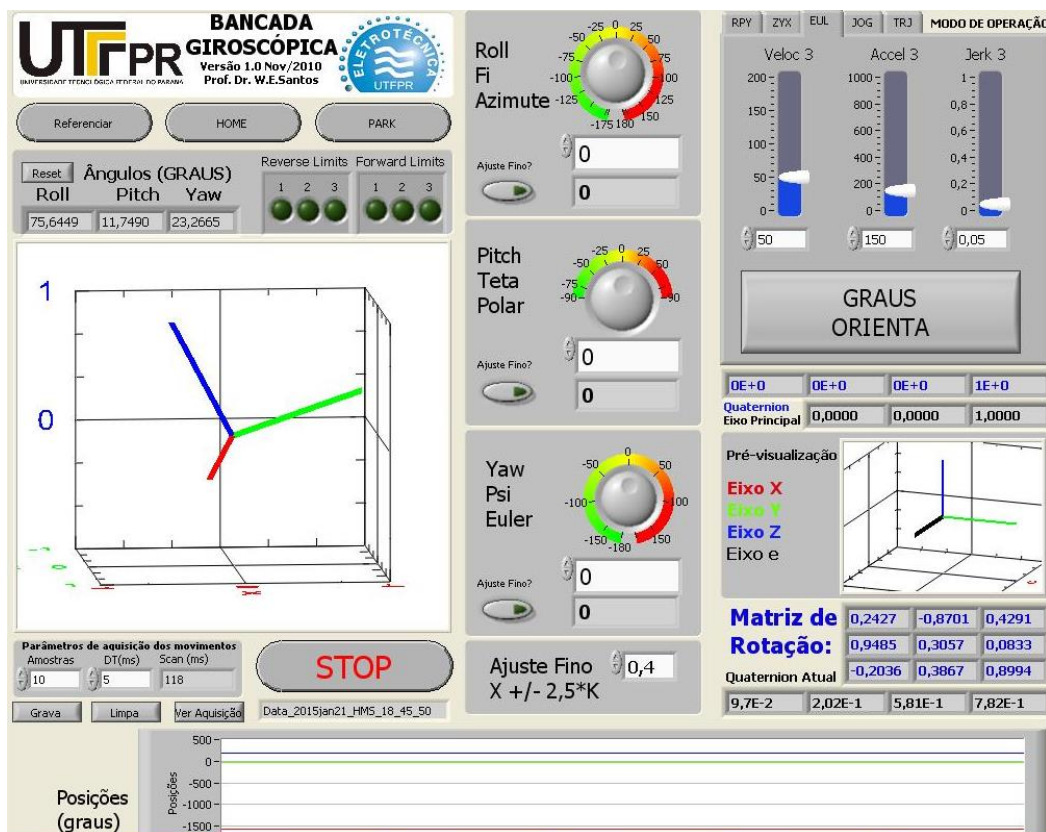


Figura 18: Interface entre a bancada e o usuário

4 PROCEDIMENTOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

4.1 ALINHAMENTO COM O EIXO DE ROTAÇÃO DA TERRA

Como já foi apresentado no Capítulo 2, o giroscópio é um instrumento de medição que percebe variações angulares. Mesmo que discretamente, o giroscópio é influenciado pela rotação da Terra, e é muito importante para o sucesso da calibração que a rotação constante da Terra não influencie no resultado final do processo.

Por esse motivo, uma etapa crucial para os resultados obtidos no projeto, é o alinhamento do eixo principal da bancada perpendicularmente ao eixo de rotação da Terra, o que compensaria o movimento do planeta. Para tal, é adotado o modelo terrestre esférico, considerando R o raio da Terra, e La_0 , Lo_0 e h_0 respectivamente Latitude, Longitude e Altitude iniciais.

O principal é que o eixo de rotação da bancada esteja perpendicular ao eixo de sensibilidade do giroscópio no momento em que alguns testes sejam realizados, tendo assim, a rotação da Terra anulada para a realização de alguns experimentos.

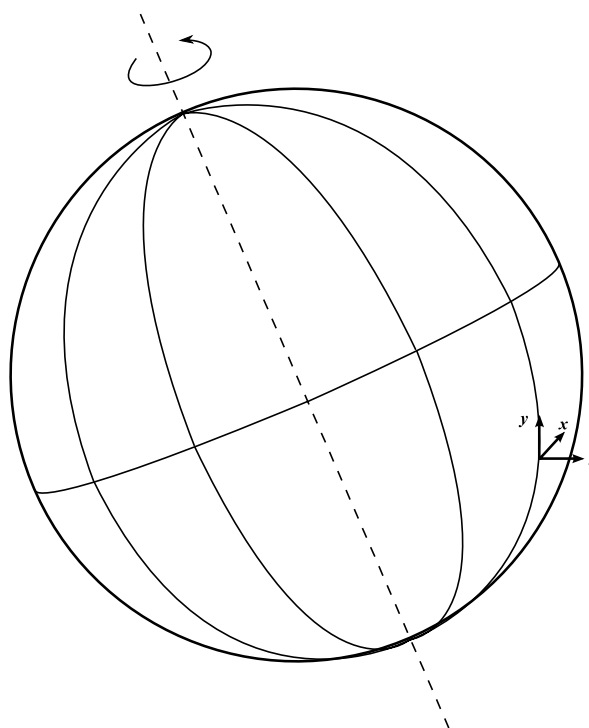


Figura 19: O planeta Terra e o referencial da bancada
FONTE: Elaborada pelo autor

4.1.1 Escolha dos marcos na UTFPR

Nessa seção, será descrita a metodologia utilizada para realizar o alinhamento da bancada com o eixo de rotação da Terra.

Para a realização dos experimentos práticos, inicialmente foram determinados os pontos onde seriam fixados os três marcos na parede do prédio da UTFPR. O local dos marcos foi determinado de forma que, olhando pela janela da sala onde a bancada é encontrada, os marcos fossem visíveis a partir da bancada.

Pode-se ver na Figura 20 abaixo a localização de cada um dos marcos, pontos A1, A2 e A3.



Figura 20: Localização dos marcos no prédio da UTFPR

Após determinar a localização de cada marco, cada um deles foi georreferenciado.

4.1.2 Georreferenciamento dos marcos

Tendo os marcos posicionados, o próximo passo é o georreferenciamento de cada um deles, ou seja, conhecer as coordenadas de cada um dos pontos. Para esse procedimento, e com o auxílio de especialistas, foram utilizados os seguintes instrumentos:

Duas antenas e dois receptores GNSS Leica 900CS:



Figura 21: GNSS Leica 900CS
Fonte: Leica Geosystems

Estação Total Leica TCR407 Power



Figura 22: Estação Total Leica TCR407 Power
Fonte: Manfra

Inicialmente foram determinadas as coordenadas de dois pontos. Para isso, foram instaladas duas antenas GNSS Leica 900CS, Figura 21, no alto de dois prédios da UTFPR (prédio do RU e bloco E) como pode ser visto na Figura 20 como círculos.

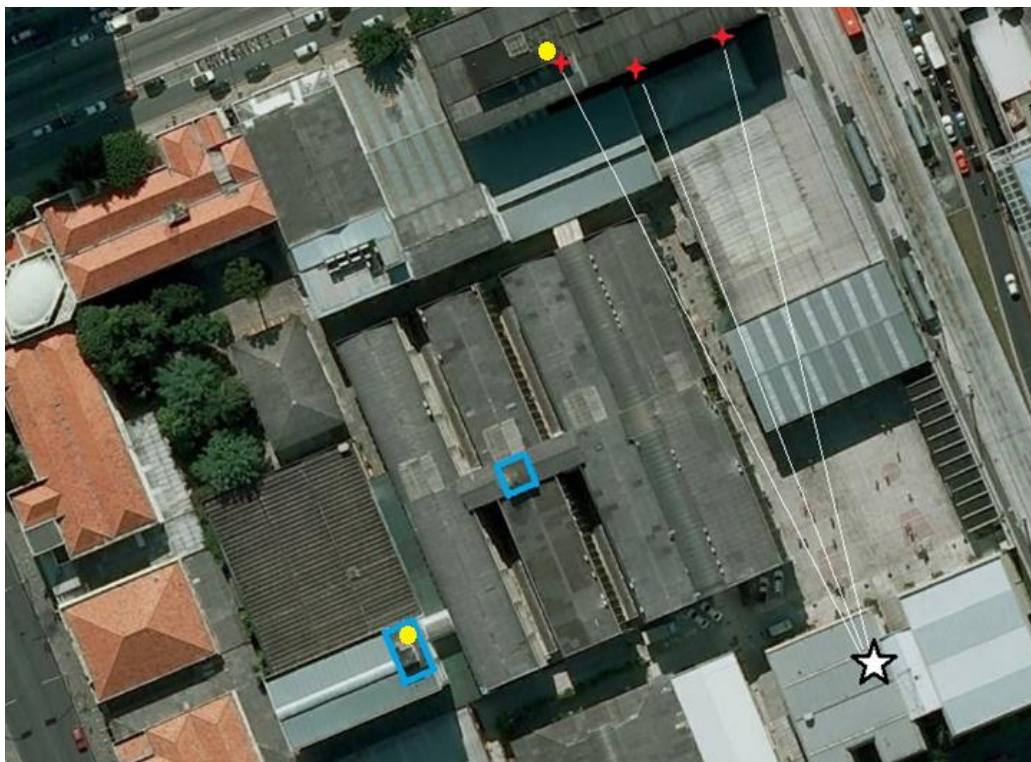


Figura 23: Localização dos pontos de referência

Esse equipamento foi mantido por 24 horas rastreando e processando a localização de cada um dos pontos selecionados. Tendo a coordenada desses dois pontos, foi utilizada a Estação Total Leica, Figura 22, em cada um dos dois pontos, que com visada dos marcos previamente selecionados, para então chegar ao conhecimento das coordenadas dos marcos.

O resultado obtido foi o seguinte para cada um dos pontos mostrados na Tabela 2 (sendo $A1=P1$, $A2=P2$ e $A3=P3$):

Tabela 2: Coordenadas dos marcos

	Norte (m)	Este (m)	Altitude (m)
P1	7185343,838	674097,334	923,112
P2	7185338,357	674100,133	920,699
P3	7185347,471	674122,457	920,861

4.1.3 Determinação dos ângulos entre os marcos

Finalmente, o ultimo parâmetro necessário para viabilizar o cálculo das coordenadas da bancada é o conhecimento do ângulo entre os marcos fixados no prédio da UTFPR.

**Figura 24: Luneta utilizada para medição dos ângulos entre os marcos**

Para esse procedimento, foi utilizada uma luneta (Figura 24), que foi fixada na bancada de calibração, utilizando uma base usinada especificamente para ela. Tendo a luneta fixada, foram visados cada um dos marcos P1, P2 e P3 a partir de uma posição de origem da bancada, mantendo nota da quantidade de passos realizados em cada movimento. O resultado desses movimentos pode ser visto na Tabela 3:

Tabela 3: Movimento realizado pelos motores da bancada (passos)

	eixo2 (passos)	eixo3 (passos)
P1	223750	3868600
P2	208000	3868100
P3	207700	3621350

A partir da quantidade de passos que cada motor correu, calculou-se o ângulo entre os marco da inicialmente calculando a diferença entre os passos corridos de dois em dois marcos, ou seja, entre o marco P1 e P2, P1 e P3 e P2 e P3. Em seguida, encontrou-se o ângulo utilizando o teorema de Pitágoras, como pode ser visto abaixo:

Ângulo entre P1 e P2:

Cálculo da diferença:

$$223750 - 208000 = 15750 \quad (4.1)$$

$$3868600 - 3868100 = 500 \quad (4.2)$$

Cálculo do ângulo:

$$\sqrt{(15750^2 + 500^2)} = 15758 \quad (4.3)$$

Sabendo que o motor tem no total 7200000 passos:

$$\frac{360 \cdot 15758}{7200000} = 0,787896725^\circ \quad (4.4)$$

Ângulo entre P1 e P3:

Cálculo da diferença:

$$223750 - 207700 = 16050 \quad (4.5)$$

$$3868600 - 3621350 = 247250 \quad (4.6)$$

Cálculo do ângulo:

$$\sqrt{(247250^2 + 16050^2)} = 247770 \quad (4.7)$$

Sabendo que o motor tem no total 7200000 passos:

$$\frac{360 \cdot 247770}{7200000} = 12,38851938^\circ \quad (4.8)$$

Ângulo entre P2 e P3:

Cálculo da diferença:

$$208000 - 207700 = 300 \quad (4.9)$$

$$3868100 - 3621350 = 246750 \quad (4.10)$$

Cálculo do ângulo:

$$\sqrt{(300^2 + 266750^2)} = 246750 \quad (4.11)$$

Sabendo que o motor tem no total 7200000 passos:

$$\frac{360 \cdot 246750}{7200000} = 12,33750912^\circ \quad (4.12)$$

4.1.4 Determinação da distância entre cada marco e a bancada

Tendo posse das coordenadas de cada marco e o ângulo entre cada marco , tornou-se possível o cálculo das coordenadas da bancada. Para isso, tomamos as coordenadas medidas de cada um dos marcos, Tabela 2, e encontramos a distância entre cada dois pontos:

Distância entre P1 e P2:

$$\sqrt{((7185343,838 - 7185338,357)^2 + (674097,334 - 674100,133)^2 + (923,112 - 920,699)^2)} \\ = 6,610471 \quad (4.13)$$

Distância entre P1 e P3:

$$\sqrt{((7185343,838 - 7185347,471)^2 + (674097,334 - 674122,457)^2 + (923,112 - 920,861)^2)} \\ = 25,48393 \quad (4.14)$$

Distância entre P2 e P3:

$$\sqrt{((7185338,357 - 7185347,471)^2 + (674100,133 - 674122,457)^2 + (920,699 - 920,861)^2)} \\ = 24,11332 \quad (4.15)$$

Utilizando a lei dos cossenos, as coordenadas de cada ponto, e os ângulos entre pontos subjacentes medidos pela bancada, é possível identificar a distância entre cada marco e a bancada. A lei dos cossenos é descrita pela seguinte equação:

$$x^2 = y^2 + z^2 - 2 \cdot y \cdot z \cdot \cos \alpha \quad (4.16)$$

Sendo x , y e z os lados de um triângulo qualquer, e α o ângulo entre dois desses lados, como mostrado na Figura 25.

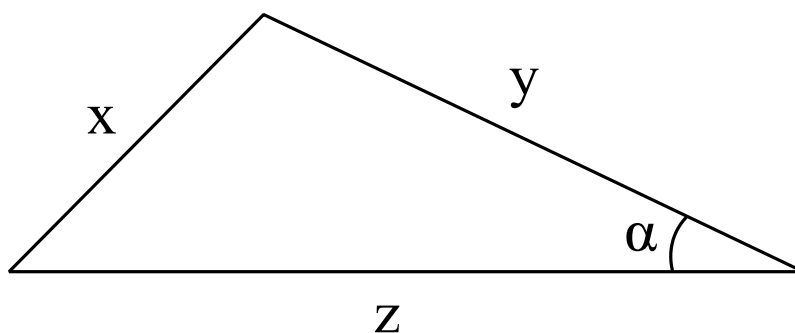


Figura 25: Triângulo para demonstração da lei dos cossenos
FONTE: Elaborada pelo autor

Portanto, utilizando a lei dos cossenos e os dados adquiridos previamente, é possível calcular a distância entre a bancada e cada marco. Para isso, será montado um sistema de equações, no qual cada equação é baseada em um dos três triângulos que são formados a partir do marco e do ponto onde a bancada está situada, como pode ser visto na Figura 26.

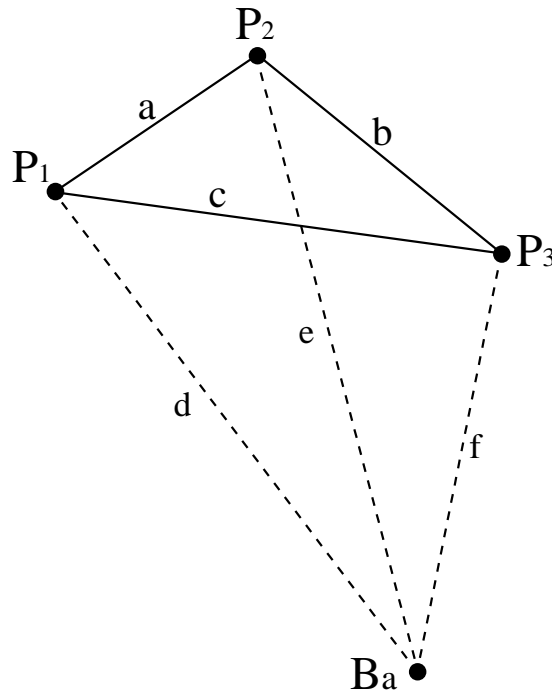


Figura 26: Localização dos pontos P1, P2, P3 e Ba.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Sendo o primeiro dos triângulos o formado pelos lados a, b e c, o segundo formado pelos lados b, e e f e o terceiro formado pelos lados c, d e f.

O sistema de equações, buscando o tamanho dos lados **d**, **e** e **f** é o seguinte:

$$\begin{cases} d^2 + e^2 - 2 \cdot d \cdot e \cdot \cos(0,787896725) = 6,610471^2 \\ e^2 + f^2 - 2 \cdot e \cdot f \cdot \cos(12,33750912) = 24,11332^2 \\ d^2 + f^2 - 2 \cdot d \cdot f \cdot \cos(12,38851938) = 24,11332^2 \end{cases} \quad (4.17)$$

Utilizando o software MATLAB para a resolução do sistema de equações obtivemos o resultado para as distâncias dos marcos até a bancada mostrado na Tabela 4.

Tabela 4: Distância entre os marcos e a bancada

DISTÂNCIAS	
d (P1 até Ba)	112,5707 m
e (P2 até Ba)	108,2662 m
f (P3 até Ba)	101,8153 m

4.1.5 Cálculo das coordenadas da bancada

Com posse de todos os dados calculados e medidos acima, é possível calcular as coordenadas da bancada de calibração de giroscópios.

Inicialmente, será utilizada um marco localizado na UTFPR no nível do solo para ter conhecimento da altura do eixo 1 da bancada.

Altura do nível do solo da UTFPR: 902,233 m

Altura do chão até o eixo 1 da bancada: 1,47 m

Altura do degrau de entrada no prédio onde a bancada está localizada: 0,25 m.

$$902,233 + 1,47 + 0,25 = 903,953 \text{ m} \quad (4.18)$$

De posse da altura é possível calcular as coordenadas Norte e Este da bancada. Para isso, será criada um triângulo retângulo formado pela distância entre o ponto P2 até Ba como hipotenusa, a altura da bancada ate a altura do ponto P2 como cateto oposto e se tornará possível descobrir a distância entre Ba e P2 no plano horizontal, para então possibilitar o cálculo dessas coordenadas.

Através do triângulo mostrado na Figura 27, pode-se calcular a distância entre o ponto P2 e Ba quando este é espelhado no plano horizontal.

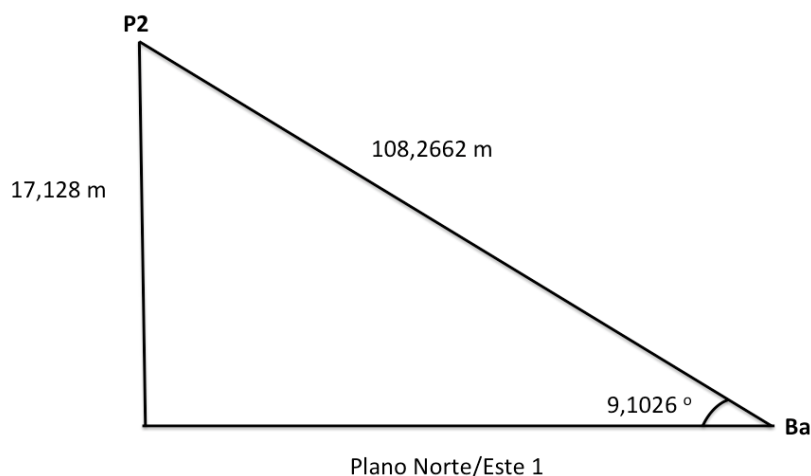


Figura 27: Triângulo para descobrir a distância entre P2 e Ba no plano horizontal
Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo conhecimento dos dados mostrados na Figura 26, calcula-se:

$$x = \cos(9,1026) * 108,2662 = 106,7525 \text{ m} \quad (4.19)$$

Em seguida, por meio da triângulo mostrado na Figura 28, calcula-se a distância entre o marco P3 e a bancada (Ba), no plano horizontal utilizando o mesmo método descrito anteriormente.

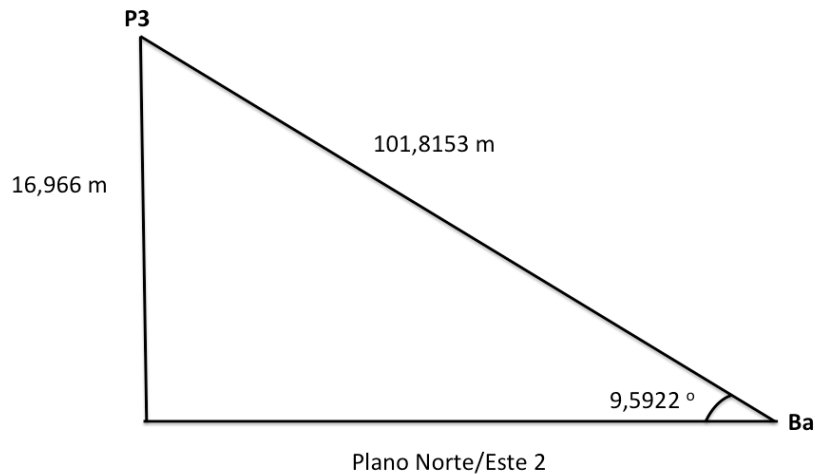


Figura 28: Espelhamento no plano horizontal da distância entre P3 e Ba
Fonte: Elaborado pelo autor

$$x = \cos(9,5922) * 108,8153 = 106,9028 \text{ m} \quad (4.20)$$

Para o próximo passo, será espelhado no plano horizontal o comprimento entre P2 e P3, com o triângulo mostrado na Figura 29.

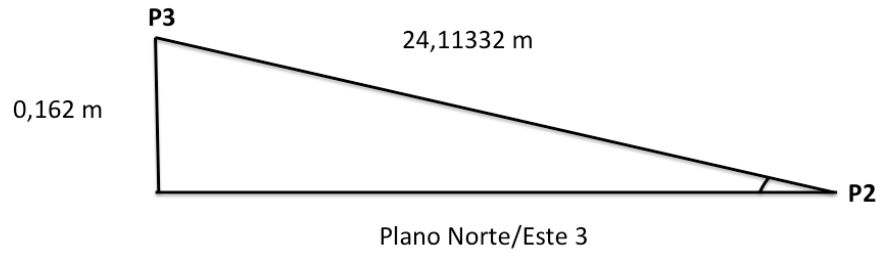


Figura 29: Espelhamento no plano horizontal da distância entre P2 e P3
Fonte: Elaborado pelo autor

$$x = \sqrt{24,11332^2 - 0,162^2} = 24,1128 \quad (4.21)$$

Finalmente, com todos os lados de um triângulo espelhado no plano horizontal, torna-se possível calcular a coordenada Norte e a coordenada Este da bancada utilizando a Figura 30.

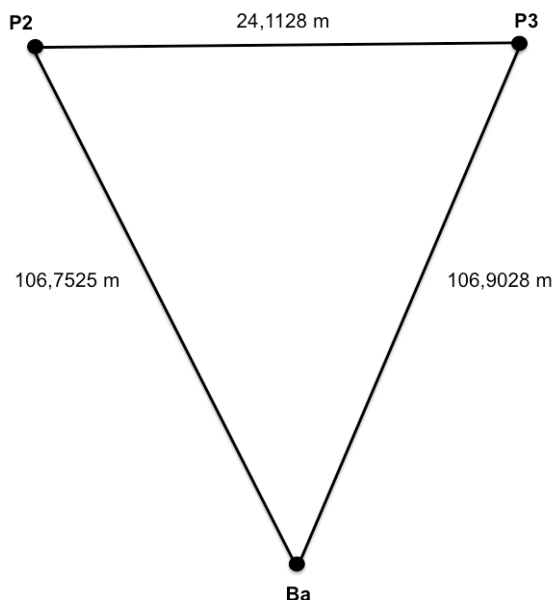


Figura 30: Triângulo formada pelos marco A2, A3 e Ba no plano Norte e Este
Fonte: Elaborado pelo autor

Conhecendo todos os lados do triângulo, é possível descobrir seus ângulos internos utilizando a lei dos cossenos:

$$\hat{\text{Ângulo em A2: } 83,1652^\circ}$$

$$\hat{\text{Ângulo em A3: } 83,8748^\circ}$$

$$\hat{\text{Ângulo em Ba: } 12,2845^\circ}$$

E após isso calcular as distâncias em norte e este formando um triângulo retângulo interno a forma utilizada anteriormente (Figura 31).

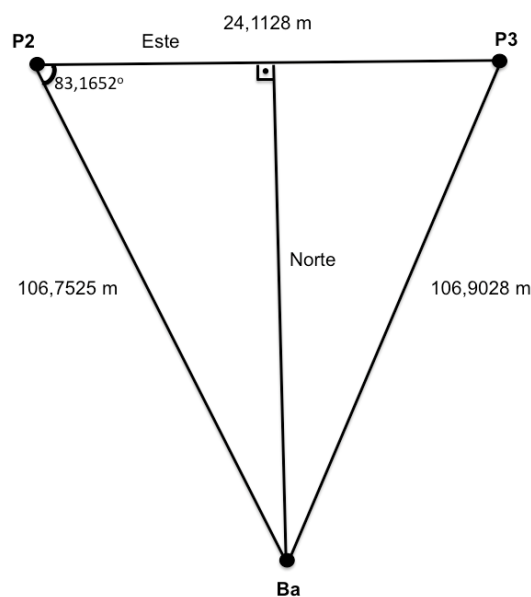


Figura 31: Triângulo retângulo para cálculo de coordenadas
Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizando o triângulo retângulo, calculou-se Norte e Este:

$$\text{Norte} = \text{sen}(83,1652) * 106,7525 = 105,9939\text{m} \quad (4.22)$$

$$\text{Este} = \text{cos}(83,1652) * 106,7525 = 12,7042\text{m} \quad (4.23)$$

Conhecendo a altura da bancada, e a distância em Norte e Leste do marco P2, pode-se chegar a coordenada da bancada apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Coordenadas da bancada de calibração de giroscópio

Norte	Este	Altitude
7185232,363	674112,8372	903,953

4.1.6 Apontado a bancada para o Norte

Após ter conhecimento das coordenadas dos três marcos, e principalmente da bancada, a próxima etapa é apontá-la no sentido Norte, paralelamente ao eixo de rotação da terra. Para isso, inicialmente serão criados um marco imaginário. Esse marco teria as mesmas coordenadas Norte e Altura que o marco P1, porém, a mesma coordenada Este da bancada, como pode ser visto na Figura 32:

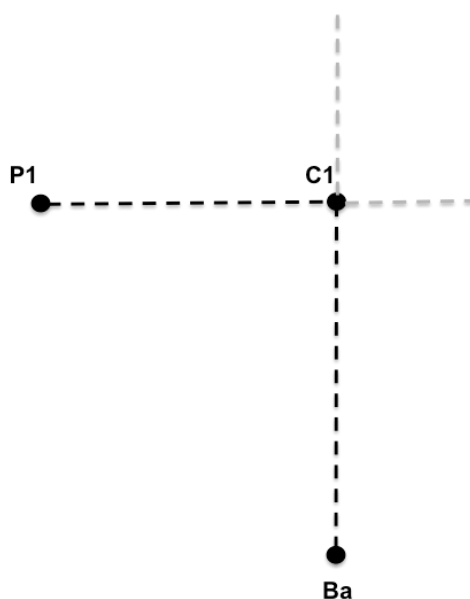


Figura 32: Localização do ponto C1
Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 6 pode-se ver as coordenadas do ponto C1:

Tabela 6: Coordenadas do ponto C1

Norte	Este	Altitude
7185343,838	674112,8372	923,112

Ao direcionar a bancada para este ponto, ela é direcionada no sentido Norte na altura do marco A1. Em seguida, cria-se outro marco imaginário que foi chamado de C2. Esse marco está localizado com as mesmas coordenadas Norte e Este que o ponto C1, porém a sua altura é igual a altura da bancada (Figura 33).

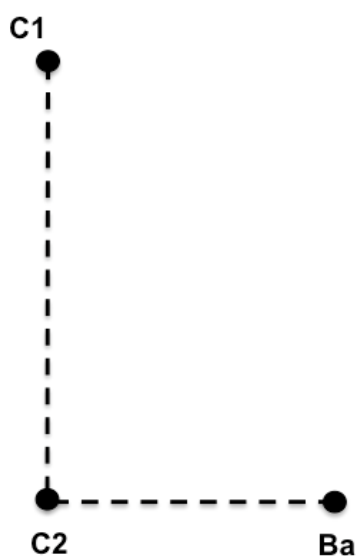


Figura 33: Localização do ponto C2
Fonte: Elaborado pelo autor

As coordenadas do ponto C2 estão apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7: Coordenadas do ponto C2

Norte	Este	Altitude
7185343,838	674112,8372	903,953

Ao direcionar a bancada para o ponto C2, ela ficará apontada para o Norte, porém ainda não está paralela ao eixo de rotação da Terra, pois como Curitiba está localizada no hemisfério Sul, e não em cima da linha do equador, é necessário considerar o ângulo entre a linha do equador e a localização da bancada. Esse ângulo pode ser encontrado convertendo as coordenadas UTM em coordenadas medidas em ângulos, para isso foi utilizado o programa disponibilizado pelo departamento de cartografia da Universidade Federal do Paraná, o software é

gratuito e pode ser obtido no site do departamento. O resultado obtido está apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Latitude e Longitude da bancada de calibração de giroscópio

Latitude	Longitude
25°26'22.6363'	49°16'7,1071"

Ao aplicar mais esse ângulo à bancada ela fica finalmente direcionada no sentido Norte paralelamente ao sentido de rotação da Terra.

4.2 ENSAIOS

Para os ensaios, um giroscópio óptico da empresa *Fizoptika*, modelo VG949PD foi usado. Este apresenta estabilidade de *Bias* de 0,005°/s, estabilidade de fator de escala de 0,01%, e densidade espectral de potência (ruído) de 0,002°/svHz.

4.2.1 Ensaio para Determinação de Erro de Bias e Desvio de Bias

Para a realização deste teste, o giroscópio será primeiramente fixado na bancada de calibração com o auxílio de um suporte projetado para este fim. Então o giroscópio teve seu eixo de sensibilidade posicionado paralelamente, como na Figura 24, ao eixo de rotação da Terra, seguindo o procedimento já descrito na seção 4.1.

Tendo o cenário de teste posicionado corretamente, serão feitas 4 medições com o sistema em repouso, com 24 horas de período durante o qual serão feitas leituras de velocidade angular a cada 20 segundos, totalizando assim 4320 medições por período de tempo. Importante ressaltar que 2 das medições serão feitas com o giroscópio na mesma posição, e mais 2 serão feitas com o eixo de

sensibilidade rotacionado em 180° para uma possível detecção de um erro de assimetria.

O sistema deverá retornar um valor de velocidade angular igual ao do planeta, que é previamente conhecido. Uma variação significativa na leitura do sinal de saída do giroscópio, conforme a resolução máxima do sensor a ser utilizado, quando subtraído ao valor de velocidade angular da Terra, representará um erro que pode ser caracterizado como Bias e sua variação ao longo do tempo como desvio de Bias.

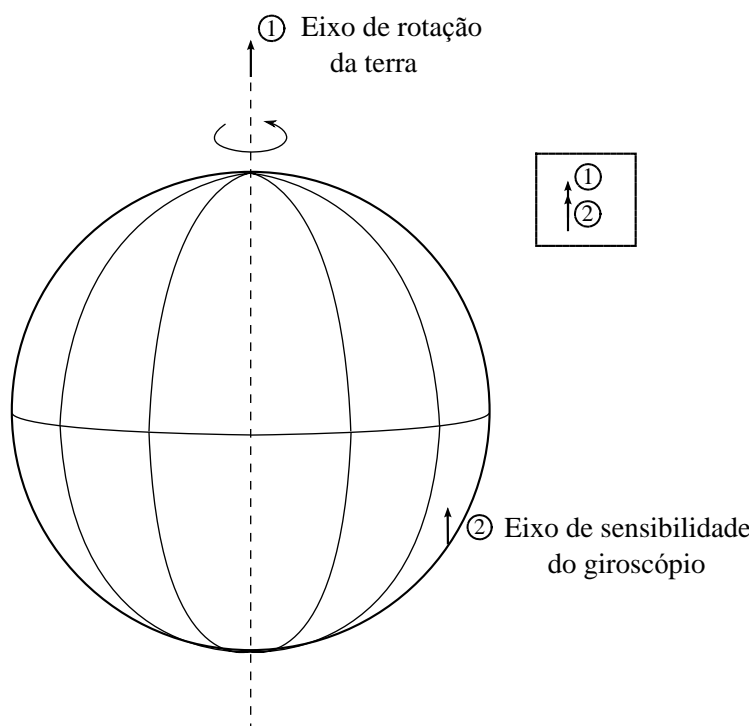


Figura 34: Eixo de Rotação da Terra X Eixo de Sensibilidade do Giroscópio paralelos

4.2.2 Ensaio para Confirmação do Erro de Bias, e Determinação do Ruído

Para este ensaio, a posição do eixo de sensibilidade do giroscópio com relação ao eixo de rotação da Terra, será alterada. Novamente será usada a metodologia descrita na seção 4.1 para o posicionamento, desta vez, do eixo do giroscópio perpendicular ao eixo do planeta. Assim o sinal de velocidade angular ideal esperado na saída do sensor seria nulo.

Considerando a possibilidade de o giroscópio não apresentar resolução esperada para medir a rotação da Terra, o sinal a ser obtido com o giroscópio em repouso pode ser inconsistente, ou seja, não apresentar dados suficientes para análise. Assim, para este ensaio serão aplicados valores de velocidade relativa à do planeta com o intuito da melhoria das futuras análises.

Os valores de velocidade a serem aplicados ao giroscópio foram de 10, 100, 500, 1000, 5000, e 10000 vezes a velocidade de rotação da Terra, desta forma é possível analisar os erros de *Bias* e o ruído presente em melhores condições.

As medições foram feitas em períodos de 6 minutos, com uma leitura da velocidade angular por segundo, totalizando 360 leituras por período. Para cada valor de velocidade aplicado, 2 períodos de medição serão feitos, sendo um em sentido horário, e outro em sentido anti-horário.

Após a aquisição de dados, tanto erros de *Bias* como ruídos poderão ser detectados. Por possuírem características diferentes, como descrito anteriormente, os erros aqui considerados poderão ser calculados separadamente.

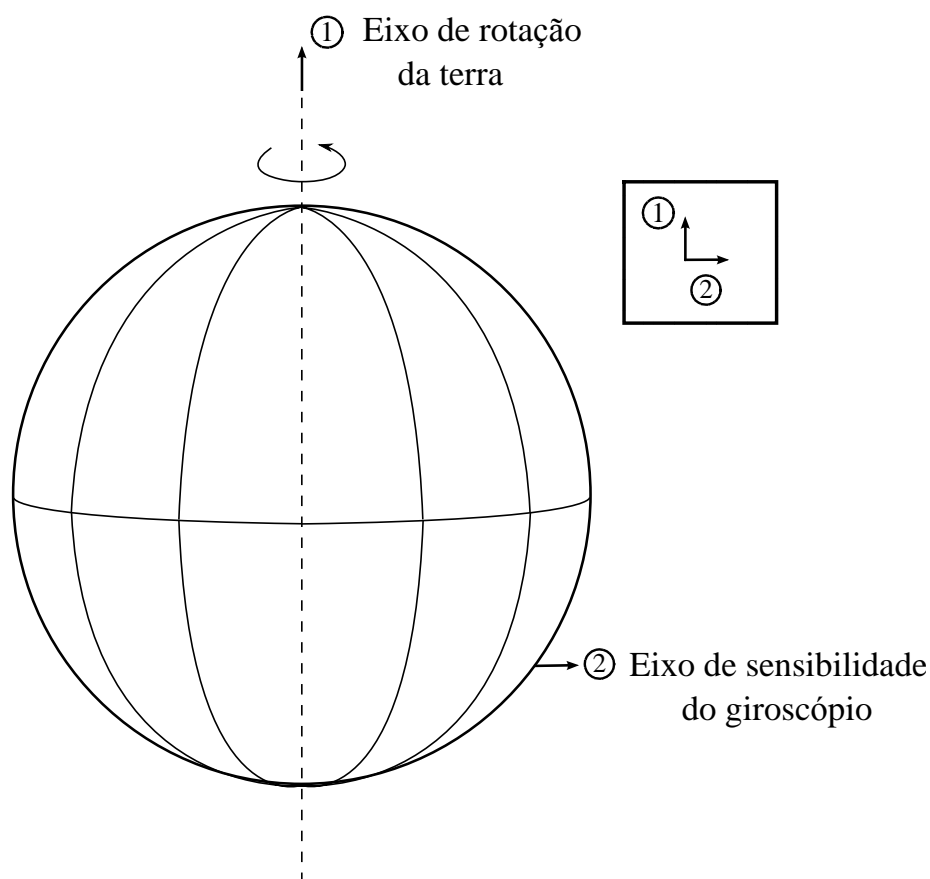


Figura 35: Eixo de Rotação da Terra X Eixo de Sensibilidade do Giroscópio perpendiculares

A determinação do ruído será realizada através da medição da densidade espectral de potencia do sinal obtido, dada em $^{\circ}/\text{min}/\sqrt{\text{Hz}}$ assim como pelo seu valor de pico em $^{\circ}/\text{s}$. O valor de Bias (já conhecido) é desconsiderado nesta análise.

Como já descrito anteriormente, o erro do tipo *Random Walk* pode ser obtido pela integração do ruído do sinal adquirido nestes ensaios, no momento em que o deslocamento angular é aplicado.

4.2.3 Ensaio para Determinação do Fator de Escala

Após os ensaios para determinação de erros de *Bias* e ruído, foram feitas 12 medições em diferentes velocidades. Com estas, primeiramente será calculado a média aritmética dos valores medidos, e então estes serão plotados em um gráfico relacionando os valores de velocidade medidos e aplicados, e assim conforme descrito na seção 2.2.6.2 será possível analisar o fator de escala.

Este ensaio tem o intuito de identificar desvios no fator de escala dado pelo fabricante, e é um dos mais importantes num processo de calibração.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Todos os ensaios foram realizados seguindo a metodologia descrita neste trabalho, e as análises foram feitas com ajuda de recursos como os *softwares Matlab e Labview*, além de métodos matemáticos necessários a serem comentados durante esta seção.

É de grande importância também neste momento, ressaltar o objetivo deste trabalho, o desenvolvimento de uma metodologia para calibração de giroscópios com o uso da bancada, sendo assim, é considerado que a bancada fornece valores confiáveis e que a mesma já se encontra calibrada.

5.1 RESULTADOS DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DE ERRO DE *BIAS* E DESVIO DE *BIAS*

Primeiramente a bancada de calibração foi posicionada para o ensaio como pode ser visto na Figura 36.



Figura 36: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio em paralelo ao eixo de rotação do planeta

Nesta posição, com o eixo de sensibilidade do giroscópio paralelo ao eixo de rotação da Terra, foram coletados 2 períodos de 24 horas de dados de leitura de velocidade angular, logo a seguir, o eixo da bancada que se encontra paralelo ao eixo do giroscópio foi rotacionado em 180° como pode ser visto abaixo na Figura 37.



Figura 37: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio em paralelo ao eixo de rotação do planeta e rotacionado em 180 graus

Desta forma foram coletados mais 2 períodos de 24 horas de dados.

Os dados do primeiro ensaio podem ser vistos abaixo na Figura 38, estes são apresentados na forma de um gráfico obtido com o auxílio do Matlab.

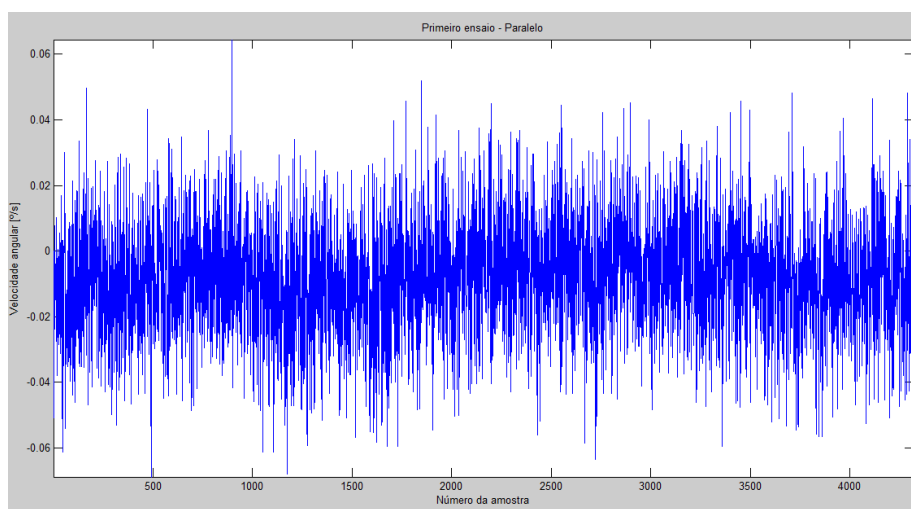


Figura 38: Dados do primeiro ensaio em paralelo

Todas as outras 3 medições possuem aparência muito parecida com esta mostrada na Figura 38, em primeira impressão o que se percebeu foi um grande nível de ruído comparado ao sinal a ser medido. Em outras palavras, o ruído presente neste ensaio supera o valor de velocidade de rotação do planeta. O que parece acontecer é a medição de nenhuma velocidade angular, e sim de apenas um ruído.

Porém para melhor análise dos ensaios, um método de interpolação destes pontos foi aplicado com a intenção de verificar a possível existência de um sinal de velocidade angular. O método usado é o dos mínimos quadrados com grau 1, onde a partir dos pontos medidos retira-se uma equação de reta, para este caso em

específico, e com esta os pontos de medições foram interpolados a fim de obter um sinal mais próximo do esperado. A Figura 39 abaixo apresenta esta interpolação, é importante ressaltar que os valores originais do ensaio são representados agora por marcações discretas no gráfico, e o sinal que se encontra próximo ao eixo horizontal é a interpolação gerada também com recursos do Matlab.

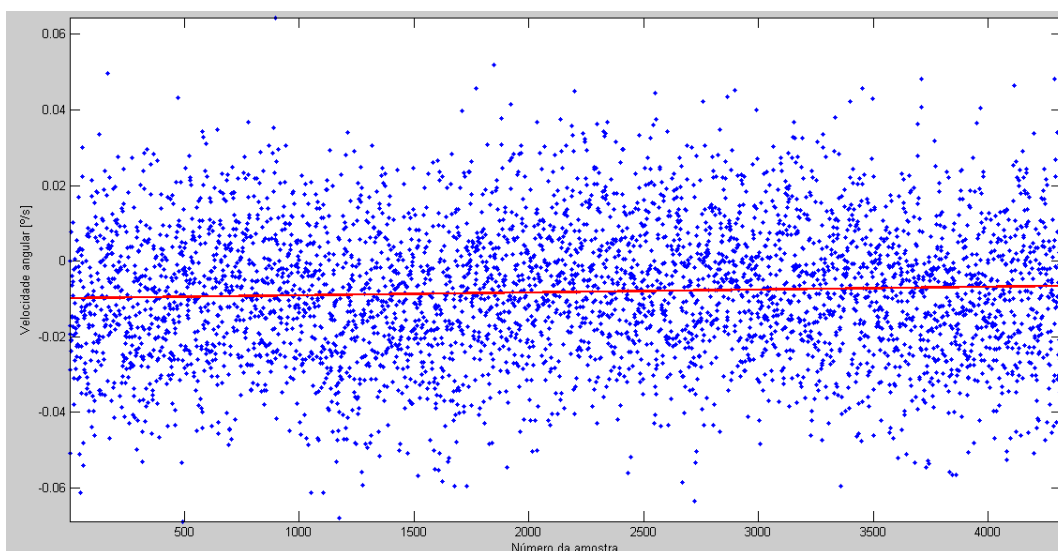


Figura 39: Interpolação por mínimos quadrados grau 1 do primeiro ensaio paralelo

O sinal de interpolação encontrado se aproxima do valor de velocidade de rotação do planeta em módulo, neste momento é possível uma interpretação de que o sinal requerido possa estar presente somado a um erro de *Bias*. Foi decidido então seguir com uma análise mais criteriosa, portanto foram medidas as médias dos valores de interpolação dos 4 ensaios, a serem representadas respectivamente por M1, M2, M3 e M4:

$$\text{Velocidade de rotação da Terra} = 0,004166 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$M1 = -0,008192 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$M2 = -0,006646 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$M3 = -0,006377 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

$$M4 = -0,009787 \text{ } ^\circ/\text{s}$$

Levando em consideração os valores das médias obtidas com o auxílio do *Matlab*, ficou claro a distância desses valores com o valor do sinal esperado, porém foi decidido continuar com uma outra análise desta vez observando a estabilidade de

Bias, ou desvio de *Bias*, dado pelo fabricante do giroscópio que também pode ser feita.

O desvio de *Bias* dado pelo fabricante é de 0,005 °/s, e como se observa através da Figura 29 um crescimento contínuo do valor interpolado, uma comparação entre esta taxa de crescimento e a dada pelo fabricante poderia comprovar a existência de um sinal real.

Uma ampliação desta curva de interpolação pode ser observada na Figura 40 com o intuito da melhor observação deste crescimento.

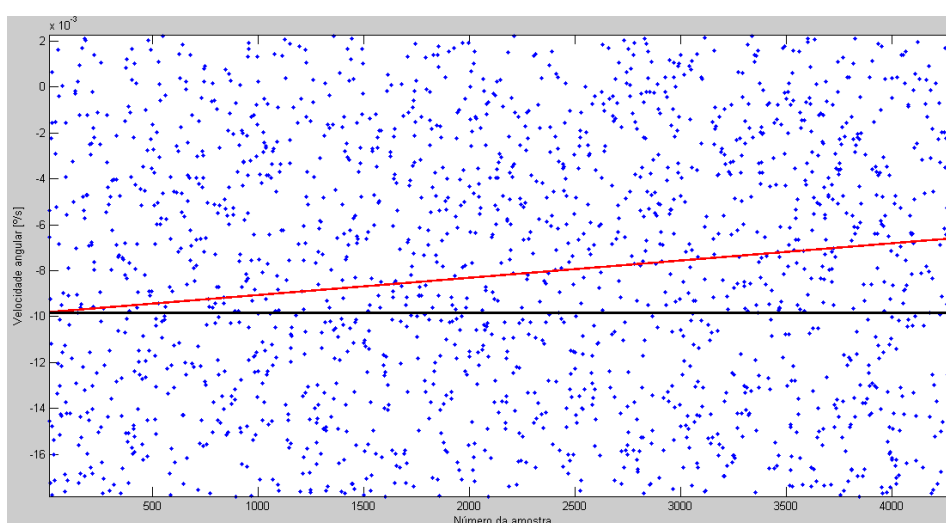


Figura 40: Ampliação da curva de interpolação da Figura 29

A linha reta traçada logo abaixo da curva de interpolação mostra claramente que existe uma taxa de crescimento.

É calculado agora a taxa de crescimento da curva para termos de comparação com o valor fornecido pelo fabricante do giroscópio. Este valor é obtido através da subtração entre o primeiro valor da curva e o último, ambos em módulo.

$$\text{Taxa de crescimento} = 0,003244^\circ / 86400s$$

$$\text{Taxa de crescimento} = 3,755291 \times 10^{-8} \text{ }^\circ / s$$

Como a taxa de crescimento da curva de interpolação do primeiro ensaio, assim como a dos outros ensaios, é muito menor que a taxa fornecida pelo fabricante, e somado com as análises anteriormente feitas, é possível que os dados sejam inconsistentes e que a medição de velocidade angular da Terra não esteja contida nas medições. Portanto a análise para determinação do erro de *Bias* e

desvio de *Bias* neste ensaio não traria valores confiáveis para o objetivo deste trabalho que é a calibração do giroscópio.

5.2 RESULTADOS DO ENSAIO PARA CONFIRMAÇÃO DO ERRO DE *BIAS*, E DETERMINAÇÃO DO RUÍDO

Neste ensaio, a posição da bancada foi ajustada para que o eixo de sensibilidade do giroscópio ficasse perpendicular ao eixo de rotação da Terra como pode ser visto na Figura 41.

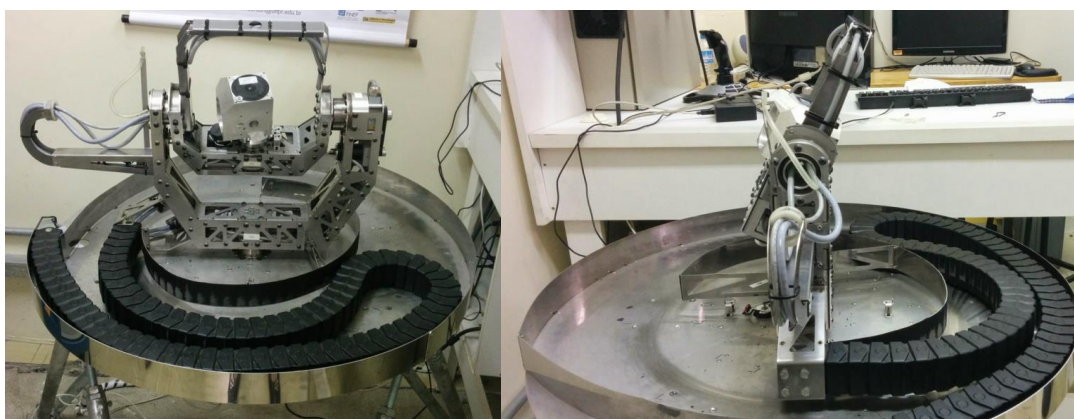


Figura 41: Bancada de calibração posicionada para ensaio com giroscópio perpendicular ao eixo de rotação do planeta

Após o posicionamento correto da bancada, as medições nas diferentes velocidades foram feitas com o auxílio do software *Labview*, os ensaios foram feitos em períodos de 6 minutos. Considerando que a bancada possui uma curva de aceleração até que a velocidade de regime seja atingida, foi decidido que para os cálculos a serem aqui apresentados, tanto o primeiro quanto o último minuto de medição serão excluídos, os períodos reduzem então de 6 minutos para 4 minutos, porém contendo apenas os dados fora dessas faixas de aceleração e desaceleração da bancada.

A Tabela 9 mostra os valores de velocidade angular obtidos com os ensaios, os valores medidos foram calculados através de uma média aritmética da curva de interpolação de cada ensaio, assim como já comentado na seção anterior.

Tabela 9: Valores obtidos pelos ensaios

	Valor de velocidade aplicado [°/s]	Valor de velocidade medido [°/s] ensaio em sentido horário	Valor de velocidade medido [°/s] ensaio em sentido anti-horário
1x Velocidade de rotação da Terra	0,004166 (não aplicado)	xxxxxxx	xxxxxxx
10x Velocidade de rotação da Terra	0,041666	0,035670	0,037285
100x Velocidade de rotação da Terra	0,416666	0,405247	0,408700
500x Velocidade de rotação da Terra	2,083333	2,051375	2,056901
1000x Velocidade de rotação da Terra	4,166666	4,093835	4,104997
5000x Velocidade de rotação da Terra	20,833333	20,488939	20,483427
10000x Velocidade de rotação da Terra	41,666666	39,341891	39,328825

Os valores medidos se aproximam com clareza dos valores requeridos, constatando a existência do sinal nos valores obtidos pelos ensaios.

Começando uma análise do erro de *Bias* presente nas medições, a Tabela 10 e a Tabela 11 ilustram em porcentagem o quanto cada valor medido se distancia do valor aplicado para cada sentido de rotação adotado no ensaio.

Tabela 10: Erro de Bias para ensaio em sentido horário

Valor de velocidade aplicado [°/s]	Valor de velocidade medido [°/s] ensaio em sentido horário	Erro de <i>Bias</i> [%]
0,004166 (não aplicado)	xxxxxxx	xxxxxxx
0,041666	0,035670	14,390630
0,416666	0,405247	2,740564
2,083333	2,051375	1,533984
4,166666	4,093835	1,747944
20,833333	20,488939	1,653091
41,666666	39,341891	5,579460

Tabela 11: Erro de Bias para ensaio em sentido anti-horário

Valor de velocidade aplicado [°/s]	Valor de velocidade medido [°/s] ensaio em sentido anti-horário	Erro de <i>Bias</i> [%]
0,004166 (não aplicado)	xxxxxxx	xxxxxxx
0,041666	0,037285	10,514568
0,416666	0,408700	1,911843
2,083333	2,056901	1,268736
4,166666	4,104997	1,480056
20,833333	20,483427	1,679549
41,666666	39,328825	5,610818

É perceptível o aparecimento de um padrão de erro de *Bias* em uma certa faixa de valores como pode ser visto nas tabelas. Dos valores de medição aplicados de 500 vezes até 5000 vezes o valor de rotação do planeta, a correção do erro de *Bias* se encontra em torno de uma média de 1,56% para ambos os sentidos adotados em cada ensaio. Para valores acima ou abaixo desta faixa, o valor do erro aumenta e um ajuste específico teria de ser levado em consideração.

Uma solução muito usada, principalmente na área automotiva, para calibração, é o uso de mapas de calibração. Em situações como a presente onde não se encontram padrões para toda a faixa de medição, um mapa pode ser implementado no software de aquisição de dados do sensor para ajustar o erro de *Bias* conforme a faixa de valores detectada, embora de complexidade um pouco maior, é ideal para situações onde o sinal requerido nem sempre é conhecido.

Com o intuito de otimizar a medição com o uso do giroscópio em estudo, um mapa de correção de erro de *Bias* pode ser implementado via *software*. A Tabela 12 sugere a solução segundo análises feitas nesta seção.

Tabela 12: Mapa de correção de Bias

Mapa de correção de <i>Bias</i>	
Valores entre 10 e 100x a rotação da Terra	Correção de offset para 12,45% do valor
Valores entre 100 e 500x a rotação da Terra	Correção de offset para 2,32% do valor
Valores entre 500 e 10000x a rotação da Terra	Correção de offset para 1,56% do valor
Valores a partir de 10000x a rotação da Terra	Correção de offset para 5,59% do valor

Os valores de correção foram obtidos através do cálculo das médias dos erros dos ensaios nos dois sentidos.

Uma vez determinados os erros de *Bias*, prossegue-se agora para a análise do desvio deste mesmo erro, de maneira similar à mostrada na seção anterior, o desvio de *Bias* foi calculado para cada valor de velocidade angular. Tomando como exemplo a última medição, com velocidade angular aplicada de 10000 vezes a velocidade de rotação da Terra, o método adotado para o cálculo do desvio de *Bias* é apresentado. A Figura 42 mostra esta medição na forma de pontos discretos, e a curva de interpolação por mínimos quadrados de grau 1.

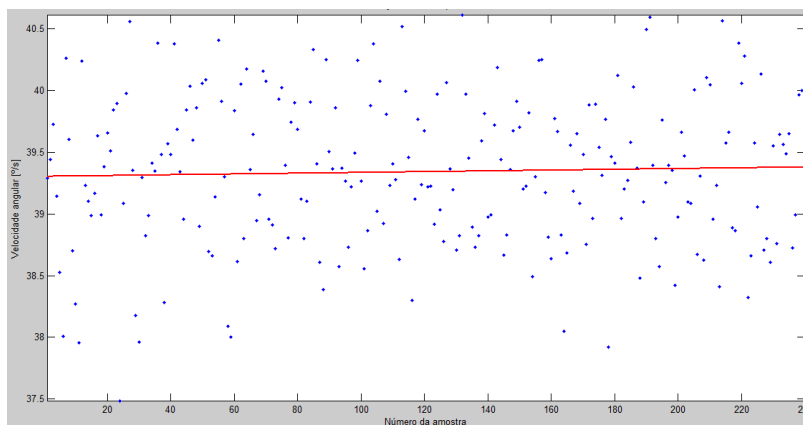


Figura 42: Dados do ensaio com 10000x a rotação da Terra

A curva de interpolação dos dados obtidos contém o nível DC presente na medição, portanto é uma soma do valor real de medição e um erro de *Bias*. Esta curva é notavelmente crescente em todos os ensaios feitos, mostrando assim a existência de uma taxa de crescimento relativa ao tempo, que é caracterizada como nada menos que o desvio de *Bias*, ou estabilidade de *Bias* como apresentado pela maioria dos fabricantes. Tomando nota do primeiro valor desta curva, e subtraindo do último, resulta num valor em graus por segundo que representa a variação durante o período de medição, 240 segundos, então a variação é dividida pelo período de tempo resultando no valor requerido de desvio de *Bias*.

A Tabela 13 ilustra os resultados para o desvio em todas as velocidades aplicadas para o ensaio.

Tabela 13: Desvios de *Bias* calculados

Ensaio	Desvio de <i>Bias</i> [°/s]
1x Velocidade de rotação da Terra	xxxxxxxxxxxx
10x Velocidade de rotação da Terra	0,000024
100x Velocidade de rotação da Terra	0,000036
500x Velocidade de rotação da Terra	0,000061
1000x Velocidade de rotação da Terra	0,000144
5000x Velocidade de rotação da Terra	0,000380
10000x Velocidade de rotação da Terra	0,003132

Os valores obtidos para o desvio de *Bias* apesar de crescentes, não ultrapassam o valor estipulado pelo fabricante na faixa de medição definida para o ensaio, portanto não se faz necessário a calibração para correção deste erro. Em um outro cenário com diferentes condições, esta metodologia poderia ser aplicada para possível correção do desvio de *Bias*.

Como última etapa de análises desta seção, o ruído presente nas medições será avaliado.

Para a determinação do ruído, o valor DC respectivo a cada valor de velocidade aplicado foi subtraído de cada medição com a intenção de se obter somente um sinal ruidoso livre do sinal real e do erro de *Bias*. Primeiramente este passo foi implementado com o auxílio do *software Matlab*, e em seguida este sinal ruidoso é importado para o *Labview*, onde é transformado em forma de onda a partir dos dados fornecidos e então com o auxílio de uma função pronta do *software*, a densidade espectral de potência foi obtida. As figuras Figura 43: Ruído presente nos ensaios de 10 e 100x, Figura 44: Ruído presente nos ensaios de 500 e 1000x e Figura 45: Ruído presente nos ensaios de 5000 e 10000x mostram os ruídos presentes nos ensaios.

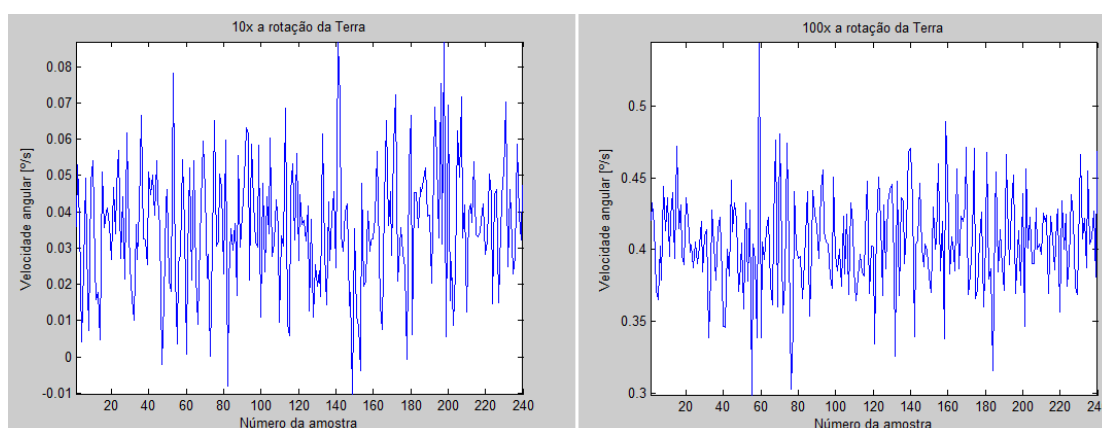


Figura 43: Ruído presente nos ensaios de 10 e 100x

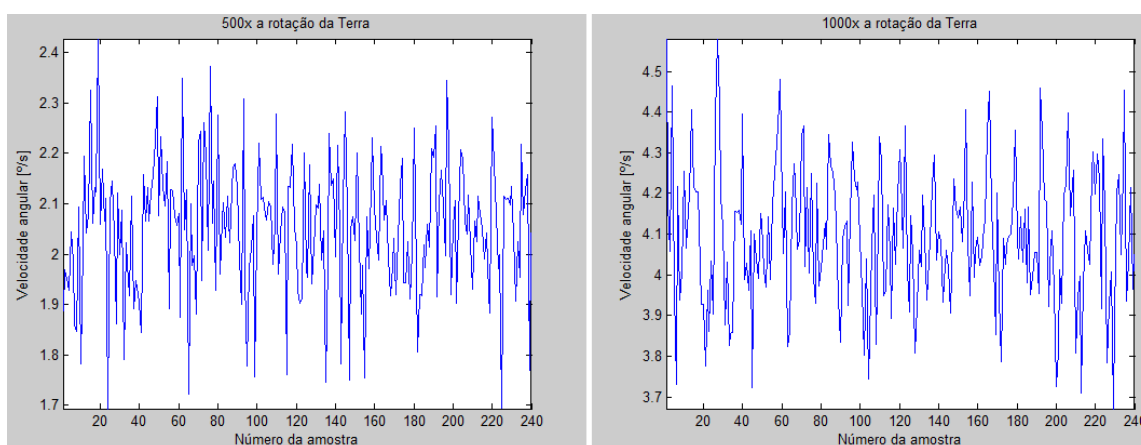


Figura 44: Ruído presente nos ensaios de 500 e 1000x

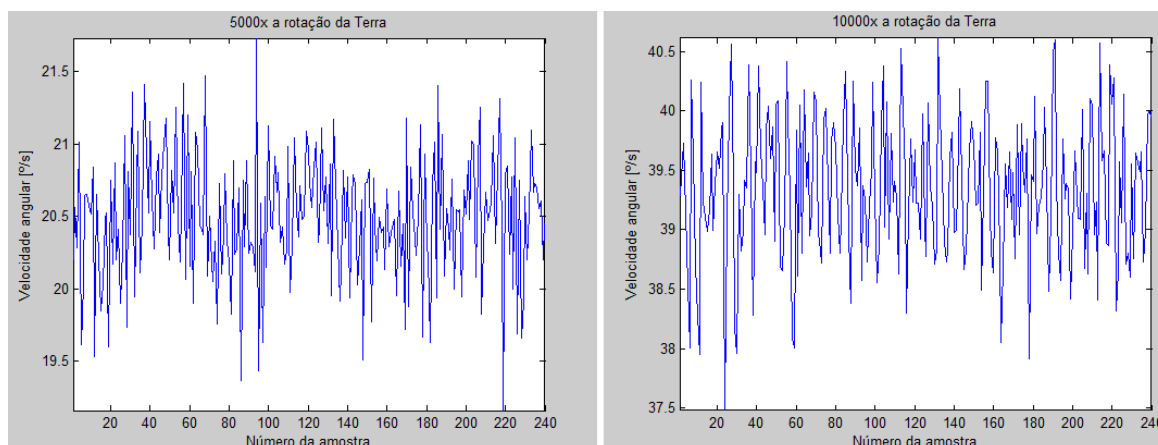


Figura 45: Ruído presente nos ensaios de 5000 e 10000x

Depois de classificados, os valores de densidade espectral de potência podem ser vistos pela Tabela 14.

Tabela 14: Valores da densidade espectral de potência

Ensaio	Nível de ruído (PSD) [°/s √Hz]
1x Velocidade de rotação da Terra	XXXXXXXXXXXX
10x Velocidade de rotação da Terra	0,017710
100x Velocidade de rotação da Terra	0,034550
500x Velocidade de rotação da Terra	0,130830
1000x Velocidade de rotação da Terra	0,167250
5000x Velocidade de rotação da Terra	0,435510
10000x Velocidade de rotação da Terra	0,604620

Os valores medidos para determinação do ruído se apresentam maiores que o valor fornecido pelo fabricante de 0,002°/s√Hz, porém esses valores também contém um erro do tipo *random walk* que aparecem pela aplicação de deslocamento angular no sensor, e nada mais são do que o próprio ruído integrado em relação ao tempo de medição conforme o deslocamento angular aplicado.

Existem vários métodos para se calcular o *random walk*, uma vez medidos os valores, cabe uma avaliação do cenário em que o giroscópio será usado e então a definição do melhor método para a calibração.

5.3 RESULTADOS DO ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ESCALA

Os dados necessários para este ensaio são os mesmo já descritos no ensaio da seção anterior, os ensaios em períodos de 6 minutos com diferentes valores de velocidade aplicado serão novamente usados para determinação do fator de escala, porém sob uma nova abordagem.

Como pode ser visto na Figura 13, o erro de fator de escala é a diferença de inclinação entre o sinal medido e o estímulo de entrada. Para isso, foram calculadas as médias dos sinais obtidos no ensaio anterior a fim de comparar através de um gráfico, os valores aplicados com os valores medidos. A Tabela 15 ilustra os valores aplicados e os valores medidos segundo critério agora de médias. Os valores das médias dos ensaios com sentido anti-horário também foram levados em conta.

Tabela 15: Média dos sinais dos ensaios

Ensaio	Valor de velocidade aplicado [°/s]	Média do sinal [°/s]
1x Velocidade de rotação da Terra	0,004166 (não aplicado)	xxxxxxxx
10x Velocidade de rotação da Terra	0,041666	0,040987
100x Velocidade de rotação da Terra	0,416666	0,411259
500x Velocidade de rotação da Terra	2,083333	2,054138
1000x Velocidade de rotação da Terra	4,166666	4,099416
5000x Velocidade de rotação da Terra	20,833333	20,486183
10000x Velocidade de rotação da Terra	41,666666	39,335358

Com base nestes dados, o gráfico relacionando as variáveis foi obtido com auxílio do *Matlab* e pode ser visto na Figura 46. Levando em consideração o espaçamento linear entre os valores de velocidade angular, foi considerado mais apropriado para uma primeira análise a adoção de escala logarítmica.

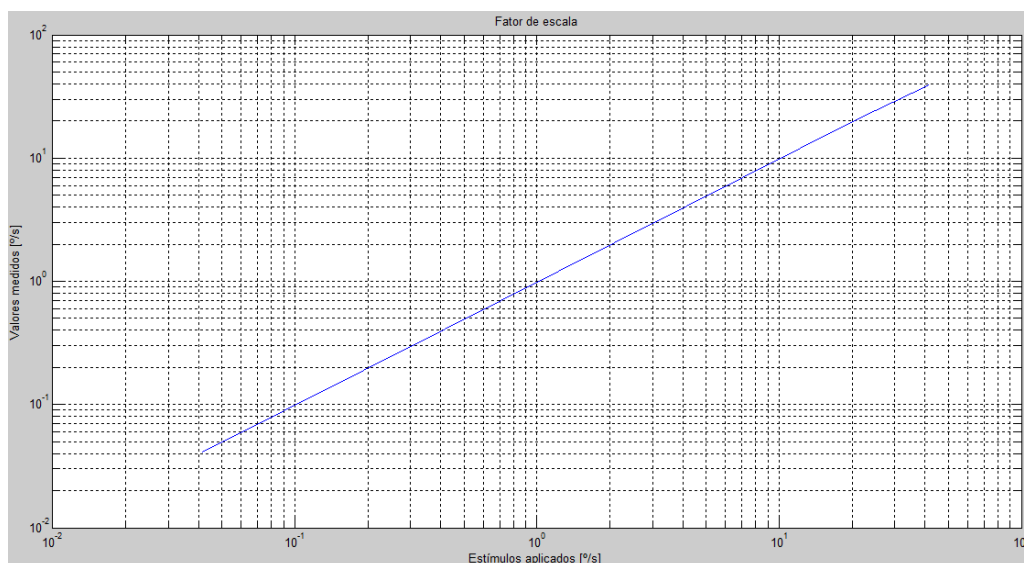


Figura 46: Estímulos aplicados X Valores medidos

É perceptível a aproximação com uma forma de reta, o que aproxima a análise para um valor ideal, porém é necessário fazer uma interpolação por mínimos quadrados para se obter com maior grau de confiabilidade, uma reta. A Figura 47 então ilustra, agora em escala linear, os pontos dos valores das médias e a reta de interpolação por mínimos quadrados.

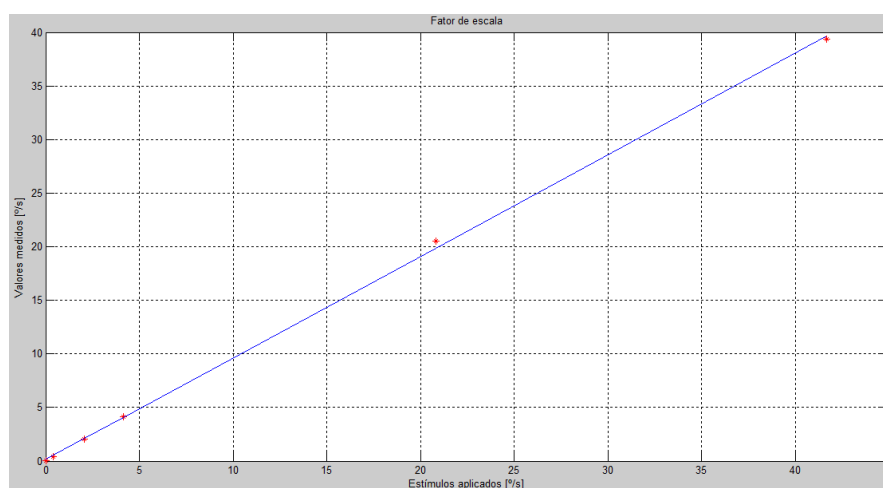


Figura 47: Estímulos aplicados X Valores medidos - Escala linear

Uma reta ideal para termos de determinação do fator de escala, deve possuir uma inclinação de 45° , qualquer diferença nesta inclinação indica um erro. Usando o recurso de *software* disponível, o valor da inclinação desta reta é calculado. A Figura 48 mostra a inclinação calculada através de relações trigonométricas implementadas no *Matlab*.

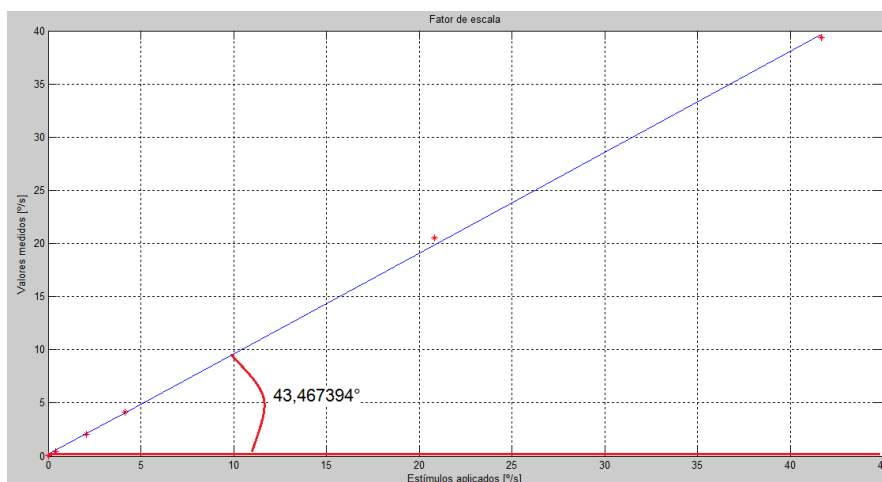


Figura 48: Inclinação da reta de interpolação

O erro de fator de escala pode agora ser calculado através da diferença de inclinação entre a reta interpolada e a reta ideal.

$$\text{Erro de fator de escala} = \text{Inclinação ideal} - \text{Inclinação real}$$

$$\text{Erro de fator de escala} = 45^\circ - 43,467392^\circ = 1,532609^\circ$$

O erro de fator de escala determinado implica em uma correção no mesmo para compor a metodologia de calibração proposta. Quando comparado com o valor de estabilidade de fator de escala fornecido pelo fabricante de 0,01%, este implica em um desvio de apenas 0,0045°, portanto um ajuste no *software* de aquisição de dados é necessário para correção do erro.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos realizados a respeito de giroscópios, a compreensão de suas características e das variadas formas de funcionamento para determinação de deslocamento angular foram esclarecidas. Foram apresentadas diversas informações sobre a bancada de calibração, detalhes do projeto, aspectos construtivos, funcionamento, informações sobre seu desempenho, e então para conclusão de um referencial teórico, foi apresentada a interface usuário-bancada.

Inicialmente foi feito o georreferenciamento da bancada. A partir de três marcos georreferenciados, e do conhecimento da altura do solo da UTFPR, foram utilizados algumas operações matemáticas para encontrar as coordenadas da bancada e em seguida apontar a bancada para o Norte da Terra. Após o conhecimento da localização da bancada, prosseguiu-se para as práticas.

Os resultados obtidos no primeiro ensaio para determinação de erro de *Bias* e desvio de *Bias* não foram satisfatórios para o objetivo do trabalho. Apesar de seguido com vigor a metodologia proposta para obtenção dos dados, o giroscópio não apresentou resolução suficiente para medir a velocidade de rotação da Terra e apresentou um nível de ruído maior que o esperado. Para melhores conclusões da metodologia aplicada a este ensaio, seria necessário a aquisição de outro giroscópio de melhor qualidade, e então a repetição do mesmo.

Seguindo para o ensaio de confirmação de erro de *Bias* e determinação de ruído, os resultados foram plausíveis com o esperado. O erro e o desvio de *Bias* foram determinados possibilitando assim um ajuste via calibração para melhor aproveitamento do instrumento de medição. Os valores de ruído se apresentaram maiores que o dado pelo fabricante, este fato se deve à presença de um ruído provavelmente do tipo multiplicativo. Para melhor correção, uma análise mais aprofundada do cenário em que o giroscópio esta sendo usado teria de ser feita, dessa maneira a melhor aplicação de correção poderia ser usada. A metodologia proposta para a determinação de ruídos foi testada e trouxe resultados coerentes, porém somente depois de uma aplicação comprovada é que seria possível a avaliação do método utilizado.

O ensaio para determinação do fator de escala foi realizado satisfatoriamente para compor uma metodologia de calibração, porém mais uma vez só será possível a avaliação deste método após uma comprovação, em uma aplicação real, dos resultados.

De maneira geral, foi concluído que o desenvolvimento da metodologia de calibração de giroscópios com o uso da bancada foi feito conforme a teoria estudada e trouxe resultados próximos do esperado. Com esses resultados a principal intenção foi de testar a metodologia proposta, porém é importante ressaltar que ela não foi totalmente comprovada, é um início de um estudo envolvendo a necessidade de outros trabalhos em continuidade.

Como sugestão para futuros trabalhos, a continuação deste com o intuito de melhoria da metodologia e comprovação da mesma, assim como o rastreamento da bancada, seria de grande valia para futuras utilizações da plataforma de calibração de giroscópios.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, P. et al. **MEMS-Based Integrated Navigation**; Artec House. Boston, USA, 2010.

BARRIENTOS, Antonio et al. **Fundamentos de Robótica**. 1. ed. Madri: McGraw-Hill, 1997.

CRAIG, John J. **Introduction to Robotics: mechanisms and control**. 2. ed. Massachussetts: Addison-Wesley, 1989.

E. DOS SANTOS, Winderson, et al. **Sistema de Reconstrução de trajetórias de PIG's baseado em medidas GPS/GIROSCÓPIOS/ODÔMETROS**. Disponível em:

<http://labplan.ufsc.br/congressos/CBA2008/textos/CBA_2008_Artigos/39018.pdf> .
Acessoem: 06 dez. 2013

GREWAL, M. S. et al. **Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration**. 2^a Ed., Canada, Wiley-Interscience, 2007.

KHATIB, Oussama; SICILIANO, Bruno. **Springer Handbook of Robotics**. Berlim: Springer, 2008.

O giroscópio. Disponível em:
<http://topazio1950.blogs.sapo.pt/189122.html>Acesso em: 06 dez. 2013

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Numerical Methods for Engineers**. 5^a Ed., USA, Mc Graw Hill, 2006.

SANTOS, Winderson Eugenio. **Sistema para identificação da curvatura na junta prismática de um robô via quaternions**. 2003. 172f. Tese (Doutorado) –

Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SANTOS, Winderson Eugênio dos, et al. **Bancada para Calibração de Giroscópio**. Sbein 2010.

SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth; VIDYASAGAR, M. **Robot Modelind and Control**.1. Ed. Nova Iorque: Wiley, 2005.

TOBIN, W. **The Life and Science of Léon Foucault**. Cambridge University Press, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Referencial e matriz de rotação

O referencial é uma entidade que consiste de um ponto de origem O_i e três vetores unitários ortogonais entre si: x_i , y_i , z_i . Ele é atrelado ao objeto de deslocando junto ao objeto em questão.

Dois referenciais são essenciais para descrever a posição e orientação (postura) de um objeto no espaço: um sempre se fixa rigidamente ao objeto”(CRAIG, 1989, p.5, tradução dos autores); então a postura do objeto no espaço se dá em relação a outro objeto, que contem outro referencial. Logo, a postura do objeto nada mais é do que a relação de um referencial em relação a outro.

Além dos diversos referenciais de cada objeto, é também definido um referencial universal, ao qual é possível referenciar qualquer objeto. Isto é, cada objeto pode ser referenciado de duas maneiras:

- A partir de um referencial próprio,
- Ou do referencial universal.

A Figura 49 representa um referencial universal posicionado junto a um objeto, e um referencial a posicionado no ponto Pa do objeto.

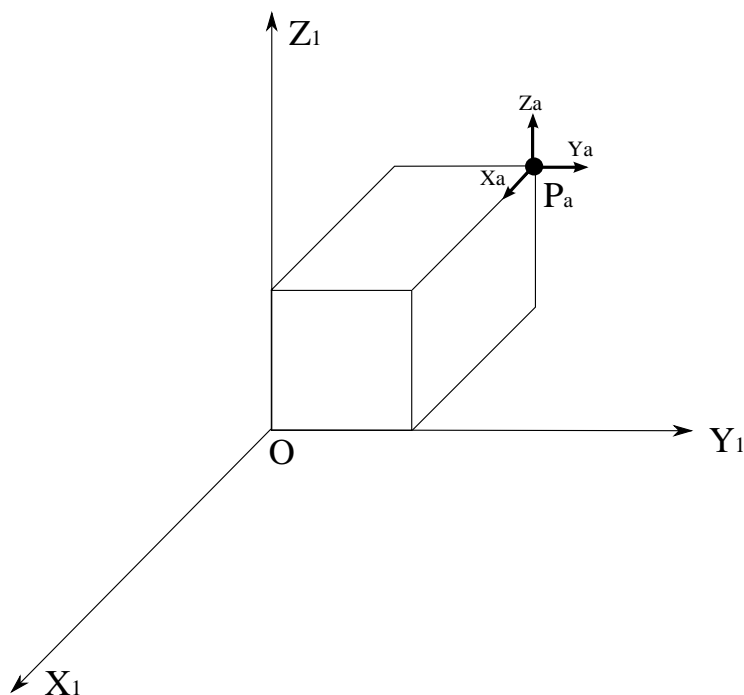


Figura 49: Sistema de coordenadas com objeto
Fonte: SPONG, ANO, modificado pelo autor

Analisando a Figura 49, é verificada a possibilidade de escrever o ponto P_a em relação à origem O_0 como:

$${}^0P_a = \begin{bmatrix} {}^0P_x^a \\ {}^0P_y^a \\ {}^0P_z^a \end{bmatrix} \quad (\text{A. 1})$$

Cada componente, ${}^0P_x^a$, ${}^0P_y^a$, ${}^0P_z^a$ representa um vetor posição do referencial a em relação ao referencial de origem O .

É necessário também, para definição da postura, considerar a orientação dos referenciais. A orientação de um referencial em relação ao outro pode ser descrita utilizando os seguintes vetores unitários: (x_a, y_a, z_a) para o referencial a e (x_0, y_0, z_0) para a origem. A partir deles obtemos os vetores: $({}^0x_a, {}^0y_a, {}^0z_a)$.

A partir desses vetores é formada a matriz de rotação 0R_a . A matriz de rotação tem a seguinte forma:

$${}^0R_a = \begin{bmatrix} x_a \cdot x_0 & y_a \cdot x_0 & z_a \cdot x_0 \\ x_a \cdot y_0 & y_a \cdot y_0 & z_a \cdot y_0 \\ x_a \cdot z_0 & y_a \cdot z_0 & z_a \cdot z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (\text{A. 2})$$

Segundo Khatib e Siciliano (2008) trata de uma matriz de nove elemento, mas que necessita de apenas três parâmetros para que seja formada.

A partir da matriz de rotação do referencial a em relação ao referencial de origem R_o , é possível calcular a matriz de rotação do referencial de origem, em relação ao referencial a , para tal, é necessário simplesmente calcular a matriz inversa, ou seja:

$${}^aR_o = {}^oR_a^{-1} \quad (\text{A. 3})$$

Porém como a matriz de rotação é uma matriz unitária pode-se obter sua inversa a partir da transposta:

$${}^oR_a^{-1} = {}^oR_a^T \quad (\text{A. 4})$$

MATRIZ DE TRANSFORMAÇÃO HOMOGÊNEA

Após apresentar o referencial e a matriz de rotação na seção anterior, será apresentada agora a matriz de transformação homogênea. Ela é uma representação “compacta - embora computacionalmente ineficiente” (BARRIENTOS et al., 1997, p. 14, tradução dos autores).

A Figura 27 representa um objeto S para o qual, um referencial $\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1, \mathbf{z}_1, O_1$ fixado na origem. Conhecendo as coordenadas de um ponto p em relação a um referencial $\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1, \mathbf{z}_1$, localizado no ponto O_1 , é utilizada a matriz de transformação homogênea para calcular a coordenada do mesmo ponto p em relação a outro referencial $\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2, \mathbf{z}_2$, localizado no ponto O_2 . A equação que descreve essa transformação é a seguinte:

$${}^1r = {}^1R_2{}^2r + {}^1p_2 \quad (\text{A. 5})$$

que pode ser expandida e escrita da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} {}^1r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1R_2 & {}^1p_2 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^1r \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 6})$$

sendo

$$\begin{bmatrix} {}^1R_2 & {}^1p_2 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = {}^1T_2 \quad (\text{A. 7})$$

onde 1T_2 é a matriz de transformação homogênea entre os vetores posição 1r e 2r .

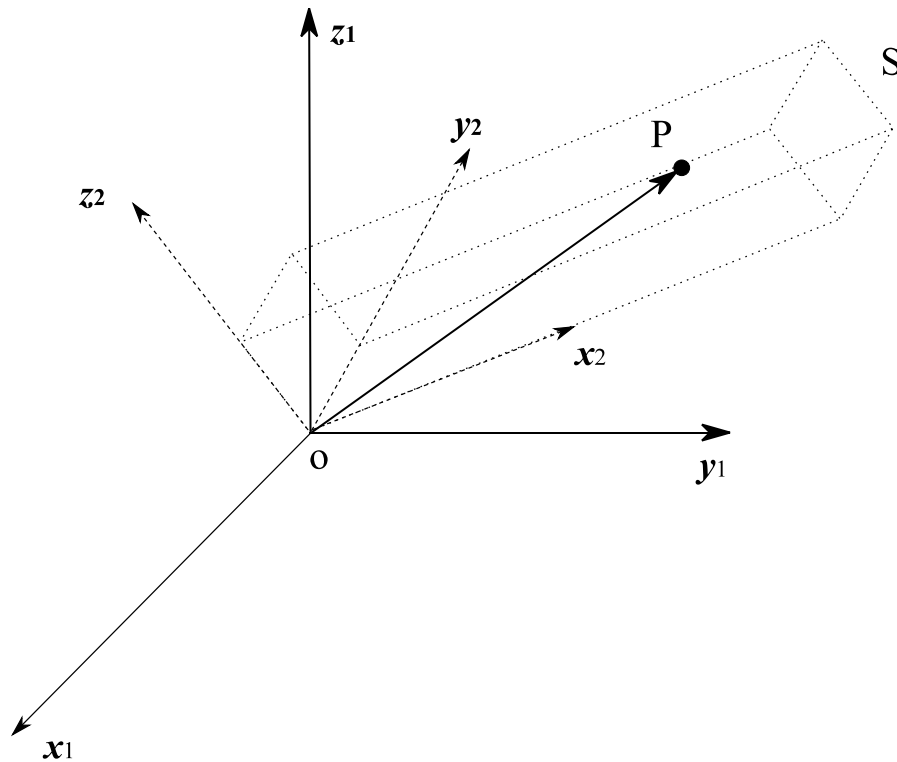


Figura 50: Representação de um ponto do objeto em relação a um referencial
Fonte: SPONG, ANO, modificado pelo autor

A matriz de transformação homogênea 1T_2 pode, então, ser interpretada da seguinte maneira: ele é a matriz que possibilita descrever o ponto 1 em relação ao ponto 2, especificando as rotações e translações necessárias para atingir essa posição. A matriz inversa: ${}^1T_2^{-1}$ representa o ponto 2 em relação ao ponto 1.

De acordo com Spong et al., considerado um prisma com sua origem localizada no referencial universal, após girar esse prisma em $x, y, e z$, é possível chegar no seguinte resultado:

$$T(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 8})$$

Ao desenvolver a equação (A.6) para rotações simples de θ em x, y e z, em torno dos eixos x_a , y_a e z_a de um referencial a , são obtidas as seguintes matrizes de rotação:

$Rot_{(x,\theta)}$ que representa a rotação de θ em torno de x:

$$Rot_{(x,\theta)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 9})$$

$Rot_{(y,\theta)}$ que apresenta a rotação de θ em torno de y:

$$Rot_{(y,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 10})$$

$Rot_{(z,\theta)}$ que representa a rotação de θ em torno de z:

$$Rot_{(z,\theta)} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A. 11})$$

APÊNDICE B – Giroscópio óptico Fizoptika

O giroscópio óptico da marca Fizoptika, empresa Russa, será agora apresentado em detalhes com o intuito de prosseguir com o objetivo principal deste trabalho que é o de calibração de giroscópios, a Figura 51 a seguir ilustra tal instrumento.



Figura 51: Giroscópio óptico Fizoptika VG949PD

A próxima Figura 52 a seguir ilustra os dados técnicos de calibração fornecidos pelo fabricante.

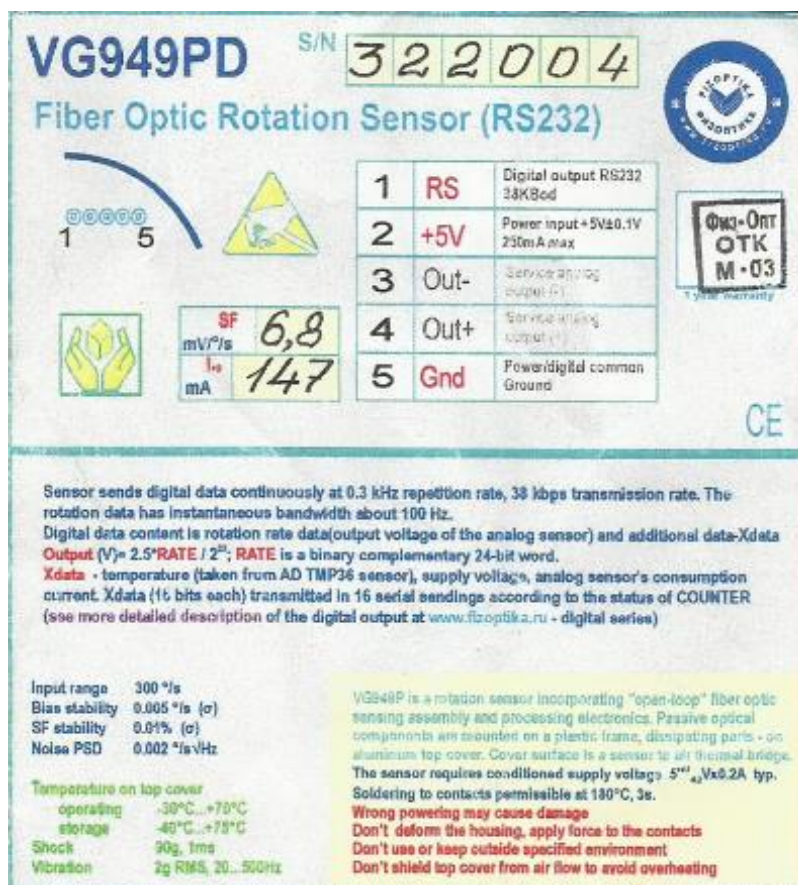


Figura 52: Folha de dados de calibração do fabricante FISOPTIKA do giroscópio VG949PD, número de série 322004

Funcionamento

Para melhor entender o funcionamento deste giroscópio, além do que já foi dito sobre esta categoria, pode ser utilizada a Figura 53 a seguir:

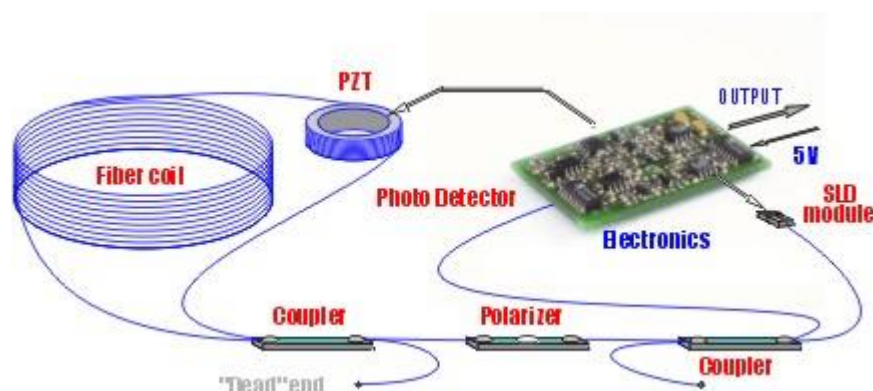


Figura 53: Representação de um giroscópio de fibra óptica em configuração tipo malha aberta com entrada e saída comuns (FIZOPTIKA, 2004)

Os componentes do giroscópio óptico da marca Fizoptika conforme a Figura 30, são os seguintes:

Modulador de fase (*PZT*): aumenta a sensibilidade do giroscópio.

Polarizador (*Polarizer*): é necessário devido a rotações de polarização geradas no acoplador ou em decorrência de imperfeições ou deformações mecânicas das fibras.

Acoplado direcional (*Coupler*): a presença do primeiro acoplador é necessária para obtenção de uma entrada e saída comum no giroscópio, já o segundo acoplador, depois do polarizador, decompõe o feixe de luz em dois sinais que percorrem a bobina em sentidos opostos.

Foto detector e amplificador (*Photo detector*): converte o sinal luminoso da saída em sinal elétrico.

Laser (*SLD module*): é o diodo emissor do feixe de luz.

Bobina de fibra (*Fibercoil*): é uma bobina de fibra óptica desenvolvida para a aplicação.

Processador de sinal (*Electronics*): Converte o sinal da tensão medida em velocidade angular.

Medição de Deslocamento Angular

O giroscópio em questão possui uma saída analógica diferencial, e uma saída digital serial do tipo RS232 que será usada para comunicação e transferência de dados para o computador. Conforme informações fornecidas pela empresa FIZOPTIKA, a transmissão serial das informações do giroscópio é dada através de um conjunto de 8 bytes sob uma taxa de repetição dos pacotes de 300 Hz. A Figura 54 a seguir detalha o formato dos dados transmitidos.

Tabela do formato dos dados transmitidos pelo giroscópio	
SOD (1 <i>byte</i>)	Byte de início da transmissão (DD em hexadecimal)
Dados (5 <i>bytes</i>)	1° <i>byte</i> – <i>byte</i> menos significativo da taxa (L) 2° <i>byte</i> – <i>byte</i> mais significativo da taxa (H) 3° <i>byte</i> – <i>byte</i> de significância média da taxa (M) 4° <i>byte</i> – Contador (c) 5° <i>byte</i> – Algum dos dados secundários (xdata)
Confirmação (2 <i>bytes</i>)	Soma dos 5 <i>bytes</i> dos dados (<i>Checksum</i>)
Total 8 <i>bytes</i>	

Figura 54: Formato dos dados transmitidos pelo giroscópio (FIZOPTIKA, 2004), modificado pelo autor.

Seguindo as relações de transformações também fornecidos pela empresa, é possível então, com o auxílio de softwares de aquisição de dados, fazer a leitura da velocidade angular fornecida na saída do sensor. Com um instrumento virtual criado com o software *LABVIEW* da *National Instruments*, é possível então com algumas modificações, fazer a leitura da velocidade angular, e logo chegar a um valor direto de deslocamento angular.

A Figura 55 a seguir ilustra um fluxograma do funcionamento do instrumento virtual.

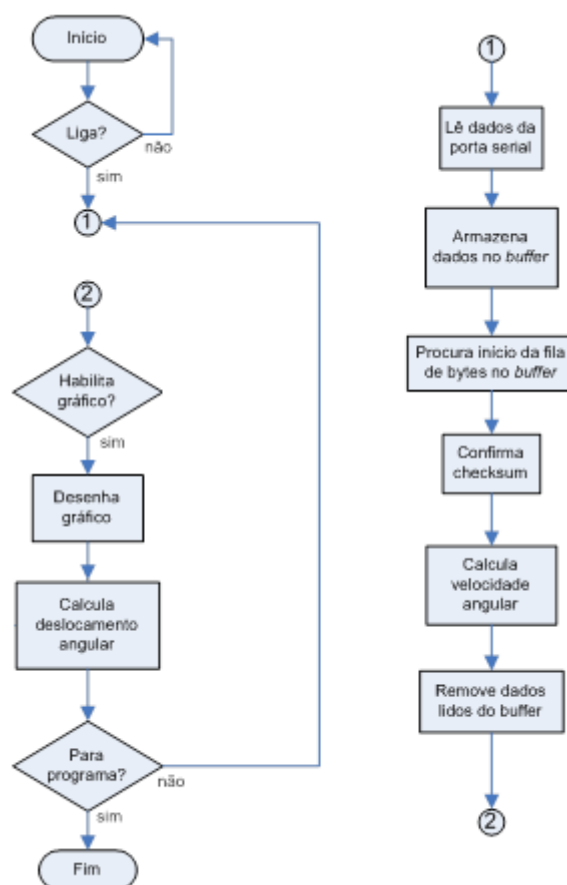


Figura 55: Fluxograma do programa do giroscópio (EMMENDOERFER et al. , 2006), modificado pelo autor

Na conexão serial foram usados os pinos de alimentação do giroscópio (pinos número 2 e 5) para energizar o sensor e para tornar a referência comum, e o pino de número 1 de saída digital RS232. Como já explicado em seções anteriores, o giroscópio usado funciona em malha aberta, portanto apenas envia dados. A Figura 56 abaixo representa o esquema de ligação com o uso de um conector do tipo DB9 fêmea.

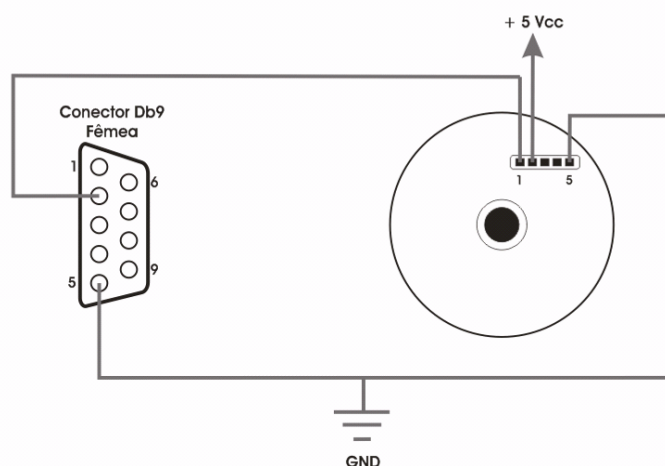


Figura 56: Esquema de ligação para transmissão de dados via RS232

Em termos de teste de leitura de velocidade angular e deslocamento angular, um cenário de testes foi criado somente com a intenção obter dados aproximados para fins de confirmação do funcionamento do programa. Neste cenário o giroscópio é movimentado arbitrariamente de forma manual.

Com o uso de um transferidor, uma marcação de 0 a 90° foi feita, a Figura 57 mostra esta marcação feita manualmente.

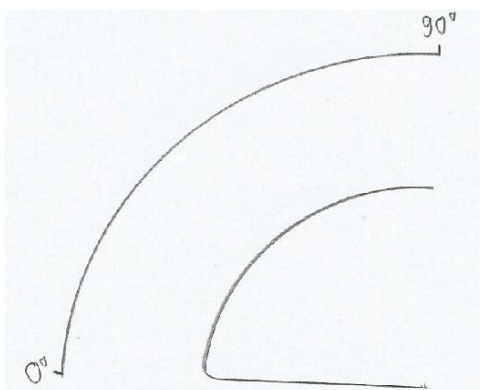


Figura 57: Marcação manual para testes

Logo em seguida o giroscópio foi posicionado no centro da figura e o pino 1 posicionado em 0° para termos de referência, então manualmente o sensor foi rotacionado até que o pino 1 de referência chegasse a aproximadamente 90°. A Figura 58 mostra o giroscópio posicionado no centro da marcação.

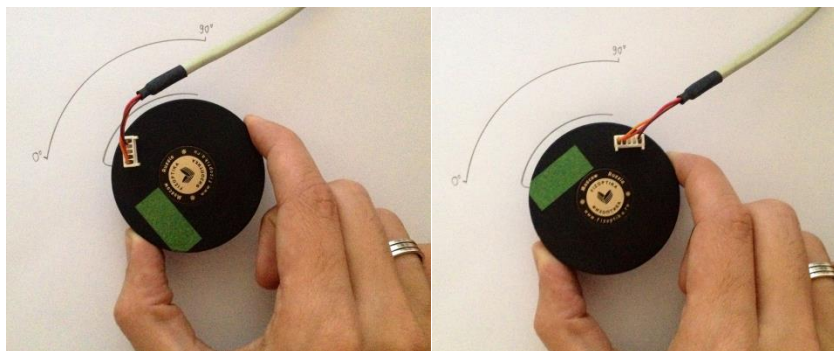


Figura 58: Posicionamento inicial e final para teste de aquisição do giroscópio

A Figura 59 a seguir ilustra o gráfico obtido após a medição feita com o auxílio do instrumento virtual e do cenário de testes.

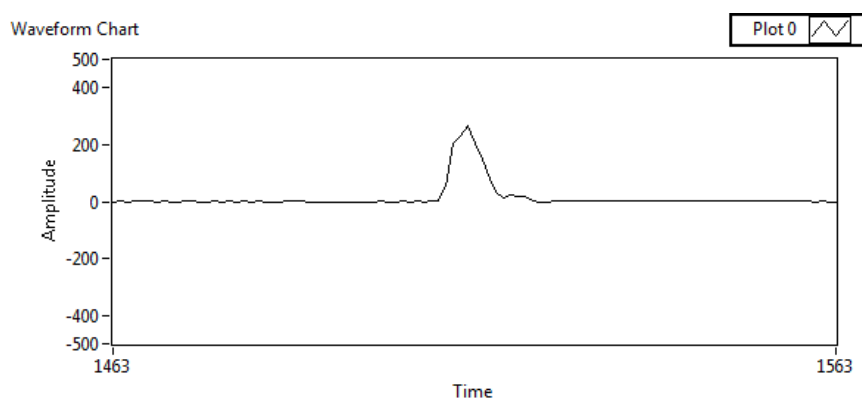


Figura 59: Gráfico obtido através do instrumento virtual

A amplitude do gráfico mostrado na Figura 59 representa velocidade angular, e o tempo em segundos. O deslocamento angular resultante foi calculado pela regra do trapézio implementada no próprio programa e trouxe um deslocamento de 93.6° , o que se aproxima satisfatoriamente do resultado esperado.

O teste apresentado tem o intuito de apresentar o funcionamento do giroscópio a ser utilizado neste trabalho. A proposta de método de calibração fará uso deste sensor. As seções seguintes entraram em detalhes do método de calibração proposto com o uso da bancada de calibração.