

UNIVERSIDADE PAULISTA

UNIP

# **DETERMINAÇÃO DE VERTICALIDADE UTILIZANDO IMU MEMS**

AUTOR:

**RAFAEL JOSÉ MOTA OCARIZ**

**MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DO CURSO DE  
ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO**

ORIENTADOR:

**PROFESSOR DOUTOR ROGÉRIO MOREIRA CAZO**

São José dos Campos, 23 de junho de 2016.

RAFAEL JOSÉ MOTA OCARIZ

# **DETERMINAÇÃO DE VERTICALIDADE UTILIZANDO IMU MEMS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel do curso de Engenharia da Computação da Universidade Paulista, UNIP, no campus de São José dos Campos.

Orientador: Professor Doutor Rogério Moreira Cazo

São José dos Campos, 23 de junho de 2016.

**Autor:** Rafael José Mota Ocariz

**Título:** Determinação de verticalidade utilizando IMU MEMS

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel do curso de Engenharia da Computação da Universidade Paulista, UNIP, no campus de São José dos Campos.

Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.				
	Nome	Titulação	Assinatura	Instituição
1	Nome	Prof.		
2	Nome	Prof.		
3	Rogério Moreira Cazo	Prof. Dr.		

Data da aprovação: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico este trabalho à minha família e aos meus  
amigos que sempre me apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço primeiramente a DEUS por ser o pilar principal na minha vida, também aos meus pais e colegas que me apoiaram durante esta jornada e ao professor Rogério Moreira Cazo pelas suas orientações, incentivos e colaborações para a conclusão desta pesquisa.*

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem  
perder o entusiasmo.”*  
**Winston Churchill**

## **RESUMO**

Determinar o sentido vertical é essencial em foguetes, robôs bípedes, aviões, carros inteligentes e mapeamento topográfico, por exemplo. O corpo humano determina essa variável instintivamente, facilmente observável durante o caminhar ou o simples ato de ficar em pé, quando o corpo se posiciona no sentido vertical e em equilíbrio. Calcular com precisão tal informação é de suma importância a fim de garantir a qualidade do produto final. Foi exatamente esta necessidade, além da imprescindibilidade de se obter um baixo custo final, que deu origem a pesquisa contida neste documento. Durante o documento são detalhadas a motivação, o objetivo geral e objetivos específicos, os materiais e métodos utilizados, todo o projeto de engenharia e os ensaios e resultados. O sensor inercial utilizado é um MPU-6050 que contém em sua estrutura um acelerômetro de três eixos, um girômetro de três eixos e um sensor de temperatura. Apenas para fins de apresentação está sendo utilizada uma tela LCD touch de 3,2” que imprime uma aplicação com gráfico customizado.

**Palavras-chave:** verticalidade, sensor inercial, acelerômetro, girômetro.

## **ABSTRACT**

Determine plumb is essential in rockets, biped robots, airplanes, intelligent cars and topography mapping, for example. The human body determine this variable instinctively, easily observable during walking or the simple act of standing, when the body is positioned vertically and in balance. Calculate with precision this information is very important to ensure the quality of the final product. It was precisely this necessity, in addition to the indispensability to obtain a low final cost, which led the research contained in this document. During the document are detailed the motivation, general objective and the specifics objectives, the materials and methods used, all the engineering project, the tests and the results. The inertial sensor used is the MPU-6050 who contains inside him an accelerometer and a gyro, both triaxial, and a temperature sensor. Only for presentation is being used a 3,2" LCD touchscreen to print an application with custom graphics.

**Passwords:** plumb, inertial sensor, accelerometer, gyro.



## **LISTA DE ILUSTRAÇÕES**

## **LISTA DE TABELAS**

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DMP	Digital Motion Processor ou Processador Digital de Movimento.
GNSS	Global Navigation Satellite System ou Sistema Global de Navegação de Satélite.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers ou Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica.
IMU	Inertial Measurement Unit ou Unidade de Medidas Inerciais.
MCM	Multi-chip module ou Módulo multi-chip.
MEMS	Micro Electro-Mechanical Systems ou Micro Sistemas Eletromecânicos.
MUV	Movimento Uniformemente variado (aceleração fixa).
MV	Movimento Variado (aceleração variável).
QFN	Quad Flat No leads
ZMP	Zero-Moment Point ou Ponto de Momento Nulo/Zero.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
1.1.	Contextualização do problema .....	13
1.2.	Definição dos requisitos .....	13
1.3.	Objetivo geral .....	13
1.4.	Objetivo Específico .....	13
1.5.	Trabalhos relacionados .....	14
1.6.	Fundamentação teórica .....	14
2.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	16
2.1.	Metodologia .....	16
2.1.1.	Ensaaios .....	16
2.1.2.	Equipamentos de ensaios .....	16
2.2.	MPU-9250 .....	16
2.3.	Girômetro .....	16
2.4.	Acelerômetro .....	16
2.5.	Magnetômetro .....	16
2.6.	Sensor de Temperatura .....	16
2.7.	Andruíno .....	16
2.8.	Tela LCD .....	16
2.9.	IDE .....	16
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17
	ANEXO A .....	18

## 1. INTRODUÇÃO

O ser humano determina a verticalidade através sensação gerada pela gravidade e isso ocorre de forma instintiva, permitindo-o manter-se equilibrado parado e em movimento.

A pesquisa descrita neste documento visa definir a verticalidade através de leituras de dados sensoriais, reduzindo ruídos e fornecendo dados mais precisos ao usuário a respeito do desvio quanto ao sentido vertical.

No decorrer do capítulo serão descritos os objetivos a serem atingidos, toda a base teórica necessária e alguns trabalhos relacionados que foram ou que estão sendo realizados.

### 1.1. Contextualização do problema

Afim de expor o problema a ser tratado durante o trabalho deve-se deixar claro suas origens.

Antes desta pesquisa ter início estava sendo desenvolvido um sistema para determinar o ZMP, descrito por Miomir Vukobratović e Branislav Borovac em seu artigo Zero-Moment Point – Thirty Five Years of its Life publicado em 2004 pelo International Journal of Humanoid Robotics como o ponto onde todas as forças agentes no mecanismo de movimentação de um robô bípede podem ser substituídas por apenas uma. Um dos requisitos para determinar o ZMP é controlar também a postura do robô. Tal necessidade inviabilizou o projeto de sistema de determinação de ZMP, pois como já citado foi definido o pré-requisito de se obter ou desenvolver um sistema de determinação e controle de postura.

Seguindo esta nova abordagem começou-se a pensar neste novo sistema. Seguindo as fases genéricas de um gerenciamento de projeto iniciou-se um trabalho na engenharia de requisitos e nesta etapa surgiu o problema a ser resolvido com a pesquisa contida neste documento: segundo Zhijun Li em seu artigo publicado em 2012 é necessário um sistema de determinação de verticalidade afim de determinar a postura do robô.

### 1.2. Definição dos requisitos

O sistema desenvolvido nesta pesquisa deve ser capaz de determinar a verticalidade local em posição estática ou em movimento, a temperaturas entre 0°C e 50°C e com um erro de até 0,1° ou aproximadamente  $1,74 \times 10^{-3}$  radianos. O sistema de coordenadas deve ser Norte para Z, Cima para X e Leste para Y.

### 1.3. Objetivo geral

A pesquisa detalhada neste documento tem por objetivo geral apresentar um sistema de determinação de verticalidade utilizando IMU MEMS.

### 1.4. Objetivo Específico

Para atingir o objetivo geral da pesquisa foram listados alguns objetivos específicos cujo cumprimento individual é de suma importância. Estes objetivos são:

- Especificar, projetar e construir uma IMU MEMS suficiente para atender ao projeto;
- Elaborar código em C para Arduino MEGA 2560 para tratar as medições dos sensores e imprimir em unidades de engenharia em console no computador;

- Realizar ensaios de caracterização dos acelerômetros, girômetros e termômetro e aplicar a variância de Allan afim de corrigir e filtrar os dados medidos e remover ruídos;
- Programar Código de determinação de variação quanto ao sentido vertical;
- Realizar testes e obter resultados positivos quanto a determinação do sentido vertical durante Movimentos Variados (MV) e Movimentos Uniformemente Variados (MUV);
- Programar interface gráfica para apresentação.

### 1.5. Trabalhos relacionados

Foram selecionados alguns trabalhos realizados em áreas correlatas ou que foi definido algo semelhante ao sistema aqui definido como requisito.

Um destes trabalhos é o realizado por Mahzad Kalantari e sua equipe, publicado em 2010 e que tem o título de A New Solution to the Relative Orientation Problem Using Only 3 Points and the Vertical Direction. No decorrer do trabalho, mais precisamente no capítulo 3 ele calcula a direção vertical por meio de imagens obtidas por câmeras.

Outro trabalho é o realizado por T. Viéville e sua equipe em 1993, intitulado Computation of Ego-motion and Structure from Visual and Inertial Sensors Using the Vertical Cue. Nesse trabalho o método utilizado para definir a orientação do sentido vertical é semelhante ao proposto na pesquisa detalhada neste documento.

Um terceiro, último e mais recente trabalho relacionado a ser citado é o feito por Emel'yantesev e equipe em 2015 com o tema Vertical Deflection Determination in High Latitudes Using Precision IMU and two-Antenna GNSS System. Logo na introdução Emel'yantesev já define seu conceito de sentido vertical e métodos para um cálculo muito mais preciso que o proposto neste documento, porém para aplicação em satélites.

### 1.6. Fundamentação teórica

Verticalidade é definida pelo dicionário da língua portuguesa como a qualidade do que é vertical ou se encontra nessa posição, logo determinar a verticalidade é, por dedução simples, determinar se o corpo ou eixo a ser determinado, está posicionado no sentido vertical.

Vertical em rápido exemplo, pode ser a linha de prumo usada pelos pedreiros ou a imaginária, alinhada exatamente como a linha de direção da força da gravidade e o prumo, e consequentemente perpendicular ao horizonte (preferencialmente) marítimo, considerando-o um referencial sobre a terra ou corpos semelhantes. Devido a curvatura da terra a vertical só poderá ser definida pelo homem em relação ao espaço esférico a sua volta e a força gravitacional que mantém o observador na vertical, porém no centro de seu campo de visão. Nesse sentido, a vertical é uma única linha imaginária que se pudesse ser vista por observadores localizados em pontos diferentes, tanto poderia ser uma curva como uma linha reta. Para o observador externo a vertical do observador interno é vista como sendo uma curva com (1/4 de círculo) que vai do horizonte (ou chão) a cabeça dele. Para o observador interno porém, essa linha é visto como uma reta que sai do horizonte para o ponto no zênite exatamente acima de sua cabeça. (Wikipedia, 2013)

Partindo da definição acima, neste trabalho, o sentido vertical será considerado como a orientação de atuação da força gravitacional, ou seja, o sentido e direção do vetor aceleração da gravidade.

Para determinar o sentido vertical será utilizada uma IMU construída a partir do MPU-9250 que será detalhado mais adiante neste documento.

Por ponto de referência pode ser entendido como um ponto no espaço que servirá de origem para calcular posição e rotação de um corpo (Davis, 2008). Como navegação não é um dos itens a serem tratados nesta pesquisa então o ponto de referência será sempre local, ou seja, no centro de medição da IMU e respeitando os três eixos fixos conforme definido no subcapítulo 1.2.

“Uma Unidade de Medição Inercial (IMU) é um dispositivo que utiliza sistemas de medição como girômetros e acelerômetros para estimar a posição relativa, velocidade e aceleração de um veículo em movimento” (Siciliano, et al., 2008).

No decorrer do documento será explanado o que são e como funcionam acelerômetros, girômetros e magnetômetros, deixando mais claro como serão obtidos os valores aplicados nas equações a seguir.

Para determinação da verticalidade em um estado estático, ou seja, quando o corpo a ser medido estiver com velocidade e aceleração nula, será utilizado apenas o triedro acelerométrico e o magnetômetro. Em estado dinâmico, ou seja, com aceleração diferente de zero, a verticalidade será determinada a partir dos dados fornecidos pela tríade girométrica.

A representação da variação quanto à verticalidade será feita por meio do uso de ângulos de Euler.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Não será possível dar prosseguimento à pesquisa sem antes definir os materiais e os métodos utilizados para montagem, testes e validação do sistema proposto. O foco principal deste capítulo é detalhar e justificar cada um dos materiais, processos, testes e equipamentos que serão utilizados.

### **2.1. Metodologia**

#### **2.1.1. Ensaios**

#### **2.1.2. Equipamentos de ensaios**

### **2.2. MPU-9250**

Segundo o datasheet do MPU-9250 (InvenSense, 2014), é um MCM que possui um girômetro tri-axial, um acelerômetro tri-axial e o magnetômetro tri-axial modelo AK8963 da fabricante Asahi Hasei Corp integrados em um único pacote QFN. Além dos três sensores inerciais há também um sensor de temperatura embarcado no pacote do módulo. Este MPU conta também com a tecnologia DMP que tem a função de efetuar todos os cálculos de rastreamento de movimento e fornecer ao processador principal os dados já tratados para serem utilizados na aplicação. Esta tecnologia não será utilizada nesta pesquisa, porém será utilizada posteriormente para comparação dos resultados obtidos. Mais informações a respeito deste componente está no Datasheet do MPU-9250 que está contido no ANEXO A.

#### **2.3. Girômetro**

#### **2.4. Acelerômetro**

#### **2.5. Magnetômetro**

#### **2.6. Sensor de Temperatura**

#### **2.7. Andruíno**

#### **2.8. Tela LCD**

#### **2.9. IDE**



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davis, Donnette. 2008.** *Studying the Sciences, Physics - Grades 10-12*. Raleigh : Lulu Press, Inc, 2008. ISBN 978-1-326-20296-9.
- Emel'yantsev, G. I., Blazhnov, B. A. e Stepanov, A. P. 2015.** Vertical Deflection Determination in High Latitudes Using Precision IMU and Two-Antenna GNSS System. *Gyroscopy and Navigation*. 2015, Vol. 6, 4.
- InvenSense. 2014.** MPU-9250 Product Specification. 2014. Vol. 1. PS-MPU-9250A-01.
- Kalantari, Mahzad, et al. 2011.** A New Solution to the Relative Orientation Problem Using Only 3 Points and the Vertical Direction. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*. 2011, 39.
- Li, Zhijun e Ge, Shuzhi Sam. 2012.** Balancing and Posture Controls for Biped Robots with Unmodelled Dynamics. [A. do livro] Chun-Yi Su, Subhash Rakheja e Honghai Liu. *Intelligent Robotics and Applications*. Montreal : Springer, 2012, Vol. 7506.
- Siciliano, Bruno e Khatib, Oussama. 2008.** *Handbook of Robotics*. Berlin : Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
- Viéville, T., Clergue, E. e Facao, P.E.D.S. 1993.** Computation of ego-motion and structure from Visual and Inertial Sensors Using the Vertical Cue. *IEEE*. 1993.
- Vukobratović, Miomir e Borovac, Branislav. 2004.** Zero-Moment Point - Thirty Five Years of its life. *International Journal of Humanoid Robotics*. 2004, Vol. 1.
- Wie, Bong. 2008.** *Space Vehicle Dynamics and Control - Second Edition*. Ames : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008. ISBN 978-1-56347-953-3.
- Wikipedia. 2013.** Vertical. *Wikipédia, a enciclopédia livre*. [Online] 28 de março de 2013. [Citado em: 23 de junho de 2016.] <https://pt.wikipedia.org/wiki/Vertical>.

**ANEXO A**

Colocar aqui o Datasheet do MPU-9250.