

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

RICARDO DOLCI

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE GIRÔMETROS MEMS E SUA APLICAÇÃO
EM TESTES DE INCLINAÇÃO DE MODELOS DE EMBARCAÇÕES**

Joinville

2014

Ricardo Dolci

**AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE GIRÔMETROS MEMS E SUA APLICAÇÃO
EM TESTES DE INCLINAÇÃO DE MODELOS DE EMBARCAÇÕES**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Maurício de Campos Porath

Joinville

2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Dolci, Ricardo

Avaliação metrológica de girômetros MEMS e sua aplicação em testes de inclinação de modelos de embarcações / Ricardo Dolci ; orientador, Maurício de Campos Porath - Florianópolis, SC, 2014.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville. Graduação em Engenharia Naval.

Inclui referências

1. Engenharia Naval. 2. Girômetros. 3. MEMS. 4. Teste de inclinação. I. Porath, Maurício de Campos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. III. Título.

Ricardo Dolci

AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE GIRÔMETROS MEMS

Esse trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Naval e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora e pelo curso de graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Lucas Weihmann, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. Mauricio de Campos Porath, Dr.-Ing.
Orientador

Prof.^a Ricardo Aurélio Quinhões Pinto, Me.

Prof. James Schipman Eger, Me.

Aos meus pais, Fernando e Marli, que insistiram em minha educação e me apoiaram em minhas decisões, fundamentais para a finalização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Fernando e Marli, por nunca duvidarem de mim e terem a paciência mesmo quando eu não a tinha mais.

À minha namorada, Juliana, por estar ao meu lado e ainda me ajudar com um trabalho totalmente fora da área de conhecimento dela.

Ao meu orientador, Mauricio, fazendo mais do que deveria para que esse trabalho finalizasse.

Aos graduandos, Pedro, Gustavo e Lucas e ao professor Antônio que me ajudaram com o desenvolvimento de uma parte essencial para a aceitação do trabalho pela banca.

À Fundação CERTI, juntamente com a UFSC Florianópolis e UFSC Joinville por terem me autorizado a utilizar de seus laboratórios para a realização dos testes.

A Equipe Holandês Voador por nos deixarem usar a embarcação do projeto DUNA deles para o estudo de caso.

A todos os amigos que fiz na faculdade, agradeço por cada momento juntos, conselhos, discussões e risadas que tivemos e ainda teremos.

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”.

(Claude Lévi-Strauss)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho metrológico de um girômetro miniaturizado de baixo custo, integrado em um smartphone. Para isso, foram realizados experimentos em um laboratório de metrologia com temperatura controlada, tais como, teste de repetitividade, tendência e estabilidade da tendência. Apresentando resultados satisfatórios, foi realizado um estudo de caso para demonstrar a aplicação do sensor em um problema de engenharia naval: com um modelo de embarcação, foi feito um teste de inclinação utilizando o girômetro contido num aparelho iPod da Apple.

Palavras-chave: Sensor inercial. Girômetro. MEMS. Teste de inclinação

ABSTRACT

This work has as objective to evaluate the metrological performance of a minimized, low-cost gyroscope integrated on a cellphone. To achieve that, experiments were performed on a metrology laboratory with controlled temperature, such as repeatability tests, bias and signal drift. With good results, it was performed a case study to demonstrate the application of the sensor in a naval engineering problem. With a ship model, it was carried out an inclining test using a gyroscope contained on an iPod from Apple.

Keywords: Inertial sensor. Gyroscope. MEMS. Inclining Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Partes de um sensor inercial	15
Figura 2: Comparação de um acelerômetro, modelo LIS302DL (3x5x0,9 mm) com uma moeda	16
Figura 3: Primeiro circuito integrado.....	17
Figura 4: Bomba de insulina.....	18
Figura 5: Sistema massa mola	20
Figura 6: Sistema massa mola ADXL150.....	21
Figura 7: Fotografia dos capacitores e massa do ADXL150.....	22
Figura 8: Pêndulo de Foucault.....	23
Figura 9: Girômetro mecânico.....	24
Figura 10: Efeito da rotação no guia de ondas	25
Figura 11: Representação de um girômetro ring laser	26
Figura 12: Representação de um girômetro de fibra óptica	27
Figura 13: Girômetro vibratório	28
Figura 14: Girômetro tipo diapasão	29
Figura 15: Girômetro MEM tipo diapasão	29
Figura 16: Representação de girômetro tipo roda oscilante	30
Figura 17: Girômetro com roda oscilante	30
Figura 18: Pêndulo	32
Figura 19: Iphone 5	33
Figura 20: Girômetro L3G4200DH	34
Figura 21: Mesa de senos	35
Figura 22: Posicionamento do celular na mesa de senos	36
Figura 23: posicionamento celular.....	36
Figura 24: Definição dos movimentos do girômetro	37
Figura 25: Movimento em pitch	40
Figura 26: Movimento de roll	41
Figura 27: Sinal de pitch	42
Figura 28: Desvio Allan de pitch.....	43
Figura 29: Estabilidade dos dados de ângulo	44
Figura 30: Pesos adicionados para estabilização	47
Figura 31: Pesos.....	48
Figura 32: balança calibrada.....	48
Figura 33: Pesos no centro da embarcação	49
Figura 34: Primeiro peso deslocado.....	49
Figura 35: Segundo peso deslocado.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Aplicações para sensores inerciais MEMS	19
Tabela 2: Repetitividade.....	41
Tabela 3: Banda devido à movimentação de pesos	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Sensores inerciais	15
2.2 MEMS.....	15
2.2.1 Histórico	16
2.2.2 Aplicações	18
2.3 Acelerômetros	19
2.3.1 Acelerômetros MEMS.....	21
2.4 Girômetros	22
2.4.1 Girômetro mecânico	23
2.4.2 Girômetro óptico	24
2.4.3 Girômetro vibratório (MEMS).....	27
2.5 Teste de Inclinação	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Celular e aplicativo utilizado	33
3.2 Equipamentos para teste de tendência e repetitividade	34
3.3 Modelo matemático	35
3.4 Testes	35
3.4.1 Teste de tendência e repetitividade	36
3.4.2 Teste de estabilidade da tendência	38
3.4.3 Influência da temperatura	39
4. RESULTADOS OBTIDOS	40
4.1 Tendência e repetitividade (b e δ_{rep})	40
4.2 Deriva (δ_{der})	42
4.3 Incerteza da medição	44
4.3.1 Incerteza padrão relacionada à repetitividade natural do sensor (u_{rep}).....	44
4.3.2 Incerteza padrão relacionada à deriva do sinal (u_{der})	45
4.3.3 Incerteza padrão relacionada ao sistema de referência (u_{ref})	45

4.3.4 Incerteza padrão combinada (u_c), grau de liberdade efetivo (v_{eff}) e incerteza expandida (U)	46
5. ESTUDO DE CASO	47
6. CONCLUSÃO	51
7. BIBLIOGRAFIA	52

1. INTRODUÇÃO

Girômetros são sensores que medem a velocidade angular de um sistema (LAWRENCE, 1998). Segundo Ribas (2011), alguns desses sensores oferecem vantagens como o custo de fabricação, tamanho, consumo de energia e operação em várias frequências.

De acordo com Lima (2005), esses dispositivos são de bastante importância para a indústria automobilística, militar e aeroespacial, estando presentes em alarmes de automóveis, GPS, medição de vibração, controle de elevadores e armamentos como mísseis. Esses sensores podem ser utilizados de forma vantajosa em várias outras áreas, entre elas, a naval.

1.1 Justificativa

De acordo com Forhan (2010), ao longo dos anos, os sensores inerciais encontraram uma aplicação muito grande no setor automotivo, mas, tanto esse setor, quanto toda a indústria aplicada ao consumo de equipamentos eletroeletrônicos, continuam a mudar e apresentar novas oportunidades e desafios.

Na indústria naval, o teste de inclinação em embarcações é utilizado para encontrar a altura metacêntrica (GM) do navio, podendo-se assim distribuir corretamente a água de lastro da embarcação para que a mesma não emborque para um dos bordos. Atualmente, segundo Pinheiro (2002), há dois métodos para estimar a GM da embarcação, utilizando tubos U ou pêndulos, mas a utilização de equipamentos que medem a inclinação com maior exatidão já está sendo aplicada.

O desenvolvimento de dispositivos inerciais com tecnologia microeletromecânica (MEMS) foi identificado como um dos passos mais promissores para o século XXI e esses sensores podem revolucionar tanto a indústria quanto os produtos, segundo Prime (2002). Esses dispositivos MEMS apresentam algumas vantagens em relação aos convencionais, segundo Forhan (2010). O baixo custo de fabricação, tamanho reduzido, massa reduzida, baixo consumo de energia e alta confiabilidade metrológica são algumas dessas vantagens.

1.2 Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo avaliar metrologicamente os sensores inerciais MEMS de baixo custo existentes em smartphones atuais para verificar a possibilidade de

serem utilizados em testes de inclinações de modelos de embarcações para a estimativa de GM.

Espera-se, ao final desse trabalho, um melhor entendimento do desempenho de girômetros MEMS e mostrar a possibilidade de fazer testes de inclinações em embarcações utilizando um smartphone (reduzindo o tempo do teste de inclinação e possibilitando a aquisição de dados sem fio).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sensores inerciais

De acordo com Lawrence (1998) um sensor inercial é um dispositivo que calcula variáveis como rotação, translação ou vibração de um objeto continuamente, sem necessitar de referências externas ao sistema. O mesmo é muito utilizado em veículos em conjunto com GPS para navegação, em celulares e controles de vídeo games.

Os dois tipos de sensores inerciais são os girômetros e os acelerômetros. O girômetro mede a velocidade angular do sistema e o acelerômetro mede a aceleração linear do sistema.

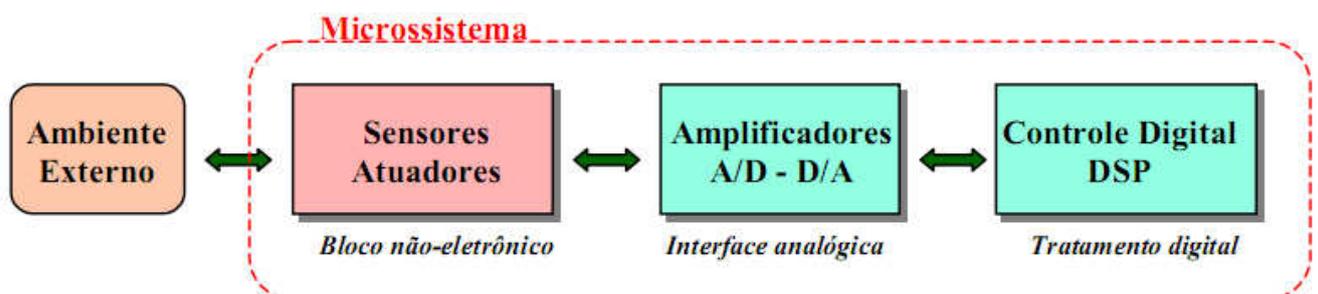
Dentre os vários tipos de girômetros e acelerômetros, há os “MEMS”.

2.2 MEMS

MEMS é a abreviação de Microelectromechanical systems, ou seja, sistema microeletromecânico. Segundo Prime (2002), essa tecnologia é usada para criar micro-dispositivos integrados que combinam componentes elétricos e mecânicos.

De acordo com Forhan (2010), esse tipo de sistema, como o próprio nome já diz, é um sistema eletromecânico miniaturizado, apresentando três partes fundamentais: o sensor, a interface analógica e o controle digital (Figura 1). O sensor receberá o sinal, a interface analógica adquire o sinal vindo do sensor e será responsável por amplificar e transmitir esse sinal para a última parte do controle digital, que fará o processamento numérico. Atualmente, os circuitos eletrônicos digitais e analógicos já estão bastante desenvolvidos. Agora, resta como desafio miniaturizar e integrar os sensores com a eletrônica.

Figura 1: Partes de um sensor inercial



Fonte: RIBAS, 2011

Segundo Ribas (2011), esses sensores se apresentam de forma híbrida ou monolítica. São de forma híbrida, quando a eletrônica é separada da parte mecânica e é composto por mais de um chip. São de forma monolítica quando todo o sistema é integrado num único chip. Os sistemas monolíticos apresentam vantagens, como seu melhor desempenho devido à integração evitar o problema de interface entre os circuitos e aumentar o rendimento de fabricação em grande escala de produção.

A tecnologia de MEMS oferece, em teoria, grandes vantagens em termos de tamanho (particularmente para aplicações móveis), consumo de energia, custo e capacidade de fornecer várias frequências de operação. Os testes realizados para o desenvolvimento desse trabalho foram feitos com um girômetro modelo L3G4200DH de dimensões 4x4x1,1 mm. Segue imagem de um acelerômetro com dimensões similares ao do girômetro utilizado.

Figura 2: Comparação de um acelerômetro, modelo LIS302DL (3x5x0,9 mm) com uma moeda



Fonte: Disponível em www.eletrica.ufpr.br, acessado em fevereiro/2014

De acordo com Lima (2005), os sensores MEMS já vêm substituindo seus precursores, devido às vantagens já apresentadas. Entretanto, o que ainda favorece os sensores convencionais é a exatidão obtida com esses sensores, que os MEMS ainda não conseguiram alcançar.

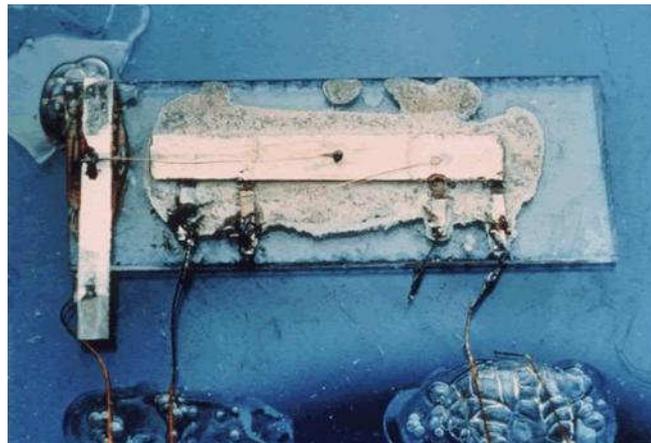
2.2.1 Histórico

Segundo Pleil (2011), alguns eventos ao longo das últimas décadas ajudaram o desenvolvimento da tecnologia MEMS. Em 1947, William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain construíram o primeiro transistor de ponto contato. Essa invenção mostrou a capacidade de construir transistores com materiais semicondutores, tendo um maior controle de tensão e corrente. Também abriu as portas para a construção de transistores cada vez menores.

Em 1954, C. S. Smith descobriu o efeito piezorresistivo em materiais semicondutores como o silicônio e o germânio. Uma descoberta importante para os futuros MEMS, porque mostravam que esses materiais podiam sentir a pressão do ar ou da água melhor que o metal.

Talvez o passo mais importante, ainda de acordo com Pleil (2011), tenha sido a invenção dos circuitos integrados. Quando o transistor foi criado, havia um limite para sua miniaturização, já que eles dependiam de fios e outros eletrônicos. Com isso veio o circuito integrado (CI), que poderia incluir transistores, resistores, capacitores e fios, tudo junto em um único substrato, podendo assim diminuir seu tamanho. Dois pesquisadores desenvolveram quase ao mesmo tempo um CI. Em 1958, Jack Kilby construiu um CI que consistia de um transistor, três resistores e um capacitor, tudo em um chip de germânio (Figura 3). Pouco tempo depois, Robert Noyce criou um Circuito Unitário. Esse circuito foi criado num chip de silício e em 1961 Noyce recebeu a primeira patente.

Figura 3: Primeiro circuito integrado



Fonte: PLEIL, 2011

Já em 1982, um artigo foi publicado por Kurt Petersen, com o título de “Silicon as a *Mechanical Material*” (Silício como um material mecânico). O artigo fornecia informações sobre as propriedades do material e foi fundamental para a exploração dessas áreas. Até hoje, ainda é um dos artigos mais referenciados ao falar de MEMS.

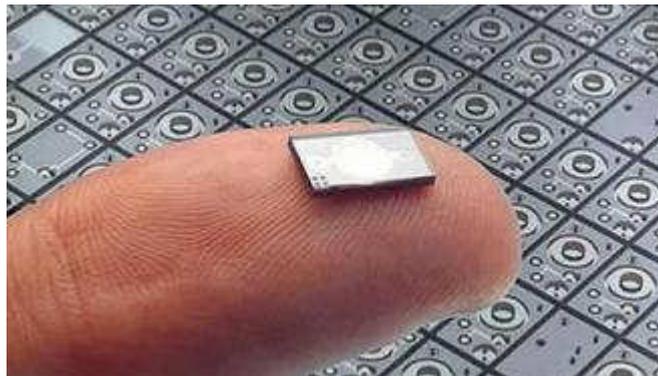
Petersen (1982), em seu artigo, fala de quatro fatores cruciais que transformaram o silício nesse material de tamanha importância: 1) ele é abundante, barato e pode ser produzido com níveis altíssimos de pureza e perfeição. 2) o processamento do silício é baseado em filmes finos que são bastantes adequados a miniaturizações. 3) a definição e reprodução de instrumentos e padrões são realizados usando técnicas fotográficas, que são capazes de alta precisão. 4) e o mais importante de todos os fatos de um ponto de vista comercial e prático é

que os circuitos microeletrônicos de silício são fabricados em “lotes”. A unidade de produção para circuitos integrados não é apenas um item, mas centenas de itens idênticos.

Ao longo dos anos seguintes, várias aplicações e desenvolvimento aconteceram. Em 1993, segundo Pleil (2011), o primeiro acelerômetro fabricado em larga escala foi criado pela Analog Devices. Esses acelerômetros eram usados em airbags pela indústria automotiva e, com eles, houve uma redução de custo de quase 75% na parte eletrônica dos airbags. Eram confiáveis, pequenos e baratos. Hoje já são utilizados em vários produtos diferentes, como sistemas de navegação, sistemas de computadores e telefones celulares.

Desde então, o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações para os MEMS estão sendo pesquisadas e criadas. Há infinitas possibilidades para os MEMS e eles continuarão a ser uma parte importante na sociedade como ela é hoje (Figura 4).

Figura 4: Bomba de insulina



Fonte: PLEIL, 2011

2.2.2 Aplicações

Esses dispositivos podem ser usados em diversas áreas, como mostra a tabela a seguir.

Tabela 1: Aplicações para sensores inerciais MEMS

Área	Aplicação
Comercial	Alarmes de automóveis Controles remotos Navegação pessoal Materiais esportivos
Computação	Controle de discos rígidos Orientação de visores em capacetes
Industrial	Medição de vibração Controle de movimento de robôs
Militar	Parte de armamentos Veículos sem comando humano
Medicina	Monitoramento de pacientes Comando de próteses

Fonte: LIMA, 2005

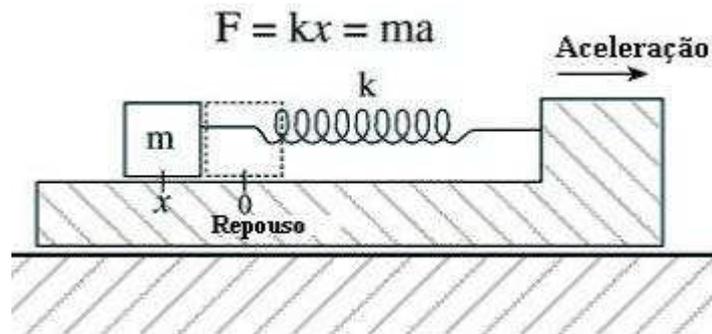
De acordo com Lima (2005) esses dispositivos são de bastante importância para a indústria automobilística, militar e aeroespacial. Mas ainda há outras aplicações que podem ser desenvolvidas em outras áreas, já que as possibilidades para os MEMS são inúmeras.

2.3 Acelerômetros

Segundo Magno (2009), acelerômetro é um instrumento para medir a aceleração de um corpo numa dada direção.

De acordo com Renault (2013), a maioria dos acelerômetros é baseada num sistema massa-mola, onde o deslocamento dessa massa é resultado de uma alteração na aceleração. As molas, dentro da região linear, são governadas pela lei de Hooke, ou seja, o deslocamento da mesma é proporcional à força aplicada:

Figura 5: Sistema massa mola



Fonte: Disponível em www.eletrica.ufpr.br, acessado em fevereiro/2014

$$F = k * x \quad (1)$$

Onde:

F – força

k – constante da mola

x – deslocamento

Juntamente com isso, tem-se a segunda lei de Newton:

$$F = m * a \quad (2)$$

Onde:

m – massa

a – aceleração

Igualando os dois, tem-se:

$$k * x = m * a \quad (3)$$

ou

$$a = k * x / m \quad (4)$$

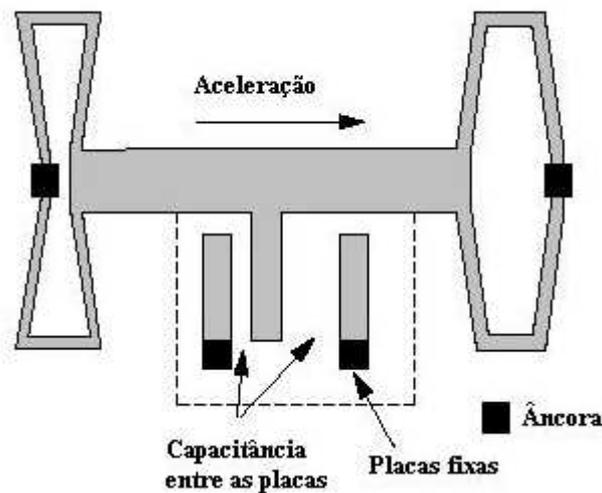
Percebe-se que a aceleração causa um deslocamento da massa, ou, se a massa sofreu um deslocamento x , significa que essa massa está sob uma aceleração a . O que o acelerômetro faz, é medir o deslocamento da massa e, através dele, calcular a aceleração que deve ter sido aplicada ao corpo. Este mesmo autor diz que, na maioria dos sensores, a massa é capaz de mover-se em apenas uma direção, sendo necessários três acelerômetros combinados para um movimento tridimensional.

2.3.1 Acelerômetros MEMS

Há várias formas de medir o deslocamento da massa, uma delas é com o uso de capacitores.

Os acelerômetros que utilizam capacitores funcionam como mostra a figura 6.

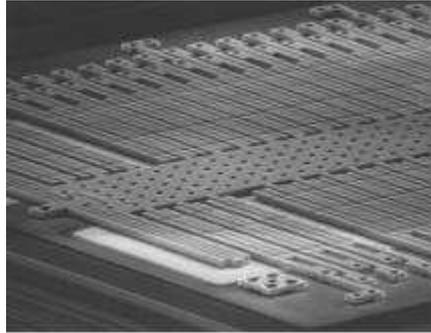
Figura 6: Sistema massa mola ADXL150



Fonte: Disponível em www.eletrica.ufpr.br, acessado em fevereiro/2014

Segundo Budzinski (1999), a massa é a barra de silício e as ligações conectadas às âncoras servem como mola. Como a capacitância de uma placa fixa é inversamente proporcional à distância entre as placas, quando a massa sofre uma aceleração, a placa central se desloca, mudando a capacitância, causando uma alteração no potencial elétrico entre os eletrodos que pode ser medida. Para melhorar a sensibilidade do sensor e reduzir o ruído, um acelerômetro como esse possui 42 células. Segue figura 7 como exemplo.

Figura 7: Fotografia dos capacitores e massa do ADXL150



Fonte: Disponível em www.eletrica.ufpr.br, acessado em fevereiro/2014

2.4 Girômetros

Como dito anteriormente, os girômetros medem a velocidade angular do sistema em relação a um referencial inercial.

De acordo com Lawrence (1998), para estudar a rotação da Terra, em 1851, o cientista francês Leon Foucault usou um pêndulo enorme, com 67 metros de comprimento com um peso de ferro de 28 quilogramas na ponta que balançava com um período de 15 segundos. Com seu ponto de apoio livre para girar, o pêndulo pode se mover livremente em qualquer plano de oscilação. Segundo Kilhian (2011), a expectativa era que o pêndulo oscilasse em um movimento retilíneo em um único plano, mas o mesmo parecia girar com o tempo, mudando sua direção em relação a esse plano considerado.

Pelas Leis de Newton, a oscilação do pêndulo depende somente da força gravitacional, da tração do fio e da resistência do ar. Como nenhuma outra força age para que haja essa mudança de direção da oscilação do pêndulo, fica provado que quem está girando é o plano contido na Terra e não o pêndulo.

Figura 8: Pêndulo de Foucault



Fonte: Disponível em <http://www.panoramio.com/photo/7139055>, acessado em março/2014

Em 1852, Foucault fez um instrumento mais compacto e mais preciso. Uma roda com um suporte que se mantinha fixo no espaço, enquanto seu laboratório rotacionava em volta. Assim, foi criado o girômetro mecânico. Alguns autores consideram o girômetro apenas esse instrumento, mas neste trabalho e em suas referências, girômetro é qualquer instrumento que meça a velocidade angular.

Neste trabalho, serão descritos três tipos de girômetros: o girômetro mecânico, o óptico e, por último, o girômetro vibratório.

2.4.1 Girômetro mecânico

O girômetro mecânico opera de acordo com o princípio da conservação do momento angular, segundo Groves (2008). De acordo com a Segunda Lei de Newton, o momento angular de um corpo se manterá inalterado a menos que haja a ação de um torque (T) sobre o mesmo. Torque é:

$$T = F * d \quad (5)$$

Sendo:

F – Força;

d – distância.

De acordo com Woodman (2007), os girômetros mecânicos são constituídos de uma roda montada em dois suportes que permite a rotação nos três eixos, como mostra a figura 9.

Figura 9: Girômetro mecânico



Fonte: PARANHOS, 2009

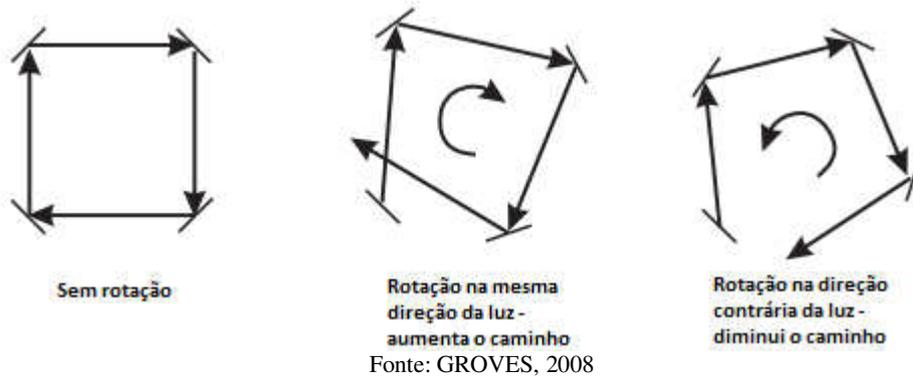
Com a roda girando, o efeito da conservação do momento angular é a resistência da roda a mudanças na sua orientação. Então, a roda irá continuar nessa orientação e os ângulos entre os suportes irão mudar. Mede-se a orientação através desses ângulos.

A principal desvantagem desse tipo de girômetro, ainda segundo Woodman (2007), é que ele contém partes móveis. Isso causa atrito, o que aumenta o erro com o tempo. Para minimizar esse erro, rolamentos de alta precisão e lubrificantes especiais são usados, aumentando o custo do equipamento. Esses girômetros também necessitam de alguns minutos para estabilizar, o que não é ideal em muitas situações.

2.4.2 Girômetro óptico

De acordo com Groves (2008), os girômetros ópticos seguem o princípio que a luz viaja a uma velocidade constante. Se um feixe de luz é enviado nas duas direções de um guia de ondas fechado e sem rotação, feito de espelhos ou fibra óptica, o comprimento do trajeto é o mesmo para os dois feixes. Girando esse guia de ondas em um eixo perpendicular ao seu plano, as superfícies refletoras irão aparentar estar se distanciando para o feixe de luz viajando na mesma direção da rotação e se aproximando para o feixe de luz na direção contrária. Rotacionando na mesma direção aumenta o comprimento do trajeto e na direção contrária da luz diminui o comprimento do trajeto, assim como mostra a figura 10.

Figura 10: Efeito da rotação no guia de ondas



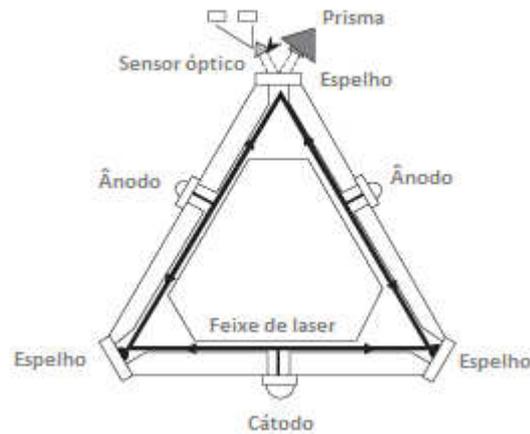
Essa rotação induzida irá produzir uma fase diferente entre os feixes de luz propagando em direções contrárias. Essa diferença é conhecida como o Efeito Sagnac, de acordo com Juang (2009), e forma o princípio básico de operação de todos os girômetros ópticos.

Esse tipo de girômetro pode ser dividido em dois: os girômetros Ring laser e os girômetros de fibra óptica. Cada um deles usam técnicas diferentes para medir esse efeito.

2.4.2.1 Girômetro ring laser

O girômetro ring laser, de acordo com o mesmo autor, apresenta um caminho fechado preenchido com uma mistura de neônio e hélio, conhecido como cavidade laser. Há ainda espelhos com alta refletividade alocados em cada ponta desse caminho e por último, um cátodo e um ânodo são usados para aplicar uma grande diferença de potencial através do gás, para gerar um campo elétrico, assim como mostra a figura 11.

Figura 11: Representação de um girômetro ring laser



Fonte: Disponível em <http://www.answers.com/topic/laser-gyro>, acessado em março/2014

O princípio de funcionamento, de acordo com Kumar (2005), é baseado na diferença de frequência produzida entre dois feixes de laser viajando em direção opostas. Quando o girômetro é rotacionado, a diferença de frequência é medida e os dados são processados para determinar a velocidade angular com uma precisão muito alta.

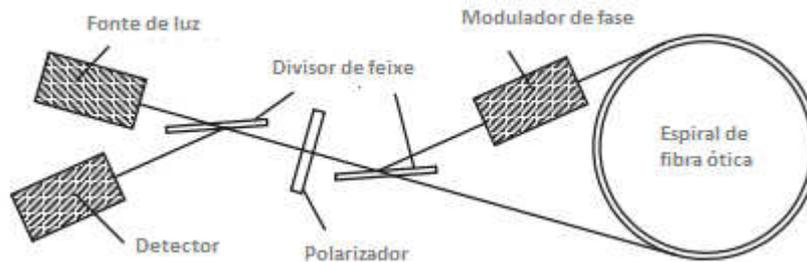
As principais vantagens de um girômetro desse tipo, segundo o mesmo autor, é que não há partes móveis, não necessita de tempo de aquecimento, e apresenta um tempo longo de estabilidade, além de serem insensíveis para acelerações e oferecer uma boa resolução.

Mesmo com essas vantagens, esse tipo de girômetro apresenta algumas limitações, de acordo com Juang (2009). Seu custo é muito alto devido aos espelhos de alta precisão e a geometria exata do caminho que deve ser construído. Seu tamanho e peso é outro fator limitante para seu uso. Há esforços para miniaturizar esse girômetro, mas sua confiabilidade também cai. E por último, ele também depende de fontes de energia capazes de entregar centenas de volts a correntes baixas.

2.4.2.2 Girômetro de fibra óptica

De acordo com Groves (2008), esse tipo de girômetro apresenta uma fonte de luz que será dividida em duas partes iguais, usando um divisor de feixe, depois serão enviadas através de uma espiral de fibra óptica em direções opostas. Outro divisor de feixe irá combinar as duas partes no detector, onde a interferência entre elas será observada, assim como mostra a figura 12. Segundo Woodman (2007), essas duas partes combinadas, dependem da velocidade angular. É possível então medir essa velocidade, medindo a intensidade do feixe combinado.

Figura 12: Representação de um girômetro de fibra óptica



Fonte: GROVES, 2008

Assim, como os girômetros ring laser, esse tipo apresenta as mesmas vantagens em relação aos girômetros mecânicos, de acordo com Woodman (2007), como a ausência de partes móveis e a iniciação rápida.

2.4.3 Girômetro vibratório (MEMS)

Por último, e o principal desse trabalho, tem-se o girômetro vibratório. Segundo Woodman (2007), mesmo com todos os anos de desenvolvimento, os girômetros ópticos e mecânicos ainda necessitam de peças com alta precisão e montagem complicada, tornando-os caros. Diferente deles, o girômetro vibratório, construído usando técnicas de micro usinagem de silício, é relativamente barato para fabricar. Em geral, os girômetros MEMS são fabricados utilizando essa tecnologia, que fazem uso do efeito de Coriolis, de acordo com Lima (2005).

Segundo Renault (2013), esse efeito Coriolis é um fenômeno observado quando um objeto está se movendo com certa velocidade em um referencial em rotação. Para um observador neste referencial, o objeto parece mudar sua trajetória. A força aparente no objeto é a força de Coriolis (F_c):

$$F_c = 2 * m * (w \times v) \quad (6)$$

Onde:

m – massa do objeto;

w – vetor de velocidade angular do referencial;

v – vetor de velocidade do corpo.

Dessa força, pode-se obter a aceleração de Coriolis (ac), que segundo Forhan (2010), é com ela que mede-se a velocidade angular. Se:

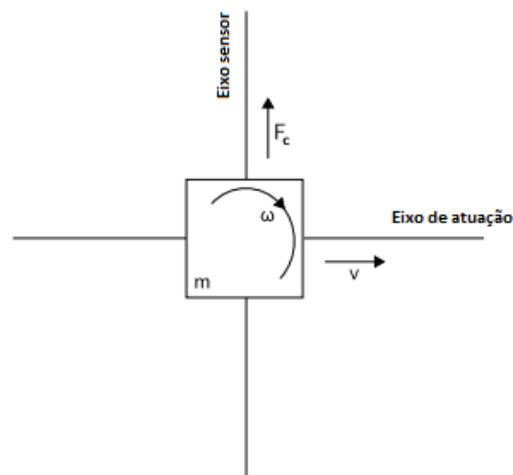
$$m * ac = 2 * m * (\omega \times v) \quad (7)$$

Tem-se:

$$ac = 2 * (\omega \times v) \quad (8)$$

De acordo com Woodman (2007), os girômetros MEMS contêm elementos vibratórios para medir o efeito Coriolis. A geometria mais simples consiste de uma massa excitada para vibrar ao longo de um eixo de atuação, como mostra a figura 13. Quando o girômetro rotaciona, uma segunda vibração é induzida ao longo do eixo perpendicular, eixo sensor, devido à força Coriolis. A velocidade angular é calculada medindo essa rotação secundária.

Figura 13: Girômetro vibratório



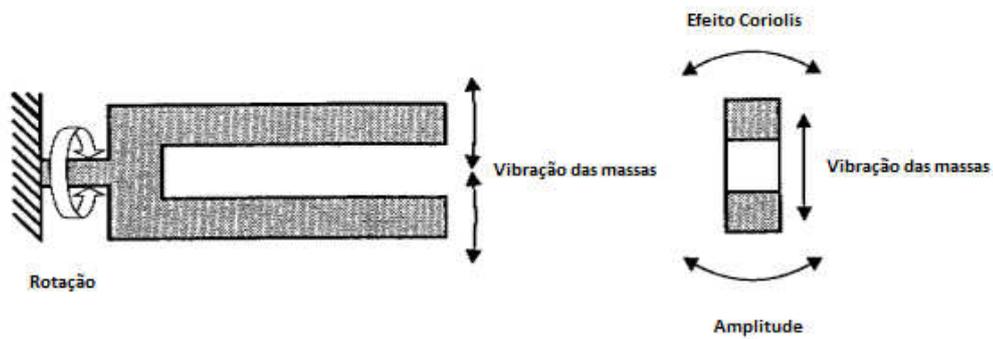
Fonte: WOODMAN, 2007

Para melhor compreensão, seguem descrições de alguns tipos de girômetros vibratórios.

2.4.3.1 Tuning fork – Girômetro tipo diapasão

De acordo com Forhan (2010), esse tipo de girômetro é constituído por duas massas de prova que irão oscilar com amplitude igual, na mesma direção, mas com sentidos opostos. Ao adicionar a rotação, a força de Coriolis irá criar uma vibração ortogonal ao movimento de cada massa, como mostra a figura 14. A amplitude pode ser calculada.

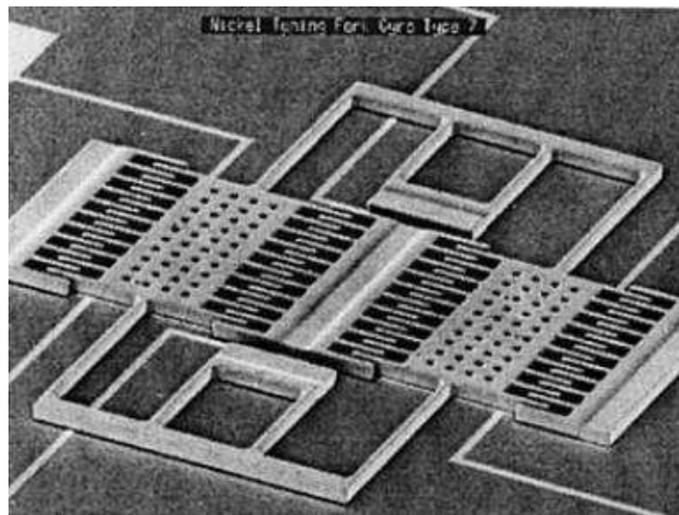
Figura 14: Girômetro tipo diapasão



Fonte: LAWRENCE, 1998

A figura 15 mostra um girômetro MEM tipo diapasão.

Figura 15: Girômetro MEM tipo diapasão

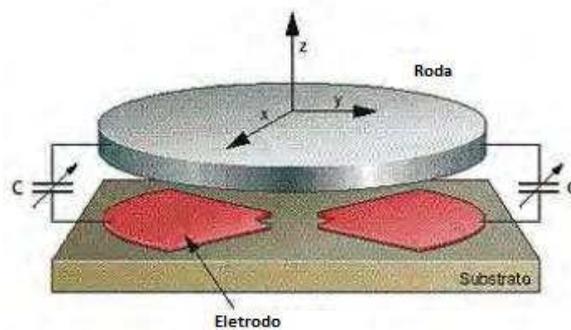


Fonte: FORHAN, 2010

2.4.3.2 Vibrating wheel – Girômetro tipo roda oscilante

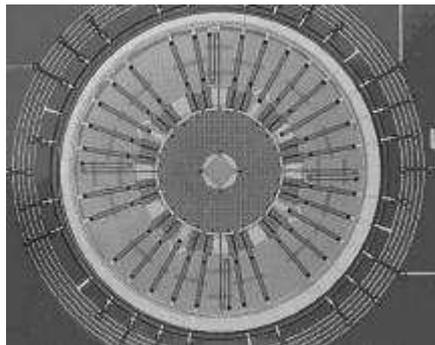
Ainda de acordo com Forhan (2010), nesse tipo de girômetro uma roda é atuada para vibrar no seu eixo axial de simetria. Quando ocorre uma rotação em torno do plano axial a roda sofre uma inclinação fora do plano que será detectada por eletrodos capacitivos fixados embaixo da roda, como mostra a figura 16. Com esse tipo de girômetro há a possibilidade de detectar rotações em até dois eixos com uma roda oscilante. Um girômetro MEM tipo roda oscilante é mostrado na figura 17.

Figura 16: Representação de girômetro tipo roda oscilante



Fonte: FORHAN, 2010

Figura 17: Girômetro com roda oscilante



Fonte: LIMA, 2005

2.5 Teste de Inclinação

Segundo Martins (2010), o teste de inclinação é utilizado para estimar a posição da altura metacêntrica (GM) do navio com deslocamento leve (sem carregamento nenhum). Tal

parâmetro é utilizado para dizer como distribuir a água nos tanques de lastro para manter a embarcação estabilizada.

De acordo com Pinheiro (2002), é necessário que as condições climáticas estejam próximas do ideal, com ausência de ventos, chuvas e ondas. A embarcação deve estar o mais próximo possível da condição de peso leve. Seus tanques devem estar vazios, exceto, se necessário, para manter a estabilidade e trim (inclinação longitudinal) adequados. A embarcação poderá ter no máximo trim de 1% da L_{pp} (comprimento entre perpendiculares) e $0,5^\circ$ de ângulo de banda.

Ainda segundo Pinheiro (2002), para fazer o teste, deve-se adicionar pesos a bordo da embarcação na linha de centro e movimentá-los a uma distância d transversal a essa linha. A movimentação desses pesos criará uma banda (θ), que deverá ser medida. De acordo com Martins (2010), o momento de emborcamento (momento que tende a tirar a embarcação de sua condição de equilíbrio) e o momento de endireitamento (momento restaurador), devido a movimentação desses pesos, podem ser obtidos, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$M_{emb} = w \cdot d \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

e,

$$M_{end} = \Delta \cdot GM \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

onde:

w – peso movimentado;

Δ – deslocamento da embarcação;

Igualando-se os momentos, determina-se experimentalmente o valor de GM, segundo a equação a seguir.

$$GM = \frac{w \cdot d}{\Delta \cdot \tan(\theta)} \quad (11)$$

A Autoridade Marítima Norueguesa diz que os pesos devem ser o suficiente para que criem uma banda de pelo menos 2° e no máximo 4° .

Pinheiro (2002) diz que há dois métodos para determinação de GM. Utilizando pêndulos ou utilizando tubos “U”.

1. Pêndulos: Ficam imersos em cubas com óleo e suspensos por fios com mínima deformação. Utiliza-se uma régua para medir a movimentação do pêndulo e

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Celular e aplicativo utilizado

Para a fase de testes, foi necessária a escolha de um aparelho celular contendo girômetro. No mercado atual, é muito comum encontrar celulares com acelerômetros, mas o girômetro é utilizado só nos de última geração. Para isso, a escolha foi pelo iPhone 5 da Apple, modelo MD297DN/A, rodando o sistema operacional iOS 7.0.4, como mostra a figura 19.

Figura 19: Iphone 5

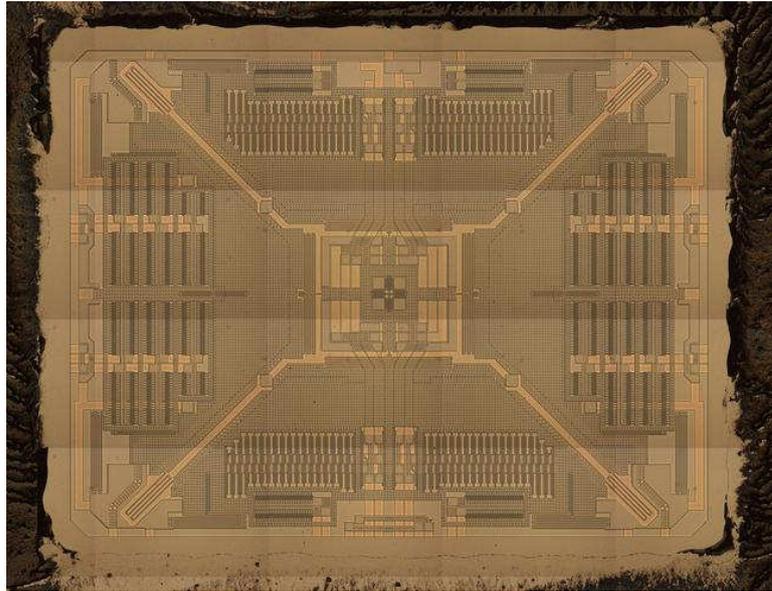


Fonte: Disponível em <http://showmetech.band.uol.com.br/iphone5-mais-barato-ir-aos-eua-comprar/iphone-5-8/>, acessado em abril/2014

O grupo do site techinsights abriu o Iphone 5 e constatou que esse celular conta com um girômetro modelo L3G4200DH de três eixos da STMicroelectronics, do tipo tuning fork.

A figura 20 mostra este girômetro por dentro.

Figura 20: Girômetro L3G4200DH



Fonte: Disponível em <http://www.findmems.com/stmicroelectronics/l3g4200d-three-axis-digital-output-gyroscope>, acessado em abril/2014

De acordo com o fabricante, este girômetro tem três escalas de $\pm 250/\pm 500/\pm 2000$ dps (degrees per second - graus por segundo) e pode trabalhar em temperaturas de -40°C até $+85^{\circ}\text{C}$.

Os dados coletados durante os testes foram transferidos para um notebook via WiFi usando o protocolo OSC (Open Sound Control). Para isso, foi utilizado o aplicativo GyrOSC, disponível comercialmente. Com esse aplicativo, é possível transmitir os dados dos vários sensores do iPhone com uma frequência de amostragem de 40 Hz.

A captação e armazenamento dos dados no notebook foram realizados por um programa desenvolvido pelo orientador na linguagem Processing.

3.2 Equipamentos para teste de tendência e repetitividade

Para ambos os testes, foi utilizada uma mesa de senos calibrada (figura 21) e blocos padrão calibrados. A mesa apresenta uma distância entre cilindros de 250 mm e uma altura de nivelamento de 12,5 mm. Os blocos têm comprimentos de 12,5 mm, 15 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 75 mm e 100 mm, resultando em inclinações da mesa de $0,00^{\circ}$, $0,57^{\circ}$, $1,72^{\circ}$, $2,87^{\circ}$, $4,01^{\circ}$, $6,32^{\circ}$, $8,63^{\circ}$, $14,48^{\circ}$ e $20,49^{\circ}$.

Figura 21: Mesa de senos



Fonte: Próprio autor

3.3 Modelo matemático

Para estimar a incerteza de uma medição, deve-se definir um modelo matemático que descreva o processo de medição. Foi definido um modelo linear descrito pela equação (12). Nessa equação o θ_{ind} é o deslocamento indicado pelo sensor, θ é o deslocamento angular real e δ_{rep} , δ_{der} , e δ_{temp} são os erros causados pela repetitividade do processo de medição, pelo desvio do sinal relacionado à integração desse sinal de rotação e erros causados por efeitos de temperatura, respectivamente. Os últimos dois termos, δ_{ref} e b , representam respectivamente, o erro causado pela incerteza do sistema de referência de medição usado para estimar a tendência (mesa de senos mais blocos) e a tendência.

$$\theta_{ind} = \theta + \delta_{rep} + \delta_{der} + \delta_{temp} + \delta_{ref} + b \quad (12)$$

3.4 Testes

Neste tópico serão descritos os testes realizados para conseguir quantificar os termos descritos na equação (12) e também avaliar o desempenho metrológico do sensor.

3.4.1 Teste de tendência e repetitividade

Para esses testes foi utilizada a mesa de senos descrita anteriormente. Para garantir a repetitividade do posicionamento, foi necessário acoplar o celular a um bloco metálico com baixos erros geométricos (planeza, perpendicularidade e paralelismo). Esse posicionamento foi feito com o auxílio de um esquadro de fio, como mostra a figura 21.

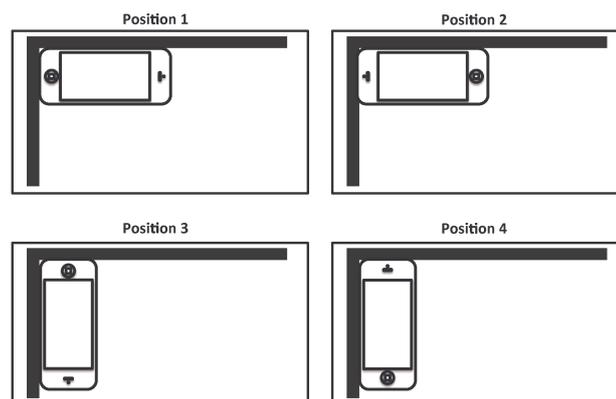
Figura 22: Posicionamento do celular na mesa de senos



Fonte: Próprio autor

Para a avaliação da tendência e repetitividade, o smartphone foi posicionado em quatro posições diferentes com respeito à inclinação gerada pela mesa de senos, mostrada pela figura a seguir.

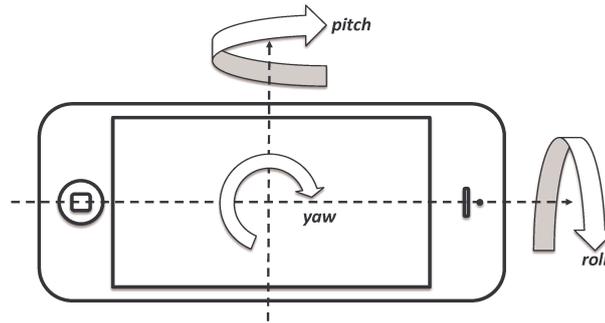
Figura 23: posicionamento celular



Fonte: orientador

Com esse procedimento permitiu-se medir ângulos positivos e negativos para os movimentos de pitch e roll (figura 23). A correção do desalinhamento entre o sensor e a mesa de senos foi possível usando os dados medidos dessas quatro posições. Três ciclos de medições foram feitos em cada posição. Cada ciclo durou cerca de três minutos.

Figura 24: Definição dos movimentos do girômetro



Fonte 1: Orientador

O deslocamento da mesa de senos foi feito de forma suave para reduzir a influência de efeitos dinâmicos.

Para o teste de repetitividade foram avaliados apenas os pontos de 0° e $20,49^\circ$ nas posições 1 e 3. Para ambos, foram feitas 20 observações consecutivas, movendo a mesa após cada medição.

A tendência calculada para os movimentos de pitch e roll foi baseada na equação a seguir.

$$b_i = \theta_i + \theta_{ref,i} \cdot (C_{align} - 1) \quad (13)$$

Onde:

b_i – tendência em relação ao movimento i ;

θ_i – média dos ângulos observados em cada ciclo para o movimento i ;

$\theta_{ref,i}$ – ângulo de referência para o movimento i ;

C_{align} – coeficiente de correção para o desalinhamento entre o sensor e a mesa de senos.

O coeficiente de correção C_{align} foi obtido de acordo com as equações:

$$C_{align,pitch} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\theta_{pitch} - \theta_{ref,pitch}}{\theta_{roll}} \right)_{\theta=20,49;P1} + \left(\frac{\theta_{pitch} - \theta_{ref,pitch}}{\theta_{roll}} \right)_{\theta=20,49;P2} \right] \quad (14)$$

$$C_{align,roll} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\theta_{roll} - \theta_{ref,roll}}{\theta_{pitch}} \right)_{\theta=20,49;P3} + \left(\frac{\theta_{roll} - \theta_{ref,roll}}{\theta_{pitch}} \right)_{\theta=20,49;P4} \right] \quad (15)$$

Os testes foram feitos em um laboratório com temperatura controlada, mantida entre 19,5 °C e 20,5 °C. Para todas as medições foram adotadas médias de 100 pontos consecutivos como indicação. Esses valores foram capturados após a estabilização do sinal.

3.4.2 Teste de estabilidade da tendência

Como o sinal de saída de um girômetro é proporcional à velocidade angular do objeto, tem-se que o deslocamento angular é obtido pela integração desse sinal. Consequentemente, uma boa precisão do deslocamento angular só é possível se a tendência do sinal da velocidade angular for estável no tempo, podendo assim ser corrigida.

A instabilidade da tendência do girômetro pode ser avaliada pela Variância de Allan (σ_a^2) e sua raiz quadrada, o Desvio de Allan (σ_a). Para essa análise é necessária uma longa sequência de dados. Para isso, o sensor foi mantido o mais estável possível por um longo período de tempo coletando dados. Essa sequência foi então dividida em n segmentos de comprimento igual. Cada um desses segmentos corresponde a um tempo de integração τ . A análise inicia com um pequeno tempo de integração, por exemplo, $\tau = 1/f_{aq}$, onde f_{aq} é a frequência de aquisição dos dados. A média dos dados $y(\tau)_i$ é então calculada para cada um desses segmentos. O tempo de integração é sucessivamente incrementado, sempre mantendo o número de segmentos como um número inteiro. Esse procedimento é repetido até que se tenham nove segmentos. O desvio de Allan $\sigma_a(\tau)$ é então calculado para cada tempo de integração τ de acordo com a equação 16. Os resultados para $\sigma_a(\tau)$ são então, plotados em um diagrama log-log.

$$\sigma_a(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_i (y(\tau)_{i+1} - y(\tau)_i)^2} \quad (16)$$

Para pequenos períodos de integração, o desvio de Allan é dominado pelo ruído do sinal. Com o aumento do período de integração, $\sigma_a(\tau)$ decresce devido ao efeito de filtragem. Mas, em algum ponto, $\sigma_a(\tau)$ começa a crescer. Isso é relacionado à chamada “caminhada do bêbado” do sensor, que é a instabilidade inerente na saída do sensor. A instabilidade da tendência é definida no ponto mínimo da curva de $\sigma_a(\tau)$.

Para essa análise, foi utilizada uma sequência de sinal de 10,5 horas e os dados foram transferidos para o Matlab, onde, com um programa desenvolvido pelo orientador, foi possível calcular o Desvio Allan.

3.4.3 Influência da temperatura

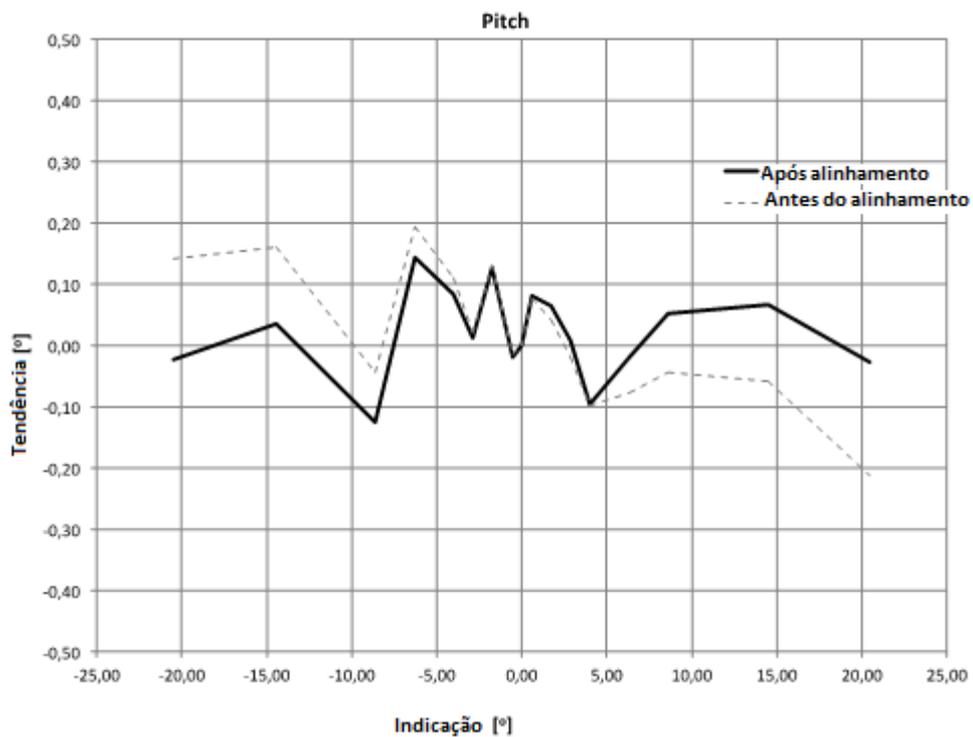
A variação da temperatura devido a mudanças no ambiente e auto aquecimento pode afetar a estabilidade do sensor. Nesse estudo não foi avaliada a influência da variação da temperatura dentro de condições controladas. No entanto, como o desvio do sinal não foi significativo nos dados coletados pela técnica do desvio de Allan, como será mostrado no próximo tópico, foi assumido que a influência da variação da temperatura é desprezível ou compensada internamente.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Tendência e repetitividade (b e δ_{rep})

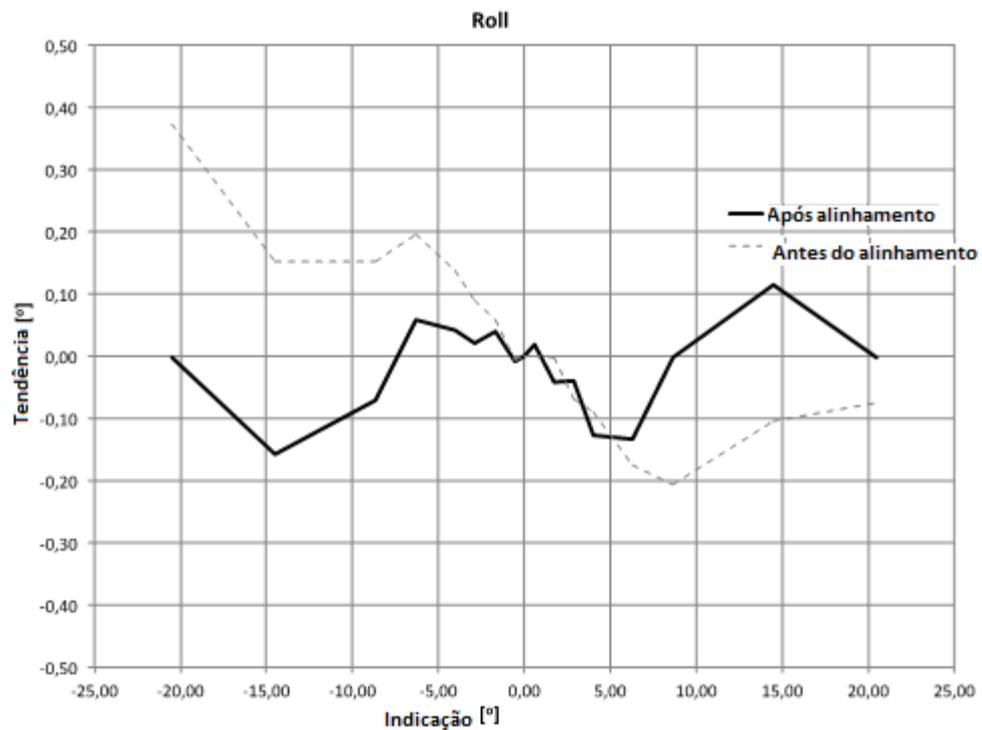
O valor máximo absoluto de tendência foi de $|b| = 0,14^\circ$ para o movimento de pitch e $|b| = 0,16^\circ$ para o movimento de roll. As curvas de tendência para esses dois movimentos podem ser observadas abaixo.

Figura 25: Movimento em pitch



Fonte: próprio autor

Figura 26: Movimento de roll



Fonte: próprio autor

As linhas pontilhadas representam a tendência sem a correção do desalinhamento do sensor e a linha mais escura, após o alinhamento.

Para o teste de repetitividade o desvio padrão s foi baseado no resultado de 20 observações consecutivas. Segue tabela com os resultados.

Tabela 2: Desvio padrão devido a repetitividade

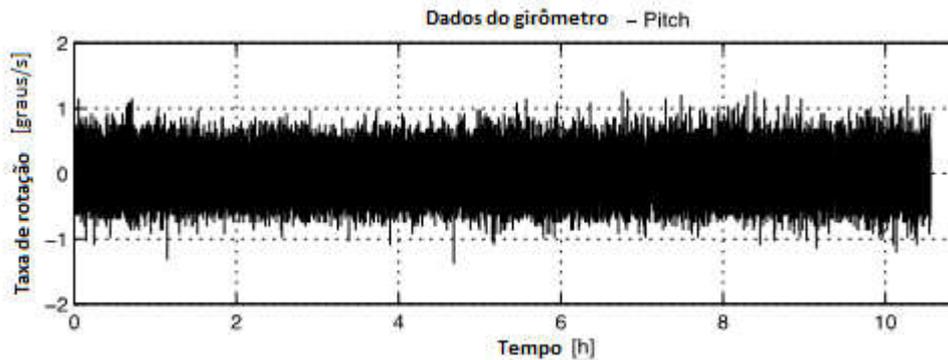
Movimento	Θ [°]	s [°]
Pitch	0,000	0,015
	20,487	0,034
Roll	0,000	0,016
	20,487	0,033

Fonte: próprio autor

4.2 Deriva (δ_{der})

O sinal recebido para o movimento de pitch é mostrado abaixo.

Figura 27: Sinal de pitch

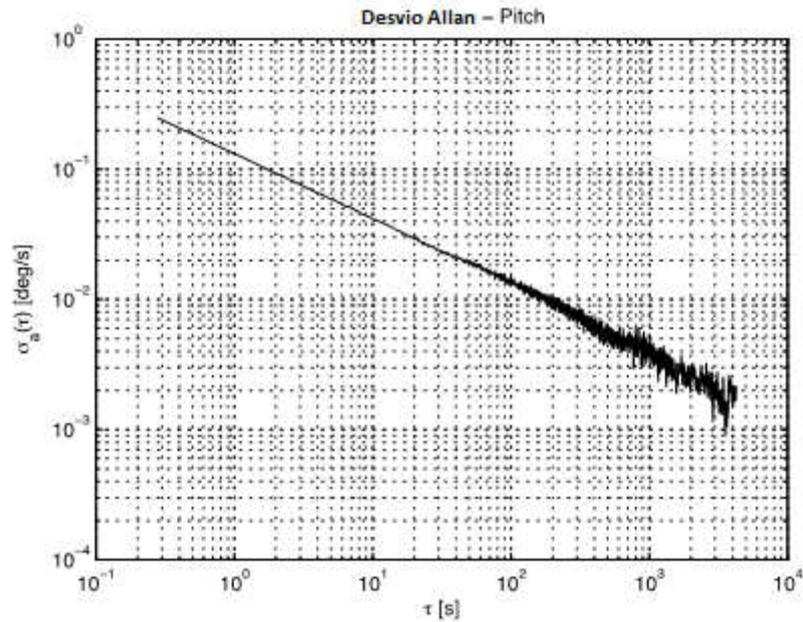


Fonte: próprio autor

Para o movimento de roll, o sinal ficou parecido. O desvio padrão do sinal ao longo desse período foi de 0,25 graus/s para pitch e 0,26 graus/s para roll.

A curva de desvio Allan para o movimento de pitch e de roll também foram similares. O mínimo ponto da curva foi de 9×10^{-4} graus/s ($3,2^\circ/\text{h}$) para $\tau = 3543$ s para o movimento de pitch e 10×10^{-4} graus/s ($3,7^\circ/\text{h}$) para $\tau = 3402$ s para o movimento de roll. Segue curva para o movimento de pitch (Figura 28).

Figura 28: Desvio Allan de pitch

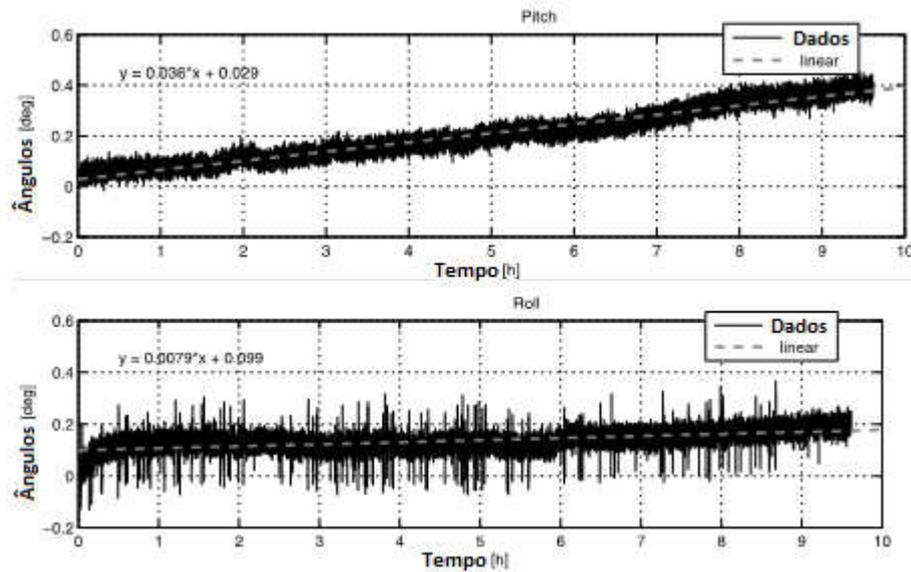


Fonte: próprio autor

Observa-se pela curva que é difícil saber se com esse tempo de aquisição o ponto de inflexão da curva foi alcançado.

Por último, foi avaliada a estabilidade dos dados de ângulo fornecidos pelo sensor monitorando esse parâmetro por aproximadamente 9,5 horas, mantendo o sensor estacionário. Uma deriva média de 0,036 graus/h foi observada para o movimento de pitch e de 0,008 graus/h para o movimento de roll mostrado na figura 29.

Figura 29: Estabilidade dos dados de ângulo



Fonte: próprio autor

Os dados do movimento de roll apresentaram picos de aproximadamente $0,1^\circ$ com espaçamento aparentemente aleatório. A causa desse efeito não pôde ser determinada.

4.3 Incerteza da medição

Como uma variação de temperatura significativa não pôde ser identificada, o modelo da equação 12 foi simplificado, resultando no modelo final do processo de medição a seguir.

$$\theta_{ind} = \theta + \delta_{rep} + \delta_{des} + \delta_{ref} + b \quad (17)$$

As incertezas padrão u relacionadas a esse modelo com seu respectivo número de graus de liberdade v são descritas nas seções 4.3.1 a 4.3.3. O coeficiente de sensibilidade para todas as fontes de incertezas é 1, devido ao fato do modelo ser linear e aditivo.

4.3.1 Incerteza padrão relacionada à repetitividade natural do sensor (u_{rep})

Essa incerteza padrão é igual ao máximo desvio padrão obtido dos experimentos descritos anteriormente, dividido pela raiz quadrada do número de observações (n'), esperado a ser realizado pelo uso regular do sensor. Uma distribuição normal com $v_{rep} = n - 1 = 19$ é

adotada (n é o número de observações usadas para determinar s_{max}). Assumindo $n' = 1$, u_{rep} é dado pela equação 18 a seguir.

$$u_{rep} = \frac{s_{max}}{\sqrt{n'}} = 0,034^\circ \quad (18)$$

4.3.2 Incerteza padrão relacionada à deriva do sinal (u_{der})

O sinal de posição angular de um girômetro irá derivar devido à tendência instável ou incorreta, erros de calibração e devido a ruídos no sinal da taxa de rotação. Em vez de considerar cada uma dessas causas separadamente, nós adotamos uma abordagem empírica. O máximo desvio médio do sinal angular observado na figura 28 foi usado. Essa abordagem apresenta a vantagem de ser simples, mas há o risco de subestimar a fonte de incerteza, já que considera apenas erros que são observados em condições estáticas.

Uma distribuição uniforme com $v_{der} = \infty$ é assumida. A incerteza padrão é calculada de acordo com a equação 19 a seguir, onde t é o tempo, em horas, no qual o sensor é usado sem submeter-se a um procedimento de referência.

$$u_{der} = \frac{der_{max}.t}{\sqrt{3}} = (0,021.t)^\circ \quad (19)$$

4.3.3 Incerteza padrão relacionada ao sistema de referência (u_{ref})

A incerteza do ângulo gerado pela mesa de senos depende da incerteza dos blocos padrão e a incerteza dos parâmetros geométricos da mesa de senos – distância entre cilindros e altura de nivelamento. A incerteza expandida do sistema de referência, para uma probabilidade de abrangência de 95,45%, foi estimada em $U_{ref} = 0,007^\circ$ (probabilidade de abrangência de 95,45%, $k = 2$). Uma distribuição normal com $v_{ref} = \infty$ foi assumida. A incerteza é calculada de acordo com a equação a seguir.

$$u_{ref} = \frac{U_{ref}}{2} = 0,004^\circ \quad (20)$$

4.3.4 Incerteza padrão combinada (u_c), grau de liberdade efetivo (v_{eff}) e incerteza expandida (U)

A incerteza padrão combinada é dada pela equação 21.

$$u_c^2 = u_{rep}^2 + u_{der}^2 + u_{ref}^2$$

$$u_c = \sqrt{0,0012 + 0,00044 \cdot t^2} \quad (21)$$

O grau de liberdade efetivo v_{eff} é estimado pela equação de Welch-Satterthwaite abaixo. Há uma correlação direta entre v_{eff} e o tempo de medição t . Nós usamos um t relativamente pequeno de 0,1 h, que irá resultar em um v_{eff} menor e, conseqüentemente, em um coeficiente de abrangência k e uma incerteza expandida U maior.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{u_i^4}{v_i}}$$

$$v_{eff} = 20 \quad (22)$$

A incerteza medida expandida U é dada pela equação 23. O coeficiente de abrangência correspondente a $v = 20$ e uma probabilidade de cobertura de 95,45% corresponde a $k = 2,13$.

$$U = k \cdot u_c \quad (23)$$

$$U = 2,13 \cdot \left(\sqrt{0,0012 + 0,00044 \cdot t^2} \right)^\circ$$

O erro máximo é calculado de acordo com a equação 24, resultando na equação a seguir.

$$E_{max} = U_{max} + |b|_{max} \quad (24)$$

$$E_{max} = 2,13 \cdot \left(\sqrt{0,0012 + 0,00044 \cdot t^2} \right)^\circ + 0,16$$

Para um tempo de medição de $t = 1$ h, o erro máximo arredondado para uma casa decimal foi de $E_{max} = 0,3^\circ$.

5. ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso, foi utilizado um modelo de embarcação emprestado pela equipe “*Holandês Voador*” do projeto DUNA (Desafio Universitário de Nautimodelismo) da UFSC-Joinville.

Antes de iniciar os testes, foi necessário corrigir o trim e a banda da embarcação que se encontravam maiores que o permitido, conforme descrito na seção 2.5 da revisão bibliográfica. Para isso foram utilizados pesos disponibilizados no laboratório pela equipe BAJA-CEM, como mostra a figura a seguir.

Figura 30: Pesos adicionados para estabilização



Fonte: próprio autor

Para a criação de banda da embarcação, foram utilizados pesos de chumbo de pesca, como mostra a figura 31. As massas dos pesos foram determinadas em laboratório utilizando uma balança digital.

Figura 31: Pesos



Fonte: próprio autor

Figura 32: balança calibrada



Fonte: próprio autor

Tendo tudo preparado para o teste, foi colocado o equipamento contendo girômetro dentro de uma caixa de plástico para evitar contato com a água. O dispositivo disponível para

esse estudo era um iPod Touch utilizando o mesmo sistema operacional e o mesmo girômetro do iPhone utilizado para os testes metrológicos.

Para o teste, foi necessário apenas dois pesos deslocarem para alcançar a banda desejada de quase 4°. Primeiro, os pesos foram distribuídos na linha de centro da embarcação.

Figura 33: Pesos no centro da embarcação



Fonte: próprio autor

Depois os pesos foram movimentados para boreste.

Figura 34: Primeiro peso deslocado



Fonte: próprio autor

Figura 35: Segundo peso deslocado



Fonte: próprio autor

O mesmo foi feito para bombordo e os dados foram então coletados. O primeiro peso tinha 105,73 g e o segundo 99,04 g. Segue tabela mostrando a banda criada pela movimentação do peso.

Tabela 3: Banda devido à movimentação de pesos

Movimento	Peso total deslocado (g)	Banda (θ)
centro	0	0,32° para bombordo
1 para bombordo	105,73	1,52°
2 para bombordo	204,77	3,01°
centro	0	0,20° para boreste
1 para boreste	105,73	1,52°
2 para boreste	204,77	2,62°

Fonte 2: próprio autor

Sendo assim, o cálculo de GM e posteriormente o cálculo do lastro para alcançar a estabilidade e o calado desejado da embarcação pode ser desenvolvido. Como o desenvolvimento desse estudo de caso visa demonstrar o sensor funcionando e não se aprofunda no estudo de estabilidade de embarcações, GM não será calculada.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma avaliação metrológica de um sensor inercial de baixo custo contido em um celular. Utilizando um celular iPhone 5, os dados coletados durante os testes foram transferidos para um notebook via WiFi usando o protocolo OSC (Open Sound Control). Para isso, foi utilizado o aplicativo GyrOSC, disponível comercialmente. Com esse aplicativo, é possível transmitir os dados dos vários sensores do Iphone com uma frequência de amostragem de 40 Hz.

Com isso em mãos, foi realizado em laboratório, utilizando uma mesa de senos, o teste de tendência e de repetitividade e depois, com o celular parado, foi realizado um teste de estabilidade de tendência.

Os resultados foram mais que satisfatórios para um sensor de baixo custo como o estudado, apresentando um erro aparentemente baixo.

Assim, esse girômetro pôde ser utilizado na prática para fazer um teste de inclinação em um modelo de embarcação na universidade.

Este trabalho foi feito com a intenção de reduzir os custos e o tempo para os testes de inclinação realizados em embarcações. Além do baixo custo, o uso dos sensores integrados em dispositivos com smartphones, tablets apresentam a vantagem de permitir a transmissão de dados sem fio, possibilitando o monitoramento remoto dos resultados de medição.

7. BIBLIOGRAFIA

BUDZINSKI, João Augusto Scheid. **Acelerômetros**. Disponível em <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/1999/joao/>. Acessado em 10 de abril de 2014.

FORHAN, Neisy Amparo Escobar. **Giroscópios MEMS**. Relatório técnico-científico de pesquisa supervisionado por Paulo Giacomio Milani e José Roberto Sbragia Senna. Ministério da Ciência e Tecnologia. INPE. 2010.

GROVES, Paul D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems**. GNSS Technology and Applications. Artech House Boston/London. 2008.

JUANG, Jeng-Nan. **Evaluation of Ring Laser and Fiber Optic Gyroscope Technology**. Paper from School of Engineering, Mercer University. 2009.

KILHIAN, Kleber. **O Pêndulo de Foucault**. Disponível em <http://obaricentrodamente.blogspot.com.br/2011/06/o-pendulo-de-foucault.html>. Acessado em 15 de maio de 2014.

KUMAR, Bharat. **Illustrated Dictionary of Aviation**. The McGraw-Hill Companies. 2005.

LAWRENCE, Anthony. **Modern Inertial Technology, Navigation, Guidance, and Control**. 2ª Edição. Springer. 1998.

LIMA, Sandro R. Soares. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Curitiba. 2005.

MAGNO, Francisco Luís. **Concepção de um Pequeno Sensor Inercial 3D Morgado**. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro. Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática. 2009.

MARTINS, Marcelo Ramos. **PNV2341 Hidrostática e Estabilidade**. Notas de Aula da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. 2010.

PARANHOS, Patrick Merz Paranhos. **Localização em Ambientes Externos através da Fusão de Sensores GPS e Inercial por um Filtro de Kalman**. Dissertação apresentada à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2009.

PETERSEN, Kurt E. **Silicon as a Mechanical Material**. Proceedings of the IEEE, Vol 70, No. 5. Maio, 1982.

PINHEIRO, Márcio Soares. **Prova de Inclinação**. 1º Trabalho de Arquitetura Naval II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Janeiro/2002

PLEIL, Matthias. **Hystory of MEMS**. Primary Knowledge. Shareable Content Object. Part of the Learning Module. University of New Mexico. 2011.

PRIME, Faraday Partnership. **An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)**. Paperback Technology Watch. January 2002.

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

RIBAS, Renato P. **Microsistemas Integrados (MEMS)**. Trabalho para o Instituto de Informática – UFRGS. 2011.

WOODMAN, Oliver J. **An introduction to inertial navigation**. Technical Report. Number 696. University of Cambridge. 2007.