



**EDUARDO ZAMPIERI RIBEIRO**

**ESTUDO DA RECONSTRUÇÃO DE TRAJETÓRIAS  
BASEADO EM SENSORES INERCIAIS DE BAIXO CUSTO NO  
CONTEXTO DE MOBILIDADE TERRESTRE**

**LAVRAS – MG  
2017**

**EDUARDO ZAMPIERI RIBEIRO**

**ESTUDO DA RECONSTRUÇÃO DE TRAJETÓRIAS BASEADO EM SENSORES  
INERCIAIS DE BAIXO CUSTO NO CONTEXTO DE MOBILIDADE TERRESTRE**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Sistemas e  
Automação, área de  
concentração em Engenharia de  
Sistemas e Automação, para a  
obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Arthur de Miranda Neto

Orientador

Dr. Fernando Pujaico Rivera

Coorientador

**LAVRAS-MG**

**2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ribeiro, Eduardo Zampieri.

Estudo da reconstrução de trajetórias baseado em sensores inerciais de baixo custo no contexto de mobilidade terrestre / Eduardo Zampieri Ribeiro. - 2017.

69 p. : il.

Orientador(a): Arthur de Miranda Neto.

Coorientador(a): Fernando Pujaico Rivera.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Smartphones. 2. Sensores inerciais. 3. Nyquist. I. Miranda Neto, Arthur de. II. Rivera, Fernando Pujaico. III. Título.

**EDUARDO ZAMPIERI RIBEIRO**

**ESTUDO DA RECONSTRUÇÃO DE TRAJETÓRIAS BASEADO EM SENSORES  
INERCIAIS DE BAIXO CUSTO NO CONTEXTO DE MOBILIDADE TERRESTRE**

**STUDY OF TRAJECTORIES RECONSTRUCTION BASED ON LOW COST  
INERTIAL SENSORS AND APPLIED TO TERRESTRIAL MOBILITY CONTEXT**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Sistemas e  
Automação, área de  
concentração em Engenharia de  
Sistemas e Automação, para a  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 11 de outubro de 2017.

Dr. Danilo Alves de Lima UFLA

Dr. Fernando Pujaco Rivera UFLA

Dr. Giovani Bernardes Vitor UNIFEI

Prof. Dr. Arthur de Miranda Neto

Orientador

Dr. Fernando Pujaco Rivera

Co-orientador

**LAVRAS-MG**

**2017**

## RESUMO

Ao se realizar a localização de um indivíduo torna-se possível exercer diversas tarefas no que diz respeito ao conceito de mobilidade, viabilizando uma maior gama de possibilidades relacionadas à infraestrutura e serviços de uma cidade, em destaque os voltados aos Sistemas de Transportes Inteligentes. Este trabalho propõe uma metodologia de auxílio na reconstrução e identificação de trajetórias, tendo como referência sensores inerciais a baixo custo. A proposta contempla a preparação do sinal da aceleração para a etapa de dupla integração, a fim de se obter o deslocamento nos eixos de medição. Para a preparação do sinal utilizou-se filtros digitais do tipo FIR e valores médios ao longo de uma janela temporal. Tendo em vista evitar erros ao se realizar a dupla integração, devido a certas “contaminações” (ruídos e *offset*) que tendem a permanecer nos sinais mesmo após a utilização de filtros, foi proposta uma função denominada detector de pausas. Esta é executada juntamente com todo o sistema, tendo por objetivo zerar a velocidade na integração, e por consequência pausar o deslocamento tão logo uma pausa é detectada. Uma análise da qualidade dos dados retornados pelos sensores e dos resultados obtidos é realizada, bem como a observação das consequências ao se respeitar, ou não, a definição do Teorema da amostragem de Nyquist. Ao final, foram propostas soluções para possíveis melhoras dos resultados obtidos, a partir da utilização de *splines* cúbicos. Por fim, algumas considerações são apresentadas sobre as condições tecnológicas atuais dos sensores embarcados em *Smartphones*.

**Palavras-chave:** Smartphones. Sensores inerciais. Trajetórias. Nyquist.

## ABSTRACT

The localization of a person allows to perform several tasks with regard to the concept of mobility. It enables a greater range of possibilities related to infrastructure and services in a city, in particular concerning the Intelligent Transportation Systems. This work proposes a methodology for reconstruction and identification of trajectories, using low cost inertial sensors. The proposal includes the preparation of the acceleration signal for a double integration stage, in order to obtain the displacement in the measuring axes. For the signal conditioning, we have used a FIR type digital filters and the mean values along a time window. In view of avoid errors in performing the double integration, due to certain "contaminations" (noises and offset) that tend to remain in the signals even after the use of filters, a function called pause detector was proposed. This function is performed together with the whole system, aiming to zero the speed in the integration, and consequently to pause the displacement as soon as a pause is detected. An analysis of the quality of the data returned by the sensors and the results obtained is carried out, as well as an observation of the consequences of respecting or not the definition of Nyquist's Theorem. After that, we have proposed a solution for improve the results by using a cubic splines.

**Keywords:** Smartphones. Inertial sensors. Trajectories. Nyquist.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do sistema de referencial ECI. ....	13
Figura 2 – Representação dos sistemas referenciais NED e ECEF. ....	14
Figura 3 – Representação do sistema de referencial RPY. ....	15
Figura 4 – Rotação $\theta$ dos eixos coordenados em torno de $ew$ . ....	18
Figura 5 – Rotação $\theta$ de um vetor $v$ em torno de $w$ . ....	19
Figura 6 – Diagrama esquemático de um filtro FIR. ....	20
Figura 7 - Situação onde aplicação de spline é superior aos polinômios de grau elevado. ....	22
Figura 8 - Diagrama de fluxo proposto. ....	32
Figura 9 – Sistemas de coordenadas na base canônica e base nova. ....	34
Figura 10 - Acelerações nos 3 eixos de medição. ....	37
Figura 11- Trajetória 4 obtida com o diagrama proposto. ....	37
Figura 12- Trajetória 4 obtida com aceleração linear. ....	38
Figura 13 – Interpolação spline entre dois pontos com um polinômio de grau 3 (a) usando duas amostras e duas condições de contorno (b) usando quatro amostras. ....	49
Figura 14 - Trajetória com o sinal simulado. ....	50
Figura 15 - Conjunto de dados ideal. ....	51
Figura 16 - Sinal gerado utilizando Smartphone. ....	51
Figura 17 - Trajetória com o sinal do Smartphone. ....	52
Figura 18 - Trajetória com retirada de amostras do sinal simulado. ....	53
Figura 19 - Trajetória com a aplicação de splines. ....	54
Figura 20 - Intervalos com perda de informações. ....	55
Figura 21 - Comparativo do sinal original com o sinal após aplicação do método spline. ....	55
Figura 22 - Comparativo de trajetórias obtidas em queda livre com o sinal original e o sinal utilizando-se o método spline. ....	56
Figura 23 - Comparativo das componentes do sinal em frequências maiores e menores que 50 Hz. ....	57
Figura 24 - Espectrograma do sinal adquirido durante uma caminhada. ....	58
Figura 25 - Frequências atingidas pelo sinal. ....	58
Figura 26 - Smartphone utilizado nos experimentos, modelo Moto G4 Plus e seu sistema de coordenadas. ....	63
Figura 27 - Sistema de referência de Smartphones. ....	64
Figura 28 - Invensense MPU - 6050. ....	65
Figura 29 - Montagem do conjunto: Raspberry Pi + MPU – 6050. ....	66
Figura 30 - Módulo detector de pausas 1 ....	67
Figura 31 - Módulo detector de pausas 2 ....	68

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 1 – Introdução Geral</b> .....	9
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b> .....	10
<b>1.2</b>	<b>Objetivo</b> .....	11
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
<b>2.1</b>	<b>Sistemas de coordenadas utilizados na navegação inercial</b> .....	12
<b>2.2</b>	<b>Sensores</b> .....	15
<b>2.2.1</b>	<b>Acelerômetro</b> .....	15
<b>2.2.2</b>	<b>Girômetro</b> .....	15
<b>2.2.3</b>	<b>Calibração de sensores inerciais</b> .....	16
<b>2.3</b>	<b>Matrizes de transformação</b> .....	16
<b>2.3.1</b>	<b>Matrizes de transformação com uso do sensor girômetro</b> .....	17
<b>2.4</b>	<b>Filtros</b> .....	19
<b>2.4.1</b>	<b>FIR</b> .....	20
<b>2.4.1.1</b>	<b>Filtros passa-baixa e passa-alta</b> .....	20
<b>2.5</b>	<b>Splines</b> .....	21
<b>2.5.1</b>	<b>Splines cúbicos</b> .....	22
<b>2.6</b>	<b>Aplicações com sensores inerciais em Smartphones</b> .....	23
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	24
	<b>CAPÍTULO 2 – Estudo da Geração de Trajetórias Baseado em Sensores Inerciais a Baixo Custo: Aplicação em Sistemas Inteligentes de Transporte</b> .....	26
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	29
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	31
<b>2.1</b>	<b>Fundamentação teórica</b> .....	31
<b>2.2</b>	<b>Descrição do sistema</b> .....	31
<b>2.2.1</b>	<b>Módulo calibração</b> .....	33
<b>2.2.2</b>	<b>Módulos detectores de pausas</b> .....	33
<b>2.2.3</b>	<b>Aquisição dos dados</b> .....	33
<b>2.2.4</b>	<b>Alinhamento do dispositivo</b> .....	34
<b>2.2.5</b>	<b>Métodos de filtragem</b> .....	35
<b>2.2.6</b>	<b>Integração</b> .....	36
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	36



4	CONCLUSÃO .....	39
	REFERÊNCIAS .....	41
	<b>CAPÍTULO 3 – O Teorema da Amostragem de Nyquist Aplicado à Geração de Trajetórias Baseado em Sensores Inerciais a Baixo Custo.....</b>	<b>42</b>
1	INTRODUÇÃO .....	45
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.1	Dados reais .....	47
2.2	Dados teóricos .....	47
2.3	Plataforma Raspberry Pi.....	48
2.4	Interpolação de dados .....	48
2.5	Descrição do método de interpolação .....	48
2.5.1	Interpolação por spline .....	48
2.5.2	Splines cúbicos .....	49
2.6	Obtenção de dados.....	50
2.6.1	Criando dados ideais .....	50
2.6.2	Obtendo dados reais.....	51
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
3.1	Efeitos da sub amostragem sobre dados ideais.....	52
3.2	Efeitos da sub amostragem sobre dados reais .....	54
3.3	Verificação da frequência de amostragem mínima necessária utilizando a Plataforma Raspberry Pi.....	56
4	CONCLUSÃO .....	59
	REFERÊNCIAS .....	61
	ANEXO A – Hardware .....	63
1	Smartphone Moto G4 Plus .....	63
1.1	Sistema operacional Android .....	63
2	Raspberry Pi (C) 2011 e Invensense MPU-6050.....	64
	ANEXO B – Fluxogramas dos módulos detectores de pausas .....	67

## **CAPÍTULO 1 – Introdução Geral**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Sistemas Inteligentes de Transporte (do inglês *Intelligent Transportation Systems – ITS*) tratam-se de um conjunto de soluções tecnológicas e de informação que tem como objetivo trazer benefícios aos seus usuários. Tais soluções relacionam-se com o conceito de mobilidade, de forma que, ao serem inseridas aos sistemas de transportes de uma cidade, tendem a gerar um aumento na eficiência operacional destas (PEREIRA, 2007). A localização de pedestres e veículos é peça chave neste processo, por exemplo, contribuindo para a diminuição de acidentes. A tarefa de localização também pode ser utilizada como uma forma de aprimorar os sistemas de bilhetagem eletrônica, assim como facilitar o gerenciamento de modelos de negócios por parte de empresas, onde dada a localização de um indivíduo a informação a ser divulgada tende a possuir um maior nível de especificidade.

Na reconstrução de trajetórias, por exemplo, a localização contempla a estimativa da orientação e o deslocamento (BONG-SU CHO et al., 2011). Para se obter dados referentes as grandezas cinemáticas (aceleração linear, velocidade angular e em alguns casos campo magnético), sensores inerciais podem ser utilizados (acelerômetro, girômetro e magnetômetro, respectivamente, cada um com três eixos ortogonais). Neste caso, é possível realizar a tarefa de localização relativa a um ponto de partida. O conjunto dos sensores inerciais mencionados é conhecido como Unidade de Medição Inercial (do inglês *Inertial Measurement Unit - IMU*). Avanços recentes tem facilitado a construção de IMUs pequenas e leves (*Micro Electro Mechanical Systems - MEMS*), embarcadas em *Smartphones* por exemplo.

Os *Smartphones* mais recentes, devido sua grande capacidade computacional, permitem a programação de interfaces e sensoriamento, além do baixo custo comparado às IMUs tradicionais, podem incrementar não somente a capacidade de plataformas robóticas, mas também surgem como uma promissora ferramenta capaz de ser inserida no contexto de ITS.

A teoria do sistema de navegação inercial baseia-se nas leis de Newton, e na possibilidade de calcular a velocidade e posição de um robô ou objeto móvel a partir de sua aceleração. Entretanto, na prática, a navegação inercial esbarra em alguns problemas que são oriundos da precisão e dos ruídos encontrados em alguns dispositivos. Algumas das soluções a esses problemas serão apresentadas neste trabalho.

## 1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é apresentado no decorrer deste capítulo: especificar as características e desenvolver um sistema capaz de auxiliar na identificação de trajetórias. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Interpretação dos dados dos sensores inerciais (acelerômetro e girômetro), assim como dos erros associados aos dados;
- Identificação das matrizes de rotação a partir do sensor girômetro;
- Análise dos filtros FIR, IIR e Kalman;
- Testes em ambientes simulados e reais, a fim de observar a eficácia do sistema proposto.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é dividido em três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma introdução e contextualiza os tópicos abordados nos demais capítulos. O referencial teórico também é apresentado neste capítulo. O Capítulo 2 apresenta a metodologia proposta com a finalidade de preparar o sinal da aceleração para a dupla integração do mesmo, os filtros digitais utilizados e as comparações entre as saídas obtidas.

O Capítulo 3 fornece uma análise dos resultados e apresenta uma proposta de suavização dos erros gerados com a utilização de *splines*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A navegação inercial é definida como um processo que estima a posição atual de um veículo/objeto móvel em um referencial fixo, por meio de medidas das acelerações em um sistema de coordenadas espaciais conhecidas. Para isto, utiliza sensores inerciais (girômetros e acelerômetros) para obter uma estimativa da posição, velocidade e atitude do veículo que os comporta. O princípio de funcionamento destes sensores baseia-se nas Leis do Movimento de Newton (EMMENDOERFER, 2008).

De acordo com Bulle (2005), as etapas que consistem o processo de orientação são: medição da velocidade e posição de um corpo, cálculo das ações de controle necessárias ao ajuste adequado da velocidade e posição, e entregar os comandos adequados ao sistema de controle. A aceleração é a segunda derivada da posição, ou seja, para obter a posição basta integrar a aceleração duas vezes (JACKSON; CALLAHAN, 2006). Os girômetros retornam a velocidade angular, em rad/s, onde ao integrá-la apenas uma vez retorna os ângulos de Euler: *roll* (rolamento), *pitch* (arfagem) e *yaw* (guinada), que auxiliam na identificação da rotação do dispositivo (ALMAZÁN et al., 2013).

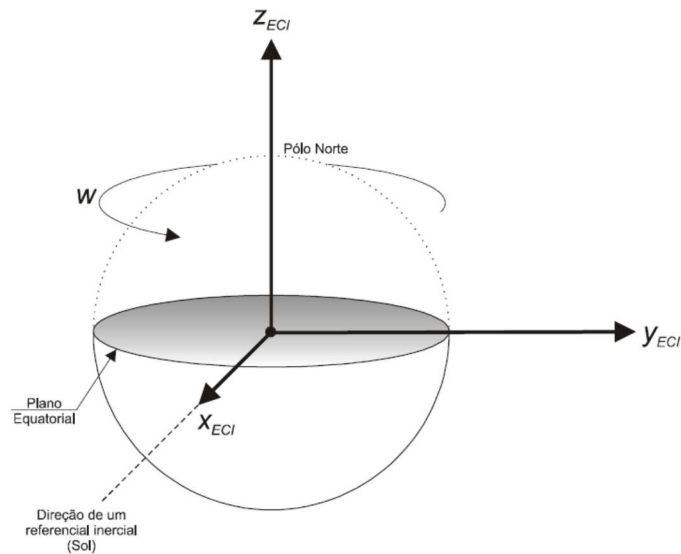
Um sistema de orientação inercial consiste basicamente em um conjunto de acelerômetros lineares, montados em uma plataforma giro estabilizada, contendo ainda um computador para executar os cálculos inerciais, e de fatores que venham a influenciar a trajetória do veículo (BULLE, 2005).

### 2.1 Sistemas de coordenadas utilizados na navegação inercial

Segundo Grewal, Weill e Andrews (2007), na navegação inercial é utilizado um sistema de coordenadas esféricas e cartesianas. Os mais utilizados são: ECI (“*Earth – Centered – Inertial*”), ECEF (“*Earth – Centered, Earth – Fixed*”), NED (“*North – East – Down*”), ENU (“*East – North – Up*”), LPT (“*Local Tangent Plane*”), RPY (“*Roll – Pitch – Yaw*”) e Curvilíneo ou Geodésico.

Grewal, Weill e Andrews (2007) definem o sistema ECI como um sistema que possui sua origem no centro de massa da Terra, onde seu eixo *x* passa pela linha do Equador, apontando assim para o sol. Já o eixo *z* passa através do polo norte e o eixo *y* é orientado segundo a regra da mão direita, tal sistema pode ser observado na Figura 1.

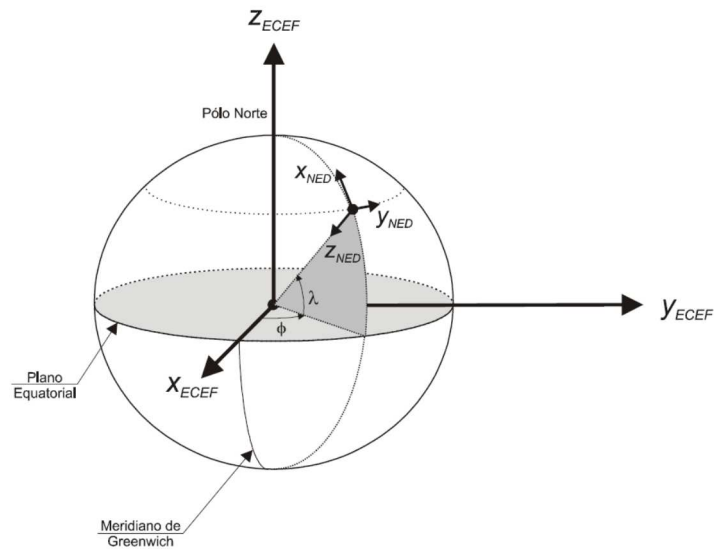
Figura 1 – Representação do sistema de referencial ECI.



Fonte: Emmendoerfer (2008).

O sistema ECEF, assim como o ECI, possui sua origem no centro de massa da Terra. O eixo  $z$  passa através do polo norte e o eixo  $y$  é orientado segundo a regra da mão direita. O eixo  $x$  passa através do cruzamento entre o meridiano de Greenwich e a linha do Equador. Já o sistema NED, também conhecido como sistema de navegação local, possui sua origem estabelecida em qualquer ponto do globo terrestre, onde o eixo  $x$  é definido apontado para o norte geográfico, o eixo  $z$  é definido como apontando para o centro da Terra e, completando o triedro, o eixo  $y$  é definido segundo a regra da mão direita. Trata-se de um sistema muito utilizado na navegação terrestre. A Figura 2 apresenta os sistemas NED e ECEF mencionados (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007).

Figura 2 – Representação dos sistemas referenciais NED e ECEF.

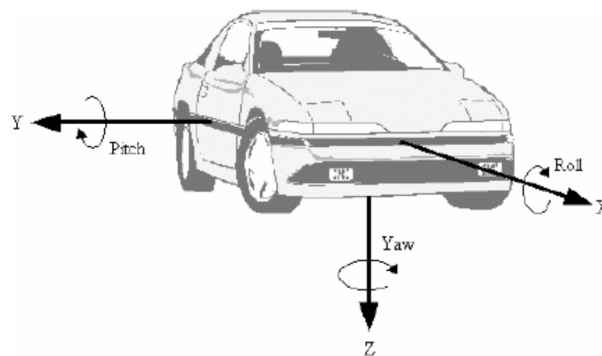


Fonte: Emmendoerfer (2008).

Assim como o sistema NED, o sistema ENU também é um sistema de navegação local, onde sua origem é estabelecida em qualquer ponto do globo terrestre. Nele o eixo  $x$  é definido como apontando para o norte geográfico, já o eixo  $z$  é normal a superfície terrestre apontando para cima e o eixo  $y$  é definido segundo a regra da mão direita. O sistema utilizado neste trabalho trata-se do sistema LPT, sendo este composto pelos sistemas NED e ENU, descritos anteriormente. Desta forma, ele também é considerado como um sistema de navegação local, tendo a Terra representada como uma superfície plana no ponto onde se deseja analisar a navegação (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007).

Outro sistema amplamente utilizado, que pode ser observado na Figura 3, trata-se do sistema RPY, também conhecido como sistema de navegação da plataforma. Trata-se de um sistema onde os eixos são fixos em um veículo, compondo desta forma uma estrutura conhecida como “estrutura móvel”. No sistema RPY, o eixo  $x$  é denominado como eixo de rolamento (*roll* -  $\varphi$ ), apontando para a direção frontal do movimento do veículo, o eixo  $y$  é chamado de eixo de arfagem (*pitch* -  $\theta$ ) e deve apontar para a direita de forma ortogonal a  $x$ . Por fim, de acordo com a regra da mão direita, o eixo  $z$  ou eixo de guinada (*yaw* -  $\psi$ ) deve apontar para baixo (GREWAL; WEILL; ANDREWS, 2007).

Figura 3 – Representação do sistema de referencial RPY.



Fonte: Santana (2005).

## 2.2 Sensores

### 2.2.1 Acelerômetro

Acelerômetros são dispositivos que possuem uma pequena massa conhecida em seu interior, sendo estes capazes de identificar a resultante das forças que venham a atuar sobre tal massa. Partindo da definição da Segunda Lei de Newton, torna-se possível retornar a aceleração na direção do eixo de sensibilidade (LAVIERI, 2011; EMENDOEFER, 2008).

Santana (2005) define os acelerômetros como sensores utilizados na medição de aceleração linear nos sistemas inerciais. O acelerômetro retorna em sua saída a medida conhecida como força específica, isto quer dizer que o dispositivo mede a aceleração do corpo em conjunto com a aceleração gravitacional, devendo esta ser compensada.

No que diz respeito aos acelerômetros encontrados normalmente em *Smartphones* ou *tablets*, tais sensores são capazes de realizar medições das componentes da aceleração em três eixos perpendiculares ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Estes sensores, embora disponham de uma resolução que pode chegar a aproximadamente 0,002g, são efetivamente limitados pelo ruído associado às vibrações mecânicas do dispositivo. Com relação a capacidade destes aparelhos em medir a aceleração, esta capacidade limita-se a uma faixa de  $\pm 2g$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade com relação a um referencial inercial (VIEIRA; AGUIAR, 2013).

### 2.2.2 Girômetro

Girômetros são sensores sensíveis à velocidade angular, realizando a medição em torno de um ou mais eixos do sistema de coordenadas, sem que haja uma referência externa. Tais medidas são realizadas em rad/s. Ao realizarem a medição da velocidade angular referente à rotação em torno de seu eixo de sensibilidade, possibilitam que se obtenha o ângulo de rotação



(posição angular) ao redor deste eixo. Para isto, basta a realização de uma integração simples no tempo da velocidade angular medida (EMMENDOERFER; RODRIGUES; PENA, 2006 apud EMMENDOERFER, 2008; SILVA, 2015).

Em geral, devido ao seu baixo custo e facilidade de fabricação, *Smartphones* utilizam girômetros do tipo MEMS. Estes sensores, utilizam-se do efeito Coriolis para realizarem suas medições (LIMA, 2005).

### **2.2.3 Calibração de sensores inerciais**

Há três tipos diferentes de ensaios que podem ser feitos com sensores inerciais: os ensaios de aceitação, ensaios de confiabilidade e ensaios de qualificação. Os ensaios de aceitação realizam-se durante a produção e visam coletar dados para que seja feita a calibração dos sensores. Ensaios de confiabilidade verificam falhas de produção por meio de uma amostra de sensores da linha de produção. Os ensaios de qualificação são mais detalhados, visando a qualificação do sensor dentro de uma classe de incerteza ou tolerância (TITTERTON, 2004 apud EMMENDOERFER, 2008).

Para cada tipo de aplicação e sensores são desenvolvidos ou especificados testes e métodos de calibração, sendo que os testes nos sensores inerciais têm como objetivo descobrir os coeficientes do modelo de calibração do sensor. Sendo assim, pode-se prever os erros referentes ao sensor e compensá-los mediante diferentes condições (EMMENDOERFER, 2008).

A calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre valores de grandezas estabelecidas por padrões e os indicados pelo instrumento ou sistema de medição. A calibração nada mais é do que a estimação de parâmetros do modelo de calibração pela comparação dos valores medidos com os dados de entrada, fornecidos por um padrão (ROQUETTE, 2007 apud EMMENDOERFER, 2008).

### **2.3 Matrizes de transformação**

As matrizes de transformação têm como objetivo principal realizar o alinhamento do dispositivo durante a realização de uma trajetória, com relação ao seu posicionamento definido inicialmente. Tais matrizes podem ser obtidas por meio das medições dos girômetros.

Ao se obter as matrizes de rotação, torna-se possível utilizá-las com qualquer vetor de aceleração em uma base nova qualquer (medições retornadas pelo sensor acelerômetro durante uma trajetória), a fim de transformá-lo em um vetor na base canônica (medição retornada pelo sensor acelerômetro no posicionamento inicial, base de referência).

### 2.3.1 Matrizes de transformação com uso do sensor girômetro

As matrizes de rotação podem ser obtidas partindo-se exclusivamente das medições retornadas pelo sensor girômetro no instante  $i$ , que podem ser expressas como mostrado em (1), onde  $wx_i$ ,  $wy_i$  e  $wz_i$  referem-se as medições das velocidades de rotação no instante  $i$ , em rad/s, em torno dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  do dispositivo, respectivamente (ANDROID DEVELOPERS, 2017).

$$G_i = (wx_i, wy_i, wz_i) \quad (1)$$

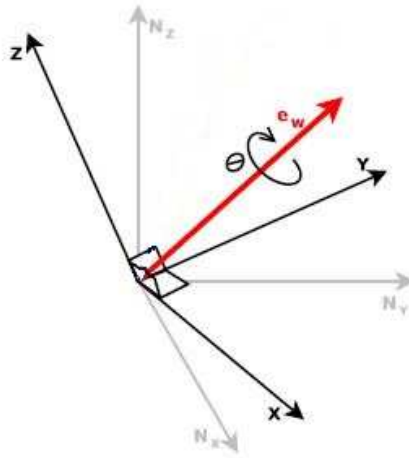
A partir das medições do girômetro, torna-se possível calcular a matriz de transformação de um vetor no sistema  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  no instante da amostra  $i$ , para um vetor no sistema  $Nx$ ,  $Ny$  e  $Nz$  no instante da amostra  $i-1$ . Para se obter tal matriz, utiliza-se o módulo ( $W_i$ ) e o vetor unitário  $e_w$  de  $G$  no instante  $i$ , como demonstrado em (2) e (3). Eles podem ser observados na Figura 4, onde  $Nx$ ,  $Ny$  e  $Nz$  representam, respectivamente, as novas posições dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  após a rotação de um ângulo  $\theta$  em torno do vetor  $e_w$ . Este ângulo de rotação é calculado de acordo com a expressão matemática apresentada em (4), sendo  $\Delta t$  a frequência de aquisição de dados do sensor (ANDROID DEVELOPERS, 2017).

$$\|G_i\| = W_i = \sqrt{wx_i^2 + wy_i^2 + wz_i^2} \quad (2)$$

$$e_w = G_i/W_i \quad (3)$$

$$\theta = W_i \Delta t \quad (4)$$

Figura 4 – Rotação  $\theta$  dos eixos coordenados em torno de  $e_w$ .



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com Kuipers (1999), a rotação  $v' = (v'_x, v'_y, v'_z)^T$  de ângulo  $\theta$  de um vetor  $v = (v_x, v_y, v_z)^T$ , em sentido anti-horário, ao redor de um vetor unitário  $e_w = (e_{wx}, e_{wy}, e_{wz})^T$ , como demonstrado na Figura 5, ou seja, a rotação de um ponto em sentido anti-horário ao redor deste vetor unitário, pode ser representado simplificadamente por meio de quaternions, de acordo com as expressões matemáticas de (5) a (8).

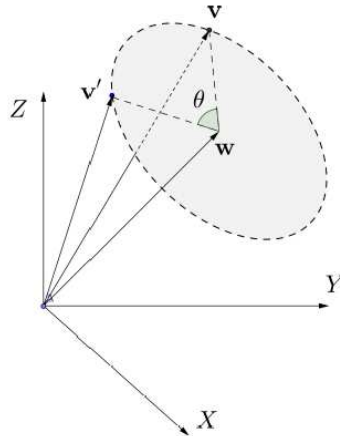
$$V' = QVQ^{-1} \quad (5)$$

$$Q = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} E_W \quad (6)$$

$$E_W = e_{wx}i + e_{wy}j + e_{wz}k \quad (7)$$

$$V = v_xi + v_yj + v_zk \quad (8)$$

Figura 5 – Rotação  $\theta$  de um vetor  $v$  em torno de  $w$ .



Fonte: Do autor (2017).

A partir da definição anterior de quaternions, a rotação  $v'$  de ângulo  $\theta$  dos eixos coordenados, em sentido horário, ao redor de um vetor unitário  $e_w = (e_{wx}, e_{wy}, e_{wz})^T$  pode ser representado matricialmente de acordo com as expressões (9) e (10). O mesmo ocorre na Figura 4, pois, dizer que os eixos giram um ângulo  $\theta$  em sentido horário ao redor do vetor unitário, é o mesmo que dizer que um ponto gira um ângulo  $\theta$  em sentido anti-horário ao redor deste vetor unitário (HASLWANTER, 1995).

De modo que,

$$v_i' = R_i v_i \quad (9)$$

onde  $v_i'$  representa o vetor  $v_i$  no eixo cartesiano no instante da amostra  $i-1$ . Sendo  $R_i$  igual a

$$R_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i + e_{wx}^2(1 - \cos \theta_i) & e_{wx}e_{wy}(1 - \cos \theta_i) - e_{wz} \sin \theta_i & e_{wx}e_{wz}(1 - \cos \theta_i) + e_{wy} \sin \theta_i \\ e_{wy}e_{wx}(1 - \cos \theta_i) + e_{wz} \sin \theta_i & \cos \theta_i + e_{wy}^2(1 - \cos \theta_i) & e_{wy}e_{wz}(1 - \cos \theta_i) + e_{wx} \sin \theta_i \\ e_{wz}e_{wx}(1 - \cos \theta_i) - e_{wy} \sin \theta_i & e_{wz}e_{wy}(1 - \cos \theta_i) + e_{wx} \sin \theta_i & \cos \theta_i + e_{wz}^2(1 - \cos \theta_i) \end{bmatrix} \quad (10)$$

As expressões matemáticas (3) e (4) possibilitam o preenchimento da matriz representada em (10). Desta forma, obtêm-se a matriz de rotação utilizando-se exclusivamente dos dados obtidos a partir do sensor girômetro.

## 2.4 Filtros

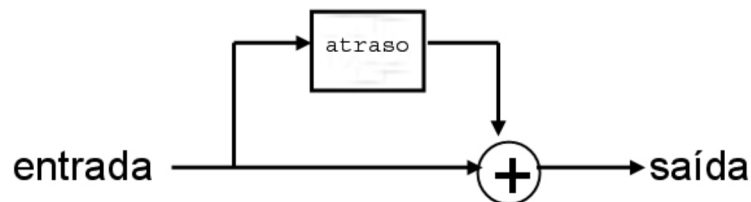
A utilização de sensores embarcados a baixo custo, como os acelerômetros e girômetros presentes em diversos dispositivos *Smartphones*, tem como principal desvantagem a sua imprecisão. Sensores de qualidade superior são mais estáveis e apresentam dados menos

ruidosos. Dada a utilização de sensores a baixo custo, há diferentes técnicas para se processar sinais ruidosos, como a utilização de filtros digitais, valores médios ao longo de uma janela temporal, filtro de Kalman, etc. O filtro de Kalman é uma das técnicas mais utilizadas na navegação inercial e extremamente útil quando o ruído é branco (ALMAZÁN et al., 2013).

#### 2.4.1 FIR

FIR provém do inglês *Finite Impulse Response* ou Resposta Finita ao Impulso. A resposta ao impulso do sistema deve ser finita e implementada por meio de uma equação de diferenças que não apresente termos recursivos. Neste caso, a entrada não é realimentada pela saída, conforme Figura 6 (OLIVEIRA; CORREIA; MENDONÇA, 2007).

Figura 6 – Diagrama esquemático de um filtro FIR.



Fonte: Oliveira; Correia; Mendonça (2007).

Filtros que possuem resposta limitada ao impulso apresentam vantagens em sua implementação, por serem estáveis. Um filtro causal de N-ésima ordem possui a resposta em frequência de acordo com a equação (11) (OLIVEIRA; CORREIA; MENDONÇA, 2007):

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^N h[n] e^{-jn\omega} \quad (11)$$

Projetar um filtro FIR consiste na determinação dos coeficientes  $h[n]$  que geram a resposta em frequência que seja capaz de atingir as especificações de resposta em frequência desejada (OLIVEIRA; CORREIA; MENDONÇA, 2007).

##### 2.4.1.1 Filtros passa-baixa e passa-alta

Filtros desta natureza permitem a passagem de um sinal acima ou abaixo de uma determinada frequência, denominada frequência de corte ( $f_c$ ). Um filtro passa-baixa retém altas frequências e permite a passagem das baixas, de forma que o ganho caia para frequências crescentes partindo-se da  $f_c$ . O filtro passa-alta opera de forma contrária, rejeitando as baixas frequências e permitindo a passagem das altas. Portanto, filtros passa-baixa liberam a passagem

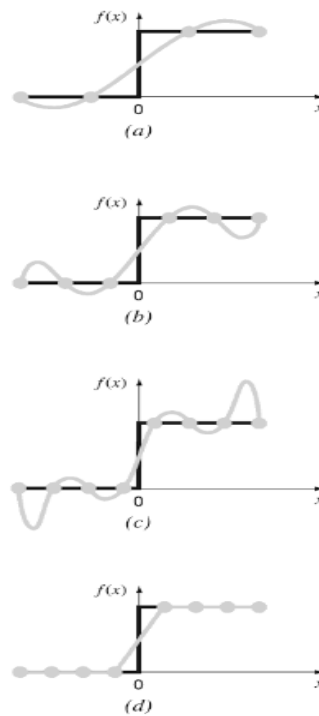
da frequência de valor zero até a de corte, e filtros passa-alta deixam passar da frequência de corte até as mais elevadas do sinal (SADIKU; ALEXANDER; MUSA, 2014; SAMESHIMA, 1987).

## 2.5 Splines

Com o intuito de se preencher as lacunas deixadas por um sinal pode-se utilizar a interpolação polinomial. Para se interpolar  $n+1$  pontos dados, pode-se utilizar polinômios de grau  $n$ . Por exemplo, para 9 pontos, pode-se determinar exatamente um polinômio de grau 8. Essa curva capturaria todas as oscilações (pelo menos até a oitava derivada, inclusive) sugeridas por esses pontos. Por outro lado, existem casos em que tais funções podem levar a resultados equivocados devido a erros de arredondamento na estimativa. Uma outra possível abordagem seria aplicar polinômios de grau inferiores a subconjuntos dos pontos dados. Tais polinômios conectivos são chamadas de funções *splines* (CHAPRA; CANALE, 2016).

Na Figura 7 é apresentado um caso onde é aplicado uma *spline* linear em (d), que possui um funcionamento melhor do que um polinômio de grau muito elevado. A aplicação de *splines* se dá para casos em que uma função é contínua, ou seja, apresenta determinado padrão em certos trechos, mas sofre uma mudança abrupta em algum ponto da região de interesse. As imagens de (a) a (c) mostram que uma variação abrupta provoca oscilações nos polinômios interpoladores (CHAPRA; CANALE, 2016).

Figura 7 - Situação onde aplicação de *spline* é superior aos polinômios de grau elevado.



Fonte: Chapra e Canale (2016).

### 2.5.1 Splines cúbicos

Denomina-se *splines* cúbicos as curvas de terceiro grau utilizadas para conectar cada conjunto de pontos dados. Tais funções podem ser elaboradas de forma que as conexões entre equações cúbicas adjacentes sejam homogêneas. Em um primeiro momento imagina-se que uma aproximação de terceiro grau por *splines* seja pior que a pôr um polinômio de grau mais elevado. Contudo, como descrito na Seção 2.5, situações em que há mudanças abruptas do sinal em análise, torna-se preferível a utilização de *splines* (CHAPRA, 2013; CHAPRA; CANALE, 2016).

*Splines* cúbicos são frequentemente utilizados na prática, tornando-se preferidos pois fornecem uma representação simplificada que exhibe o aspecto de suavidade requerido. Possuem como objetivo determinar um polinômio de 3º grau para cada intervalo entre os pontos, como representado de forma geral na expressão (12) (CHAPRA, 2013; CHAPRA; CANALE, 2016).

$$f_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad (12)$$

Portanto, para  $n+1$  pontos dados ( $i = 0,1,2,\dots,n$ ) há  $n$  intervalos e, conseqüentemente, torna-se necessário calcular  $4n$  coeficientes indeterminados. Assim são necessárias  $4n$  condições para se calcular tais coeficientes.

## **2.6 Aplicações com sensores inerciais em Smartphones**

Silva (2015) utiliza como alternativa a uma UMI um dispositivo móvel, no caso, para a navegação inercial de um robô terrestre. Para estimar o deslocamento foi utilizada a dupla integração nos dados do acelerômetro e, a fim de minimizar os erros de posição e desvios no sinal de velocidade, causados não apenas pelo processo de integração numérica, mas também pela componente de corrente contínua do acelerômetro, foi proposta uma metodologia de movimento modulado. Nos cálculos de orientação, foi aplicado um filtro complementar para um melhor desempenho na estimação da orientação retornada pela combinação do giroscópio, com o acelerômetro/magnetômetro.

Shala e Rodriguez (2011) examinam o nível de precisão que pode ser alcançado na tarefa de localização utilizando os sensores embarcados em *Smartphones*, neste caso, na estimação de posição do dispositivo dentro de um edifício, onde o sinal GPS é ruim ou indisponível. Para determinar a posição foi utilizada a fusão sensorial de diferentes sensores disponíveis no *Smartphone*, como o acelerômetro, girômetro e sinais de rede sem fio. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que se trata de um técnica promissora, permitindo uma contribuição para sistemas de localização em grandes edifícios, shoppings, entre outros.



## REFERÊNCIAS

- ALMAZÁN, J.; et al. Full auto-calibration of a Smartphone on board a vehicle using IMU and GPS embedded sensors. **Intelligent Vehicles Symposium (IV) – 2013 IEEE**, p. 1374 – 1380, Gold Coast, QLD – Australia, 2013.
- ANDROID DEVELOPERS. **Motion sensors**. Disponível em: <[https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html)>. Acesso em: 11 jan. 2017.
- BULLE, B. F. Robot motion trajectory-measurement with linear inertial sensors. **Cutting Edge Robotics**, p. 784, Alemanha, jul. 2005.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. McGraw Hill Brasil, 7 ed., 2016.
- CHAPRA, S. C. **Métodos numéricos aplicados com MATLAB para engenheiros e cientistas**. AMGH Editora, 3 ed., 2013.
- CHO, B. S. et al. A dead reckoning localization system for mobile robots using inertial sensors and wheel revolution encoding. **Journal of mechanical science and technology**, v. 25, n. 11, p. 2907-2917, 2011.
- CROTTI, Y. et al. Raspberry Pi e Experimentação Remota. **ICBL2013 – International Conference on Interactive Computer aided Blended Learning**, p. 143 – 145, Araranguá (SC), 2013.
- EMMENDOERFER, G. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation and integration. Second Edition**. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- HASLWANTER, T. Mathematics of three-dimensional eye rotations. **Vision Res.** v. 35, n. 12, p. 1727-1739, 1995.
- JACKSON; J. D.; CALLAHAN, D. W. Location tracking of test vehicles using accelerometers. **5th WSEAS Int. Conf. on CIRCUITS, SYSTEMS, ELECTRONICS, CONTROL & SIGNAL PROCESSING**, Dallas, USA, nov. 2006.
- KUIPERS, J. B. **Quaternion and rotation sequences**. Geometry, Integrability and Quantization, Department of Mathematics, Calvin College, p. 127-143, 1999.
- LAVIERI, R. S. **Métodos de navegação inercial aplicados a lançamentos submarinos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2005.

OLIVEIRA, E. E. C.; CORREIA, S. É. N.; MENDONÇA, L. M. Implementação do filtro de resposta finita (FIR) não recursivo através do método das janelas. **II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, João Pessoa, Paraíba, 2007.

PEREIRA, W. F. **O Uso de Sistemas Inteligentes para o Aumento da Eficácia do Transporte Público por Ônibus: O Sistema de Bilhetagem Eletrônica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K.; MUSA, S. **Análise de circuitos elétricos com aplicações**. AMGH Editora, 2014.

SAMESHIMA, K. Princípios gerais de aquisição e processamento de sinais biológicos. **Jornal de pneumologia**, v. 13, fev., 1987.

SANTANA, D.D.S. **Estimação de trajetórias terrestres utilizando unidade de medição inercial de baixo custo e fusão sensorial**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SHALA, U.; RODRIGUEZ, A. **Indoor positioning using sensor-fusion in android devices**. Part of the requirements for a *Degree of Master in Embedded Systems*. Kristianstad, Suécia, nov. 2011.

SILVA, P. R. M. **Localização de robô em ambiente interno utilizando um dispositivo móvel baseado no sistema operacional android para Navegação inercial**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

VIEIRA, L. P.; AGUIAR, C. E. **Experimentos com o acelerômetro de Tablets e Smartphones**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

**CAPÍTULO 2 – Estudo da Geração de Trajetórias Baseado em Sensores Inerciais a Baixo Custo: Aplicação em Sistemas Inteligentes de Transporte**

## RESUMO

No contexto de Sistemas Inteligentes de Transporte a localização de um indivíduo é fundamental, pois contribui para diminuir as chances de um acidente. Em termos de modelos de negócios, possibilita a divulgação de informações de forma mais personalizada em função de determinada área. Este capítulo tem como objetivo especificar as características e o diagrama de fluxo de um sistema capaz de auxiliar na identificação e na reconstrução de trajetórias utilizando um *Smartphone*. Tal dispositivo surge como uma interessante ferramenta devido ao seu fácil acesso e baixo custo, assim como sua elevada capacidade computacional, de sensoriamento e de programação de interfaces. Para isto, foi proposta uma metodologia baseada em conceitos matemáticos e filtros para tratar o sinal gerado por sensores inerciais, presentes nesses dispositivos, possibilitando a realização de etapas de dupla integração deste sinal e, conseqüentemente, a identificação de trajetórias. Neste capítulo, é apresentado o diagrama de fluxo simplificado da metodologia proposta, assim como uma análise dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia para diferentes tipos de movimentos.

**Palavras-chave:** Smartphone. Sensores Inerciais. Reconstrução de Trajetórias.

## ABSTRACT

In the context of Intelligent Transportation Systems the localization of a person is crucial as it helps to decrease the chances of an accident. In terms of business models, it enables the disclosure of information in a more personalized way depending on a particular area. This chapter aims to specify the characteristics and flow diagram of a system capable of assisting in the identification and reconstruction of trajectories using a Smartphone. Such a device appears as an interesting tool due to its easy access and low cost, as well as its high computational capacity, sensing and programming of interfaces. For this, we have proposed a methodology based on mathematical concepts and filters to treat the signal generated by inertial sensors, enabling the realization of steps of double integration of this signal and, consequently, the identification of trajectories. This chapter presents a simplified flow diagram of the proposed methodology, as well as an analysis of the results obtained with the application of the methodology for different types of movements.

**Keywords:** Smartphone. Inertial Sensors. Reconstruction of Trajectories.

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) contemplam o gerenciamento de rodovias, otimização do uso dos transportes coletivos e estacionamentos, fiscalização eletrônica, controle semafórico e de tráfego, cobrança automática de tarifas, dentre a oferta de outros benefícios aos seus usuários (PEREIRA, 2007; U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2016).

A localização dos elementos que compõem os ITS contribui para o sucesso das aplicações nessa área, incluindo o fornecimento de informações da forma mais individualizada possível.

Dentre os métodos existentes para realizar a localização e reconhecimento de trajetórias, pode-se citar o sistema de navegação inercial, que é um sistema de navegação tridimensional, baseado em “*dead-reckoning*” (BONG-SU CHO, 2011). Neste caso, são utilizados sensores inerciais (acelerômetro, girômetro e, em alguns casos, magnetômetro, cada um com três eixos ortogonais) para se obter dados referentes as grandezas cinemáticas (aceleração linear, velocidade angular e orientação em relação ao campo magnético, respectivamente), e desta forma realizar a tarefa de localização relativa a um ponto de partida. O conjunto de sensores inerciais é conhecido como Unidade de Medição Inercial (IMU - do inglês *Inertial Measurement Unit*).

Define-se o sensor acelerômetro como um dispositivo apto a identificar a resultante das forças que venham a atuar sobre uma pequena massa, localizada em seu interior (LAVIERI, 2011). O dispositivo é constituído por uma massa conhecida que por meio da medida da força específica atuante sobre ele, e da Segunda lei de Newton, torna-se possível calcular a aceleração na direção de seu eixo de sensibilidade (EMMENDOERFER, 2008). Acelerômetros convencionais de *tablets* ou *Smartphones* apresentam uma resolução que pode chegar a aproximadamente 0,002g, entretanto, na prática tal resolução limita-se ao ruído associado com vibrações mecânicas do aparelho. Tais dispositivos são capazes de medir acelerações no intervalo  $\pm 2g$ , sendo g a aceleração da gravidade, com relação a um referencial inercial (VIEIRA; AGUIAR, 2013).

Já os sensores do tipo girômetro realizam a medida da velocidade angular em torno de um ou mais eixos do sistema de coordenadas em rad/s (SILVA, 2015). Os girômetros medem a velocidade angular relacionada à rotação em torno de seu eixo de sensibilidade, de forma que, ao realizar uma integração do sinal de velocidade angular medido em relação ao tempo, este retornará o ângulo de rotação (posição angular) em torno do seu eixo de sensibilidade (EMMENDOERFER; RODRIGUES; PENA, 2006 apud EMMENDOERFER, 2008).

Acelerômetros e girômetros retornam sinais considerados contaminados por ruídos (variações do sinal medido, produto das mudanças de estado e nível de potência nos sensores), *offset* (componente de corrente contínua) e, no caso dos acelerômetros, devido também à aceleração da gravidade exercida no eixo de medição (WOODMAN, 2007). Durante as etapas de integração numérica das medidas retornadas pelo acelerômetro, tais ruídos afetam os valores reais de velocidade e posição (SILVA, 2015). Desta forma, anteriormente à etapa de dupla integração, realiza-se procedimentos para filtragem do sinal, como a utilização de filtros do tipo FIR, valores médios ao longo de uma janela temporal (ALMAZÁN et al., 2013). São utilizadas, também, técnicas de alinhamento do sinal gerado, utilizando-se para isto os dados retornados pelo girômetro, para se obter matrizes de transformação. Tal alinhamento tem como objetivo eliminar dados gerados devido a imperfeições no movimento (balanços, trepidações, entre outros), assim como a transformação do sistema de coordenadas do dispositivo para o sistema de coordenadas LPT (composto pelos sistemas NED e ENU), de acordo com o primeiro conjunto de dados adquirido.

É importante destacar que este trabalho visa potencializar a utilização dos recursos disponíveis nos *Smartphones* atuais, apresentando assim uma alternativa aos métodos de reconstrução de trajetórias tradicionais que utilizam IMUs convencionais. *Smartphones* surgem como incremento às plataformas robóticas, assim como para localização e orientação de pedestres. No contexto de cidades inteligentes são capazes de realizar uma maior interação com o ambiente, quando o espaço é provido de uma infraestrutura digital de comunicação. Algumas aplicações nos *Smartphones* requerem a aceleração linear, contudo esta é apenas uma versão da aceleração absoluta obtida pelos sensores de aceleração, descontado o efeito da aceleração da gravidade. Assim, para se obter o deslocamento a partir da aceleração linear deve-se realizar a eliminação do *offset* e a dupla integração dos dados obtidos.

O desafio é especificar um método capaz de reconstruir trajetórias com sensores inerciais a baixo custo, sensores estes normalmente encontrados em *Smartphones*. Para tal, as seguintes etapas serão apresentadas nas Seções 2 e 3 deste capítulo: aquisição e interpretação dos dados retornados pelos sensores inerciais, implementação das técnicas de alinhamento do dispositivo, diagrama de fluxo da filtragem dos dados, dupla integração do sinal e finalmente a análise dos resultados obtidos com a metodologia proposta.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Fundamentação teórica

Com o intuito de validar o sistema a ser descrito na Seção 2.2, no sentido da reconstrução de trajetórias variadas, os movimentos gerados durante as mesmas devem buscar respeitar o teorema da amostragem de Nyquist, mesmo que o desrespeite em algum ponto, para que assim não haja perda significativa de informações (subamostragem) e o resultado seja satisfatório.

O teorema da amostragem, ou Teorema de Nyquist, define quantas amostras por segundo ( $f_s$ ) são necessárias para que não haja perda de informações de um sinal, de acordo com a expressão (13).

$$f_s \geq 2f_{max} \quad (13)$$

Sendo  $f_{max}$  a maior frequência do sinal. Portanto, a frequência de amostragem de um sinal deve ser pelo menos duas vezes maior que a máxima frequência que deve ser preservada do sinal a ser amostrado (COMER, 2016).

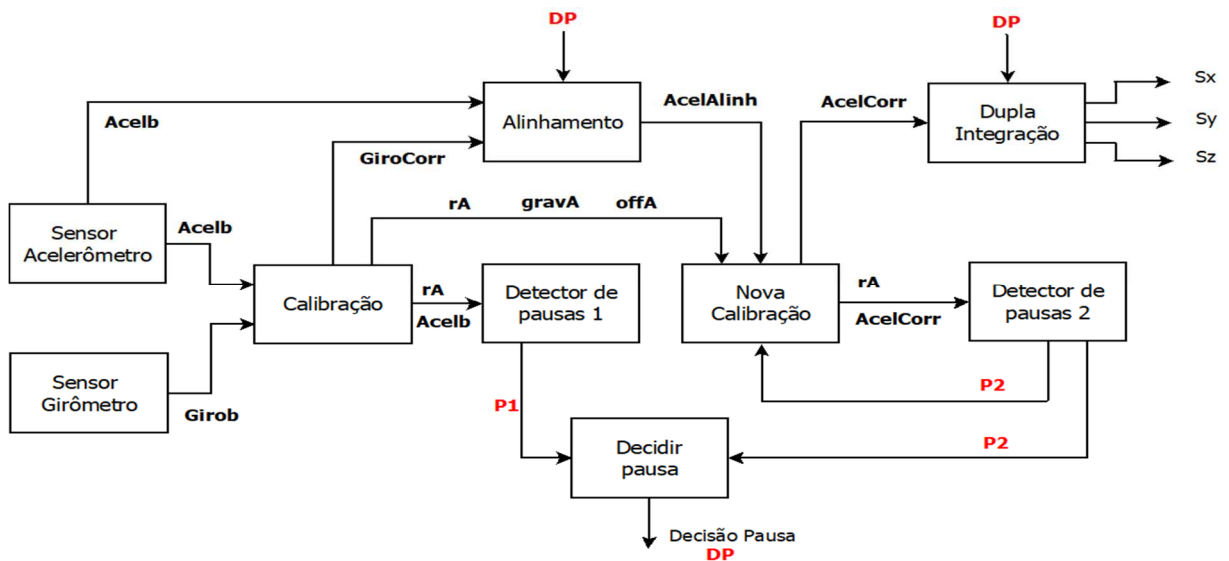
### 2.2 Descrição do sistema

Para possibilitar o desenvolvimento de aplicativos, e conseqüentemente do sistema proposto, foram utilizados os softwares Android Studio e Matlab. A Figura 8 apresenta o diagrama de fluxo deste sistema, desde a preparação do sinal retornado pelos sensores inercias até a etapa de dupla integração. Desta forma, inicialmente é realizada uma etapa de calibração, a partir dos dados brutos retornados pelos sensores inerciais, sendo *Acelb* aceleração bruta e *Girob* velocidade angular bruta, ambas nos 3 eixos de medição ( $x$ ,  $y$ , e  $z$ ). Nesta etapa, é utilizado um filtro FIR (passa baixa) de ordem 16 e frequência de corte 1/100, a fim de apenas obter valores de ruído do sensor acelerômetro (*rA*). Para eliminar o *offset* do sinal do girômetro e obter valores de *offset* (*offA*) e aceleração da gravidade (*gravA*) do acelerômetro são utilizados filtros FIR que realizam a média das primeiras 1500 amostras. Estes valores obtidos a partir do acelerômetro são utilizados como entrada para os módulos “Detector de pausas 1” (apenas o ruído) e “Nova Calibração” (ruído, aceleração da gravidade e *offset*). A função do módulo “Detector de pausas 1” é identificar se o dispositivo se encontra em repouso por meio de uma comparação do sinal bruto do acelerômetro (sem correções) com o ruído obtido anteriormente, ou seja, é verificado se as faixas de aceleração estão dentro ou acima do ruído obtido. Para isto, a aceleração bruta recebida é corrigida com a utilização de filtros FIR que realizam a média de 20 amostras. De modo semelhante, e a fim de realizar tais comparações, com a aceleração já corrigida (*AcelCorr*), ou seja, eliminado o *offset* e gravidade, após esta já ter sido também alinhada (*AcelAlinh*), o módulo “Detector de pausas 2” tem seu princípio de funcionamento



baseado na utilização de filtros FIR (passa alta) de ordem 80 e 52 com frequências de corte de, respectivamente, 1/20 e 1/13, além de realizarem a média de 50 amostras. Para que o sinal de aceleração seja alinhado no módulo “Alinhamento”, este recebe como entrada as velocidades angulares corrigidas (*GiroCorr*) e também a aceleração bruta, para que estas sejam multiplicadas pelas matrizes de rotação. A etapa denominada “Nova Calibração” tem como função eliminar a gravidade e o *offset* do sinal do sensor acelerômetro alinhado. Tais valores são recalculados, dentro do módulo “Nova Calibração”, desde que seja detectada uma nova pausa no “Detector de pausas 2”, sendo o funcionamento deste último um processo recursivo. As informações obtidas pelos detectores de pausa são repassadas a um terceiro módulo “Decidir pausa”. Caso a saída do módulo “Detector de pausas 1” (*P1*) ou a saída do “Detector de pausas 2” (*P2*) acuse ausência de movimentos, a decisão é de que o dispositivo está em repouso. Tal resultado (*DP*) é utilizado como entrada para as tomadas de decisões nos módulos “Alinhamento” e “Dupla Integração”. O módulo “Alinhamento”, ao receber a informação de pausa, gera matrizes de rotação no formato de identidade, para que assim evite acumular erros uma vez que o dispositivo está em repouso. Já na “Dupla Integração”, com a identificação de pausas, este módulo zera a velocidade e conseqüentemente pausa o deslocamento. As Subseções 2.2.1 e 2.2.2 apresentam uma descrição mais detalhada dos módulos “Calibração” e “Detector de pausas 1 e 2”, respectivamente.

Figura 8 - Diagrama de fluxo proposto.



Fonte: Do autor (2017).

### 2.2.1 Módulo calibração

Para a realização desta etapa definiu-se inicialmente uma janela de 1500 amostras, de forma que o dispositivo ao ser inicializado deve permanecer em repouso, durante o intervalo de tempo em que tais amostras, nos três eixos dos sensores, são obtidas. Estas amostras são acumuladas e após serem coletadas em sua totalidade realiza-se a média destas, tanto para os dados do acelerômetro quanto do girômetro. Desta forma, obtêm-se e elimina-se o valor do *offset* no girômetro. Para o acelerômetro obtêm-se e não elimina-se o valor do *offset* em conjunto com a gravidade. Os valores mencionados são obtidos nos três eixos dos sensores ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ).

Neste módulo, são realizados também procedimentos com o intuito de se obter o valor médio de ruído referente ao acelerômetro. Para isto, como mencionado na Seção 2.2, utiliza-se um filtro FIR (passa baixa) de ordem 16 e frequência de corte 1/100 nos dados de aceleração dos três eixos do sensor. Logo após a aplicação do filtro nas 1500 amostras, obtêm-se o valor absoluto de cada amostra, realiza-se a média de todas amostras e por fim soma-se os valores médios dos três eixos em uma única variável, obtendo assim um valor único de ruído.

### 2.2.2 Módulos detectores de pausas

O módulo “Detector de pausas 1” identifica por meio de comparações, nos 3 eixos, se o dispositivo se encontra em repouso. Utiliza-se para isto o sinal bruto do acelerômetro (sem correções) e o valor médio de ruído, mencionado na Seção 2.2.1. A Figura 30 do Anexo B apresenta o fluxograma do procedimento realizado por este módulo. As variáveis  $AcMx$ ,  $AcMy$  e  $AcMz$ , presentes na mesma figura, representam a identificação de pausas ou não em cada um dos eixos do sensor.

O módulo “Detector de pausas 2” realiza também comparações entre o nível de ruído e acelerações nos 3 eixos do dispositivo. Entretanto, para realização desta tarefa, este módulo utiliza a aceleração corrigida e alinhada. Este módulo possui como entradas a aceleração corrigida e o valor médio de ruído. A Figura 31 do Anexo B apresenta o fluxograma simplificado de funcionamento deste módulo. Para a realização da etapa do decaimento exponencial presente na figura, basta multiplicar as variáveis  $AcFx$ ,  $AcFy$  e  $AcFz$ , que possuem valor 0 ou 1, de acordo com a identificação de atividade (1) ou não (0) em cada eixo pelo valor retornado por uma função exponencial de 0,05.

### 2.2.3 Aquisição dos dados

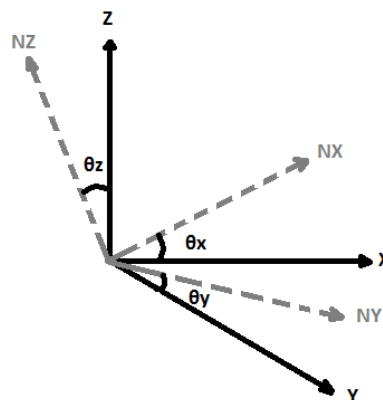
A taxa de aquisição definida foi de 100 Hz, sendo esta a frequência máxima dos sensores presentes no dispositivo, de forma que taxas maiores possibilitam aquisições de dados e

reconstrução de trajetórias de movimentos com uma amplitude maior de frequências em seu sinal, segundo a definição do teorema da amostragem. A aquisição dos dados foi feita considerando-se a hipótese da ocorrência de leituras mais lentas por parte de algum dos sensores, de forma que o aplicativo implementado realiza a média dos eventos mais rápidos, enquanto aguarda a ocorrência de eventos mais lentos. De forma análoga ao funcionamento das IMUs, os dados coletados são salvos em um arquivo texto onde cada linha representa um conjunto de dados novos e cada coluna representa a medição de uma variável específica, como por exemplo: instante de tempo (*timestamp*), aceleração no eixo  $x$ , aceleração no eixo  $y$ , aceleração no eixo  $z$ , velocidade angular no eixo  $x$ , velocidade angular no eixo  $y$ , velocidade angular no eixo  $z$ , deslocamento no eixo  $x$ , deslocamento no eixo  $y$ , deslocamento no eixo  $z$ , entre outros. O Anexo A, item 1, apresenta o *Smartphone* utilizado para a coleta dos dados, assim como suas especificações.

#### 2.2.4 Alinhamento do dispositivo

Com a realização do alinhamento do dispositivo torna-se possível realizar a transformação do sistema de coordenadas do dispositivo para o sistema LPT. Isto é feito por meio de matrizes de transformação que permitem realizar o alinhamento do dispositivo durante a execução de uma trajetória. Os eixos  $X_i$ ,  $Y_i$  e  $Z_i$ , relativos a cada amostra  $i$ , são transformados para os eixos  $X_0$ ,  $Y_0$  e  $Z_0$ , relacionados à primeira amostra  $i=0$ , ao qual é nomeado este primeiro conjunto de base canônica. A Figura 9 exemplifica a posição inicial do dispositivo (base canônica: eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) de acordo com seu sistema de coordenadas, assim como uma de suas bases novas (eixos  $NX$ ,  $NY$  e  $NZ$ ) para um dado conjunto de dados em um determinado instante  $i > 0$ . Sua base nova deve sofrer uma rotação sendo então levada para a base canônica (instante  $i = 0$ ). Tais matrizes podem ser obtidas por meio das medições dos girômetros.

Figura 9 – Sistemas de coordenadas na base canônica e base nova.



Fonte: Do autor (2017).

Ao se obter as matrizes de rotação, torna-se possível multiplicá-las com qualquer vetor de aceleração em uma base nova qualquer (medições retornadas em determinado instante  $i$  pelo sensor acelerômetro durante a trajetória), a fim de transformá-lo em um vetor na base canônica. A matriz de rotação é atualizada a cada conjunto de dados novos retornados pelo sensor girômetro. Todas equações utilizadas para o preenchimento da matriz de rotação, assim como a própria matriz (10) são apresentadas na Seção 2.3.1 do Capítulo 1 deste trabalho.

A partir de algumas etapas, torna-se possível a obtenção das variáveis necessárias ao preenchimento das matrizes de rotação. Tais variáveis podem ser obtidas partindo-se exclusivamente das medições retornadas pelo sensor girômetro em (1), onde  $wx_i$ ,  $wy_i$  e  $wz_i$ , referem-se as medições das velocidades de rotação no instante  $i$ , em rad/s, em torno dos eixos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  do dispositivo, respectivamente. Em um segundo momento pode-se calcular o módulo ( $W_i$ ) de  $G$  em (2), o vetor unitário  $e_w$  (3) e o cálculo dos ângulos de rotação em (4) (ANDROID DEVELOPERS, 2017).

### 2.2.5 Métodos de filtragem

Para se obter o deslocamento à partir da medidas de aceleração é necessário realizar a dupla integração do sinal. Entretanto, tais sensores retornam sinais considerados contaminados devido a presença de ruídos, *offset* e aceleração da gravidade exercida no eixo de medição (WOODMAN, 2007). Durante as etapas de integração numérica das medidas retornadas pelo acelerômetro, tais erros ligados ao sinal afetam os reais valores de velocidade e posição (SILVA, 2015).

Além da utilização das técnicas de alinhamento, há outras alternativas para se processar tais sinais ruidosos, como a utilização de filtros digitais (FIR) e valores médios ao longo de uma janela temporal (ALMAZÁN et al., 2013). Como exemplo de filtros digitais pode-se mencionar os filtros FIR passa-baixas e passa-altas. Estes filtros tem como característica uma função de resposta ao impulso (14).

$$y(n) = \sum_{i=0}^L h_i x(n - i) \quad (14)$$

Onde  $x(n)$  é o sinal de entrada,  $y(n)$  é o sinal de saída,  $h_i$  são os coeficientes do filtro e  $L$  é o número de elementos do filtro.

Os métodos mencionados para se processar sinais ruidosos surgem como alternativa para que se possa eliminar a componente da aceleração da gravidade, assim como a presença de alguns ruídos, desde que o sinal tenha sido bem alinhado. Desta forma, foram desenvolvidos

modelos baseados na utilização de filtros FIR e valores médios ao longo de janelas temporais, a fim de obter um sinal “limpo” e, consequentemente, o deslocamento mais preciso possível.

### 2.2.6 Integração

Esta etapa, última fase de processamento dos dados, realiza a dupla integração dos dados obtidos pelo sensor acelerômetro após a realização dos tratamentos citados nas Subseções 2.2.4 e 2.2.5. A partir das equações (15) e (16) é possível calcular a velocidade e o deslocamento do corpo durante a trajetória, no eixo desejado.

$$V_i = V_{i-1} + a_i \Delta t \quad (15)$$

$$S_i = S_{i-1} + V_i \Delta t \quad (16)$$

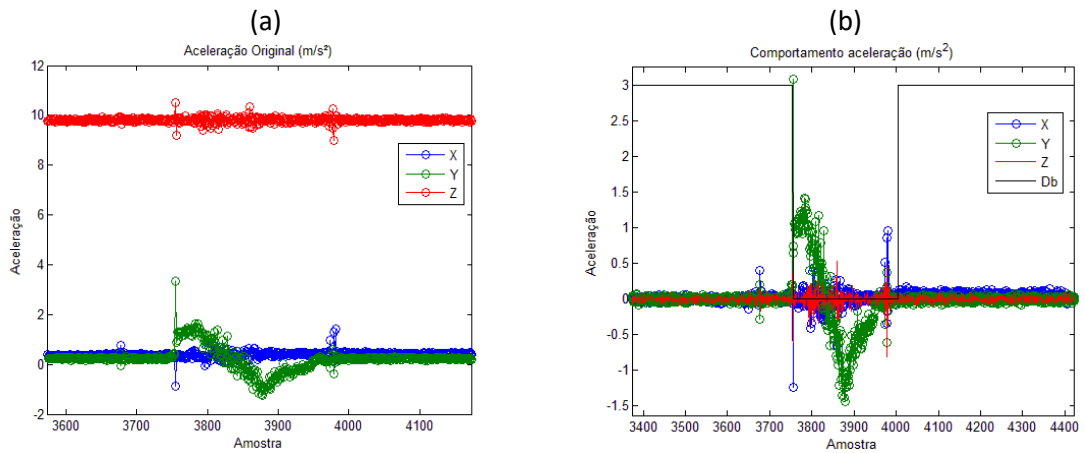
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema proposto no diagrama de fluxo, apresentado na Figura 8, foi submetido à 4 diferentes testes. Foram coletados dados da aceleração linear, descrita na Seção 1, possibilitando uma comparação entre os resultados obtidos com a dupla integração destes dados com a metodologia proposta no diagrama da Figura 8.

Conforme descrito na Seção 2.1, os movimentos gerados devem respeitar o teorema da amostragem de Nyquist, para que assim não haja problemas de subamostragem e o resultado seja satisfatório.

A Figura 10 (a) apresenta os dados brutos retornados pelo sensor acelerômetro durante uma trajetória. A Figura 10 (b) apresenta as acelerações obtidas em (a), entretanto, após a utilização das funções do diagrama proposto e assim preparadas para a etapa de dupla integração. As acelerações em  $x$ ,  $y$  e  $z$  são apresentadas nas cores azul, verde e vermelha, respectivamente. Já na cor preta, a variável  $Db$  representa a atuação dos módulos detectores de pausa.

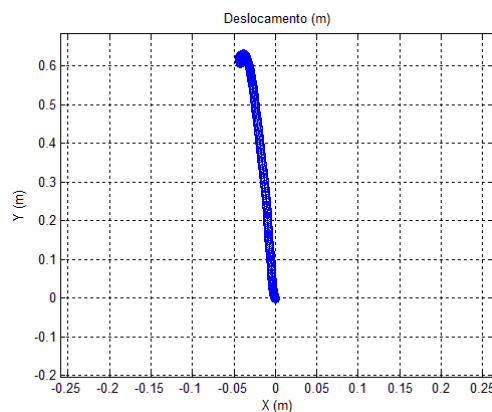
Figura 10 - Acelerações nos 3 eixos de medição.



Fonte: Do autor (2017).

É possível notar na Figura 10 (b) as acelerações nos três eixos do dispositivo após as etapas de calibração, onde é eliminado o *offset*, alguns ruídos, a aceleração da gravidade e a obtenção dos parâmetros necessários aos módulos de detecção de pausa. Foi realizado, também, o alinhamento do dispositivo, de forma que o sinal nos três eixos de medição tendem a ficar sobrepostos nos instantes em que não há movimento. Na cor preta a representação da ação final dos módulos detectores de pausa apresentados no diagrama, onde o valor 0 indica detecção de movimento (aproximadamente entre as amostras 3750 e 4000) e o valor 3 indica o dispositivo em pausa. Os dados apresentados na imagem em questão, em conjunto com o intervalo de tempo das amostras, são utilizados como variáveis de entrada na etapa de dupla integração.

Figura 11- Trajetória 4 obtida com o diagrama proposto.



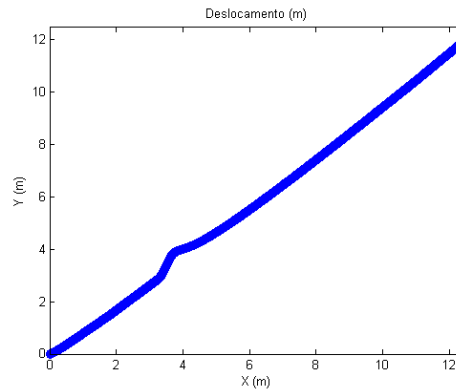
Fonte: Do autor (2017).

Um exemplo onde Nyquist é respeitado pode ser observado na Figura 11. A trajetória foi gerada em um percurso real de aproximadamente 0,65 metros em direção ao eixo y com uma dinâmica do movimento extremamente próxima à dinâmica descrita pelo resultado do

sistema, onde o dispositivo foi mantido em repouso durante um intervalo de tempo antes e após a realização do deslocamento.

A Figura 12 exibe o deslocamento obtido ao se realizar a integração dos dados de aceleração linear, após a eliminação do *offset*, para a mesma trajetória apresentada na Figura 11.

Figura 12- Trajetória 4 obtida com aceleração linear.



Fonte: Do autor (2017).

A Tabela 1 apresenta a dinâmica dos movimentos gerados, os valores de deslocamento real obtidos da integração da aceleração linear e do digrama proposto, em direção ao eixo Y, realizando-se assim um comparativo entre os diferentes erros gerados.

Tabela 1: Comparativo entre diferentes movimentos.

Comparativo entre as distância obtidas no eixo Y					
Movimento	Real (m)	Linear (m)	Diagrama (m)	Erro Linear	Erro Diagrama
1	0	1,8	0,0002	1,8	0,0002
2	0,63	0,4	0,58	0,23	0,05
3	0,67	5	0,59	4,33	0,08
4	0,65	12,0	0,63	11,35	0,02

Fonte: Do autor (2017).

Onde:

- 1 – Repouso;
- 2 – Longa pausa inicial;
- 3 – Longa pausa final;
- 4 – Longa pausa inicial e final.

A Tabela 1 apresenta resultados obtidos com o dispositivo submetido à diferentes movimentos, de forma que o diagrama proposto apresentou um bom comportamento

apresentando valores de erros dentro de uma faixa satisfatória, na casa dos centímetros. Destaca-se o erro gerado para o dispositivo mantido em repouso, tendo este apresentado a menor taxa para o sistema proposto, confirmando assim a eficácia dos módulos detectores de pausa.

A Tabela 2 apresenta os valores médios do erro para os dois casos em estudo. Desta forma, é possível notar a eficácia do modelo desenvolvido assim como a importância de se respeitar Nyquist. Nota-se também o nível de imprecisão obtido com a utilização da aceleração linear.

Tabela 2: Comparativo entre os erros médios.

Erro Médio	
<b>Diagrama</b>	<b>Linear</b>
0,03755	4,4275

Fonte: Do autor (2017).

#### 4 CONCLUSÃO

O modelo apresentado neste trabalho surge como uma alternativa a baixo custo, comparado às IMUs tradicionais, para que trajetórias possam ser reconstruídas sem a necessidade de leituras externas ao dispositivo, no caso, de sensores embarcados no *Smartphone*. Entretanto, pode-se concluir que para se obter resultados satisfatórios deve-se respeitar ao teorema da amostragem. Quando o Teorema de Nyquist não é respeitado os resultados não são confiáveis. Devido aos pontos de imprecisão, as trajetórias e distâncias não condizem com os movimentos.

Para os movimentos listados na Tabela 1, que atendem a definição de Nyquist, os resultados obtidos com o modelo proposto por meio do diagrama da Figura 8 apresentaram um desempenho satisfatório, com um baixo erro ao compará-los com a distância real. Entretanto, para os dados da aceleração linear, os resultados apresentados não foram satisfatórios, assim como a dinâmica do movimento gerado, que não esteve próxima da dinâmica da trajetória real.

Com relação ao modelo proposto, o movimento número 1, o qual consistiu em manter o dispositivo em repouso durante um período de tempo, apresentou um erro de aproximadamente 0,0002 metros, o que demonstra a eficácia dos métodos detectores de pausa. Nos movimentos 2 (longa pausa inicial), 3 (longa pausa final) e 4 (longa pausa inicial e final), embora não apresentem valores tão baixos de erro, também tiveram um desempenho satisfatório, com valores de erro de 0,05 metros, 0,08 metros e 0,02 metros, respectivamente.

Utilizando os 4 movimentos gerados, para realizar uma avaliação do modelo apresentado, obteve-se um erro médio de aproximadamente 0,03755 metros, o que comprova a



eficiência e robustez do método. Contudo, é necessário preservar o teorema da amostragem. Em contrapartida, os dados da aceleração linear apresentaram um erro médio de aproximadamente 4,4275 metros.

A partir da análise dos resultados obtidos com a metodologia citada neste trabalho, pode-se detectar pontos de melhorias, como a realização de um tratamento dos dados em pontos onde Nyquist não é preservado. Para isso, é recomendável o desenvolvimento de um modelo estatístico dos dados gerados, buscando assim minimizar os erros acumulados pelos pontos do sinal onde não se pode confiar, e, conseqüentemente, obter uma trajetória condizente com a realidade.

## REFERÊNCIAS

ANDROID DEVELOPERS. **Motion sensors**. Disponível em:

<[https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html)>. Acesso em: 10 fev. 2017.

ALMAZÁN, J. et al. Full auto-calibration of a Smartphone on board a vehicle using IMU and GPS embedded sensors. **Intelligent Vehicles Symposium (IV) – 2013 IEEE**, p. 1374 – 1380, Australia, 2013.

CARVALHO, S. G. Android Studio: Vantagens e Desvantagens com relação ao Eclipse. **iMasters**, n.8, p. 43, nov. 2013.

CHO, B. S. et al. A dead reckoning localization system for mobile robots using inertial sensors and wheel revolution encoding. **Journal of mechanical science and technology**, v. 25, n. 11, p. 2907-2917, 2011.

COMER, D.E. **Redes de Computadores e Internet**. 6. ed. Bookman, 2016.

EMMENDOERFER, G. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LAVIERI, R. S. **Métodos de navegação inercial aplicados a lançamentos submarinos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PEREIRA, W. **O Uso de Sistemas Inteligentes para o Aumento da Eficácia do Transporte Público por Ônibus: O Sistema de Bilhetagem Eletrônica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SHALA, U.; RODRIGUEZ, A. **Indoor positioning using sensor-fusion in android devices**. Part of the requirements for a *Degree of Master in Embedded Systems*. Kristianstad, Suécia, nov. 2011.

SILVA, P. R. M. **Localização de robô em ambiente interno utilizando um dispositivo móvel baseado no sistema operacional android para Navegação inercial**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **ITS Professional Capacity Building Program / Advancing ITS Education**. Colorado, 2016. Disponível em: <[https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/M%C3%B3dulo1\\_Introdu%C3%A7%C3%A3o\\_ao\\_ITS\\_1.pdf](https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/M%C3%B3dulo1_Introdu%C3%A7%C3%A3o_ao_ITS_1.pdf)>. Acesso em: 04 set. 2017.

VIEIRA, L. P.; AGUIAR, C. E. **Experimentos com o acelerômetro de Tablets e Smartphones**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation**. University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.

### **CAPÍTULO 3 – O Teorema da Amostragem de Nyquist Aplicado à Geração de Trajetórias Baseado em Sensores Inerciais a Baixo Custo**

## RESUMO

*Smartphones*, do ponto de vista tecnológico, devido a sua capacidade de sensoriamento, assim como sua elevada capacidade computacional, surgem não somente como uma alternativa para incrementarem a capacidade de plataformas robóticas, mas também como uma importante ferramenta para melhorar a infraestrutura e serviços de uma cidade. Tais dispositivos estão inseridos no contexto das cidades inteligentes. Entretanto, se faz necessário uma análise da qualidade dos dados retornados por estes dispositivos, onde é possível identificar, em casos particulares, problemas com a qualidade que afetam a confiabilidade dos dados retornados pela medição dos sensores. Esta etapa do trabalho tem como objetivo demonstrar os efeitos ocasionados ao se realizar a dupla integração dos sinais de sensores inerciais, quando esses respeitam ou não a definição do Teorema da amostragem de Nyquist. Por fim, é apresentada uma alternativa para melhoramento dos sinais com a utilização de *splines* cúbicos, assim como uma avaliação do nível tecnológico atual dos sensores utilizados neste trabalho.

**Palavras-chave** – Teorema da amostragem de Nyquist. Splines. Sensores.

## ABSTRACT

Smartphones, from a technological point of view, due to their sensing ability as well as their high computational capacity, emerge not only as an alternative to increase the capacity of robotic platforms, but also as an important tool to improve the infrastructure and services of a city, when inserted into a context of intelligent cities. However, it is necessary to analyze the quality of the data returned by these devices, where it is possible to identify, in particular cases, quality problems that affect the reliability of the data returned by the sensor measurement. The aim of this work is to demonstrate the effects of the double integration of the signals of inertial sensors when they respect or not the definition of the Nyquist sampling theorem. Finally, an alternative is presented to improve the signals with the use of cubic *splines*, as well as an evaluation of the current technological level of the sensors used in this work.

**Keywords** – Sampling theorem of Nyquist. Splines. Sensors.

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de um conjunto de informações e soluções tecnológicas, inseridos no contexto da mobilidade, pode ser definida como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Ao serem incluídos na mobilidade urbana, os ITS tendem a gerar benefícios, por exemplo, na redução do número de acidentes. Neste contexto, a localização desempenha papel importante (PEREIRA, 2007). Um sistema de navegação inercial estima a localização de um corpo fornecendo informações sobre posição, velocidade, atitude e direção com relação a um referencial. Este é um sistema baseado em “*dead-reckoning*”, de navegação tridimensional (BONG-SU CHO, 2011). Sistemas de navegação inercial utilizam acelerômetro e girômetro e, em alguns casos, o magnetômetro. Desta forma, torna-se possível obter dados referentes às seguintes grandezas cinemáticas: aceleração linear, velocidade angular e campo magnético, permitindo a estimativa da localização, relativa a um ponto de partida. Denomina-se Unidade de Medição Inercial (IMU – *Inertial Measurement Unit*) o conjunto de sensores inerciais. Os *Smartphones* atuais fornecem uma vasta diversidade de sensores, sendo seu uso apropriado para a tarefa de localização por exemplo, também surgindo como uma alternativa às IMUs tradicionais (KOTHARI et al., 2012).

O acelerômetro é um dispositivo eletromecânico que permite realizar a medição da aceleração de um corpo, pertinente à aplicação de uma força externa. De modo geral, realiza a conversão de um vetor aceleração em um sinal elétrico, possibilitando que este sinal seja coletado e processado. Em sua estrutura básica, é constituído por uma massa de prova (massa sísmica), um elemento elástico (mola) que suspende essa massa, e um sistema de amortecimento. Forma-se um sistema dinâmico clássico de 2ª ordem, ao se embutir os componentes citados em um chassi, também conhecido como quadro. Tal estrutura é capaz de mensurar a aceleração, por meio da deflexão da massa de prova quando aplicada uma força externa ao chassi (SILVA, 2013). Já com relação a acelerômetros tradicionais de *Smartphones* ou *tablets*, tais sensores possuem uma resolução que pode chegar a 0,002g, apesar de que na prática esta resolução seja restringida pelo ruído associado às vibrações mecânicas do dispositivo. Estes sensores, possuem uma capacidade de medição de acelerações no intervalo  $\pm 2g$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade, com relação a um referencial inercial (VIEIRA; AGUIAR, 2013).

A medição da velocidade angular em torno dos eixos do sistema de coordenadas, em rad/s, é realizado por sensores do tipo girômetro (SILVA, 2015). Sendo assim, tais sensores medem a velocidade angular com relação à rotação em torno de seu eixo de sensibilidade. O ângulo de rotação (posição angular) em torno deste eixo é obtido realizando-se uma integração

no tempo do sinal da velocidade angular medida (EMMENDOERFER; RODRIGUES; PENA, 2006 apud EMMENDOERFER, 2008). *Smartphones* utilizam girômetros do tipo MEMS, devido a sua facilidade de fabricação e baixo custo (LIMA, 2005).

Sinais retornados pelos acelerômetros são considerados contaminados, pois estão associados a ele o *offset* (componente de corrente contínua), ruídos (variações do sinal medido, produto das mudanças de estado e nível de potência nos sensores) e a aceleração da gravidade exercida no eixo de medição (WOODMAN, 2007). Estas componentes afetam os verdadeiros valores de velocidade e posição, principalmente ao se realizar as etapas de integração numérica das medidas retornadas pelo sensor (SILVA, 2015).

Devido à alta capacidade tecnológica e fácil acesso, *Smartphones* podem ser inseridos em contextos variados, surgindo assim como uma alternativa de baixo custo. Tais sistemas são compostos pela união de soluções tecnológicas e de informação com o intuito de proporcionar benefícios aos usuários.

No que diz respeito a acessibilidade, trata-se de uma ferramenta com inúmeras funcionalidades aos pedestres, como por exemplo na realização da tarefa de localização e orientação. Destaca-se também a inserção de *Smartphones* no cenário das cidades inteligentes, de forma que estes realizem interações com o ambiente, desde que tais cidades sejam providas de uma estrutura digital eficiente.

O conceito de cidade inteligente é bem abrangente. No contexto em que esse trabalho se propõe, cidade inteligente é aquela na qual um elevado número de informações pode ser distribuído em tempo real. As informações disponíveis tendem a tornar as atividades urbanas mais eficientes, de forma que esta eficiência se dá a partir do momento em que projetos são desenvolvidos visando transformar a mobilidade urbana e a economia (LEMOS, 2013).

Para que os sensores mencionados anteriormente retornem dados confiáveis, os movimentos gerados durante a coleta devem respeitar o teorema da amostragem de Nyquist. Isto garante que não haja perda de informações (subamostragem) e o resultado obtido com o processamento dos dados seja satisfatório.

O Teorema de Nyquist (ou Teorema da amostragem) define o número de amostras por segundo ( $f_s$ ) necessárias para que não haja perda de informações de um sinal, conforme a expressão (13), apresentada no Capítulo 2, Seção 2.1. Nela,  $f_{max}$  é a maior frequência do sinal. Assim, conclui-se que a frequência de amostragem de um sinal, deve ser pelo menos duas vezes maior que a máxima frequência que deve ser preservada do sinal a ser amostrado (COMER, 2016).

Partindo-se da afirmação do Teorema de Nyquist descrito anteriormente, este capítulo visa demonstrar a importância de quando o teorema é respeitado, para que sejam obtidos sinais com alto nível de confiança, assim como as consequências geradas quando o mesmo não é respeitado. Para demonstrar tais efeitos, utilizou-se um acelerômetro e um girômetro embarcados em um *Smartphone*, a fim de apresentar os resultados obtidos com a utilização da metodologia apresentada no Capítulo 2, para os casos onde o movimento gerado respeita o Teorema de Nyquist, e para casos onde o teorema não é respeitado. Para a validação experimental utilizou-se neste trabalho a plataforma Raspberry Pi em conjunto com o sensor InvenSense MPU-6050, com o intuito de se verificar a taxa de amostragem mínima necessária dos sensores utilizados. Pretende-se com isso demonstrar o estado atual em que se encontra a tecnologia dos referidos sensores embarcados em *Smartphones*, assim como propor algumas soluções para que os erros gerados sejam suavizados.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Dados reais**

Com o intuito de se alcançar as metas estabelecidas na Seção 1, utilizou-se para a aquisição de dados a metodologia descrita no Capítulo 2. Tal metodologia pode ser observada de forma resumida no diagrama da Figura 8, onde são utilizados dados dos sensores inerciais, e estes são filtrados e processados para se obter dados de posição. A fim de apresentar a importância de se respeitar o Teorema da amostragem de Nyquist, utilizou-se 100 Hz como taxa de aquisição do equipamento. O Anexo A item 1 apresenta o *Smartphone* utilizado para a coleta dos dados, assim como suas especificações.

### **2.2 Dados teóricos**

Foram gerados dados considerados “ideais” para atender ao Teorema de Nyquist. Posteriormente, foram retiradas algumas amostras deste conjunto a fim de demonstrar o que ocorre quando amostras são perdidas e qual é o seu efeito na etapa final, denominada “Dupla Integração”, apresentada no Capítulo 2, Figura 8. Neste caso, foi desenhada uma trajetória bidimensional (deslocamento no eixo  $X$  e  $Y$ , sendo  $Z$  constante e igual a 0), assumindo que as amostras representam perfeitamente a trajetória desejada. Neste ponto foram realizadas duas derivações consecutivas para se obter a aceleração. Para este pacote de dados considerou-se que não ocorreram mudanças na direção dos eixos coordenados, ou seja, a velocidade angular foi igual a zero que é equivalente a dizer que o giroscópio não detectou giros.

Desta forma, foi possível observar pontos onde a informação é completa. Por outro lado, eliminando amostras na aceleração foi possível observar o que acontece quando a informação



é perdida (subamostragem) e, conseqüentemente, uma demonstração dos efeitos nos resultados quando Nyquist não é respeitado.

### 2.3 Plataforma Raspberry Pi

Para a aquisição dos dados utilizou-se o sensor acelerômetro (MPU-6050) mencionado na Seção 1, onde a frequência de amostragem máxima atingida foi de 1 000 Hz, sendo esta 10 vezes maior que a frequência de aquisição atingida por sensores de *Smartphones*. Desta forma, tornou-se possível verificar as frequências atingidas pelos movimentos gerados. A Figura 29 presente no Anexo A, apresenta o esquema de montagem dos dispositivos utilizados para a aquisição dos dados.

### 2.4 Interpolação de dados

Para os dados que não respeitam o teorema de Nyquist utilizou-se o conceito de interpolação polinomial, baseado em *splines* cúbicos (CHAPRA; CANALE, 2016), a ser descrito na Seção 2.5. Este surge como uma alternativa para realizar o preenchimento das lacunas causadas pela baixa frequência de amostragem ou pela eliminação de amostras, como pode ser observado nas figuras apresentadas na Seção 2.6.

### 2.5 Descrição do método de interpolação

Como mencionado na Seção 2.4, a interpolação polinomial baseada em *splines* cúbicos pode ser utilizada como uma possível alternativa para se preencher as lacunas deixadas pelo sinal, quando Nyquist não é respeitado, de modo que a frequência de amostragem seja incrementada artificialmente. Desta forma, busca-se suavizar os erros gerados após a etapa de “Dupla Integração”. Tais lacunas deixadas pelo sinal foram preenchidas pela função *spline* com um número pré-determinado de amostras, sendo este número definido empiricamente como 8 amostras. Este tipo de interpolação assume uma transição suave (polinomial) entre duas amostras consecutivas, pelo qual tal suposição estará equivocada quando o sinal ultrapasse por muito a frequência de amostragem.

#### 2.5.1 Interpolação por spline

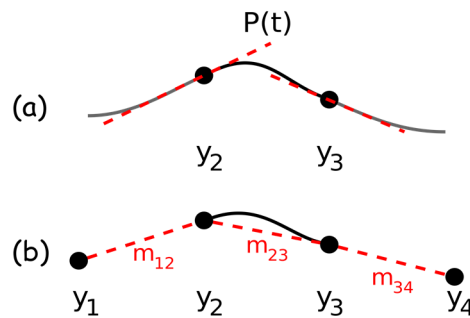
Para interpolar a informação entre duas amostras usando um polinômio de grau  $n$  é necessário ter a informação de  $n-1$  pontos (amostras) do sinal estudado e 2 valores de contorno (primeira derivada nos extremos). Por exemplo, usando 2 pontos do sinal e duas condições de contorno, pode-se gerar um polinômio de grau 3 (ver Figura 13.a). Essa curva estimaria todas as oscilações (pelo menos até a terceira derivada, inclusive) sugeridas por esses pontos.

Por outro lado, em algumas ocasiões não se tem explicitamente essas condições de contorno, e estas devem ser estimadas usando um método aproximado, como por exemplo a

derivada calculada por diferenças finitas, de modo que para interpolar a informação entre duas amostras usando um polinômio de grau  $n$  é necessário ter a informação de  $n+1$  pontos, sendo que os pontos extremos são usados para aproximar a derivada. Por exemplo, usando 4 pontos do sinal pode-se gerar um polinômio de grau 3 (ver Figura 13.b).

A aplicação de *splines* se dá para os casos em que uma função é contínua, ou seja, apresenta determinado padrão em determinados trechos. A Figura 13.a mostra como esta aproximação é feita para gerar um polinômio  $P(t)$  de grau 3 entre as amostras  $y_2$  e  $y_3$ . Nela, as linhas pontilhadas representam a primeira derivada nesses pontos. Com a ajuda deste polinômio muitas amostras podem ser geradas no espaço intermediário entre os dois pontos, porém estas aproximações serão pouco eficazes se o sinal estudado não tiver um comportamento monótono.

Figura 13 – Interpolação *spline* entre dois pontos com um polinômio de grau 3 (a) usando duas amostras e duas condições de contorno (b) usando quatro amostras.



Fonte: Do autor (2017).

### 2.5.2 Splines cúbicos

Neste trabalho foram utilizados *splines* cúbicos, onde um polinômio  $P(t)$  foi utilizado na interpolação, como é descrito na equação (17) e Figura 13.b,

$$P(t) = at^3 + bt^2 + ct + d, \quad (17)$$

com uma derivada  $P'(t)$  de  $P(t)$  que pode ser vista na equação (18),

$$P'(t) = 3at^2 + 2bt + c \quad (18)$$

de modo que  $t$  representa o tempo em que a amostra foi adquirida e  $P(t)$  representa o valor da amostra adquirida nesse tempo. Assim, seguindo o demonstrado na Figura 13.a nota-se que é necessário ter os valores da inclinação nas posições  $t_2$  e  $t_3$ . Para conseguir isto, são feitas aproximações ( $m_{12}$ ,  $m_{23}$  e  $m_{34}$ ) da derivada usando diferenças finitas como mostra as equações (19), (20) e (21) e Figura 13.b, de forma que  $h_{ij} = t_j - t_i$ .

$$m_{12} = \frac{y_2 - y_1}{h_{12}}, \quad (19)$$

$$m_{23} = \frac{y_3 - y_2}{h_{23}}, \quad (20)$$

$$m_{34} = \frac{y_4 - y_3}{h_{34}} \quad (21)$$

Deste modo, é gerado o seguinte sistema matricial, do qual as constantes usadas no polinômio da Eq. (17) podem ser obtidas.

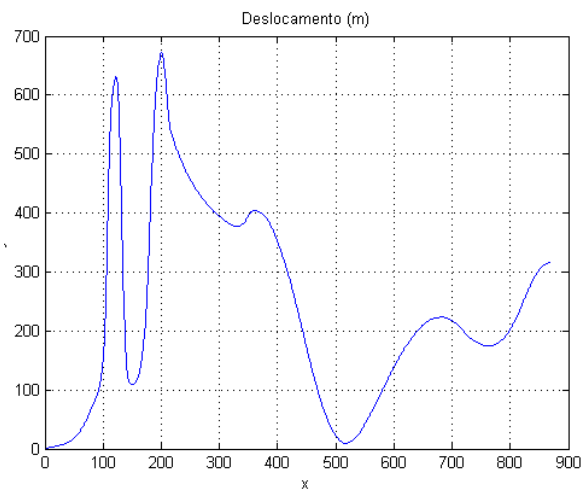
$$\begin{pmatrix} y_2 \\ y_3 \\ \frac{m_{12} + m_{23}}{2} \\ \frac{m_{23} + m_{34}}{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P(t_2) \\ P(t_3) \\ P'(t_2) \\ P'(t_3) \end{pmatrix} \quad (22)$$

## 2.6 Obtenção de dados

### 2.6.1 Criando dados ideais

O conjunto de dados considerado ideal apresenta comportamento semelhante ao trecho apresentado na Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Trajetória com o sinal simulado.

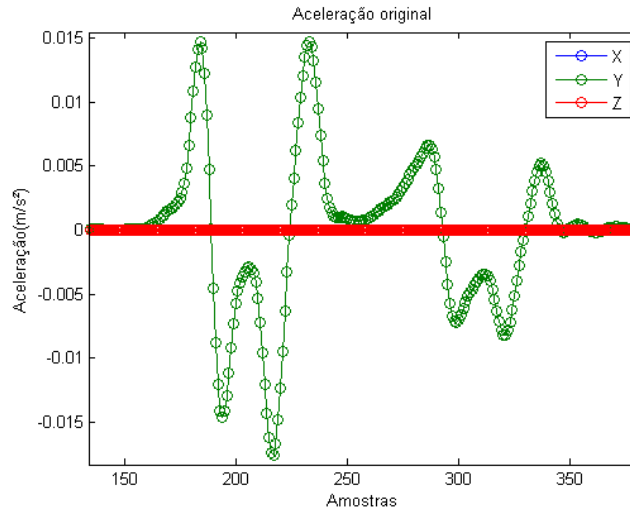


Fonte: Do autor (2017).

Esta imagem representa uma trajetória, nas coordenadas  $X$  e  $Y$ , perfeitamente descrita pelas amostras do desenho. Assim, a partir destes dados é possível calcular a aceleração no deslocamento da trajetória, realizando duas derivações em relação ao tempo. O sinal da Figura

15 mostra um trecho da aceleração calculada, assim, este sinal é considerado ideal, o que implica que não há perda de informação.

Figura 15 - Conjunto de dados ideal.

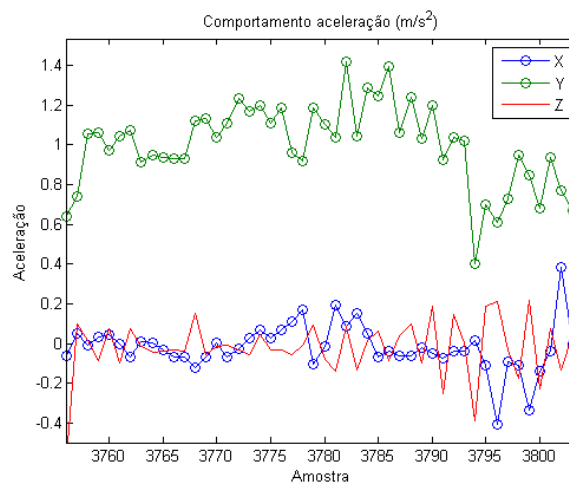


Fonte: Do autor (2017).

### 2.6.2 Obtendo dados reais

Com o auxílio do *Smartphone* mencionado na Seção 2.1, buscou-se preservar o teorema de Nyquist descrito na Seção 1, de forma a obter um sinal semelhante, ao menos em alguns trechos, como apresentado na Figura 15. Tal sinal gerado com o auxílio do *Smartphone* pode ser observado na Figura 16.

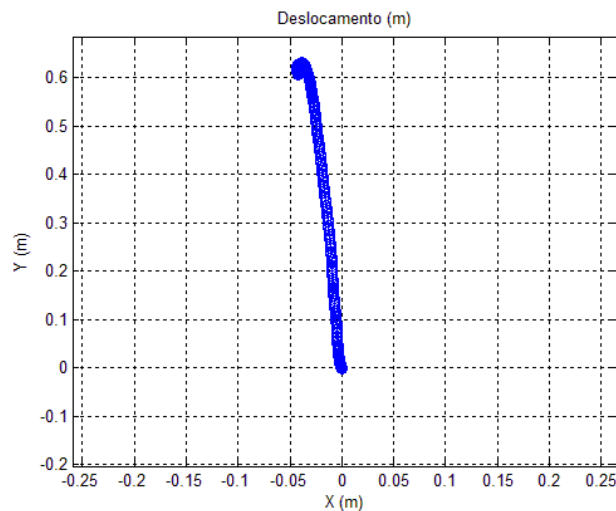
Figura 16 - Sinal gerado utilizando *Smartphone*.



Fonte: Do autor (2017).

Tendo em conta estes dados de aceleração e seguindo o procedimento descrito no diagrama de fluxo apresentado no Capítulo 2, é possível obter a trajetória da Figura 17, que reflete com uma boa aproximação o deslocamento realizado.

Figura 17 - Trajetória com o sinal do *Smartphone*.



Fonte: Do autor (2017).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

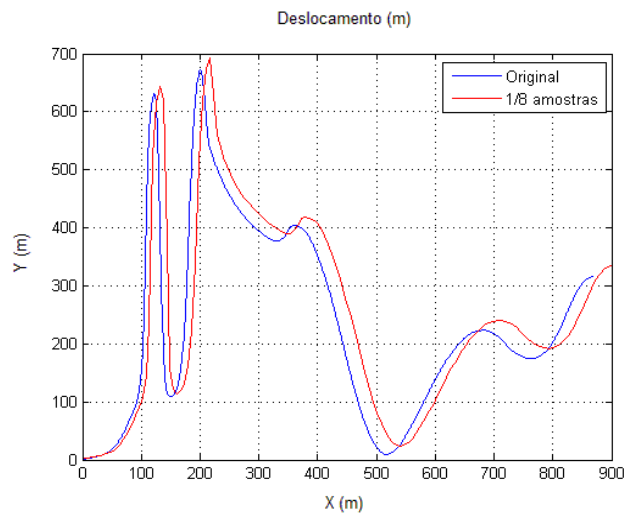
Para obtenção das trajetórias, a partir dos dados de aceleração, utilizou-se a metodologia descrita na Seção 2.

#### 3.1 Efeitos da sub amostragem sobre dados ideais

Para verificar o efeito ocasionado pelas lacunas deixadas em instantes em que o teorema da amostragem não é preservado, utilizou-se apenas 1/8 das amostras da aceleração ideal da Figura 15. Na Figura 18, em vermelho, é possível observar a nova trajetória obtida com o sinal processado após a retirada das amostras.

Observa-se na Figura 18 que a dinâmica da trajetória em vermelho continua semelhante à forma original em azul, entretanto observando-se os eixos  $X$  e  $Y$  é possível verificar que o deslocamento realizado não condiz com o desejado. Calculando-se o coeficiente de determinação das amostras que simulam perda de informação (trajetória vermelha), obteve-se um valor de aproximadamente 96%, valor que representa a porcentagem da precisão entre a trajetória gerada e a original.

Figura 18 - Trajetória com retirada de amostras do sinal simulado.

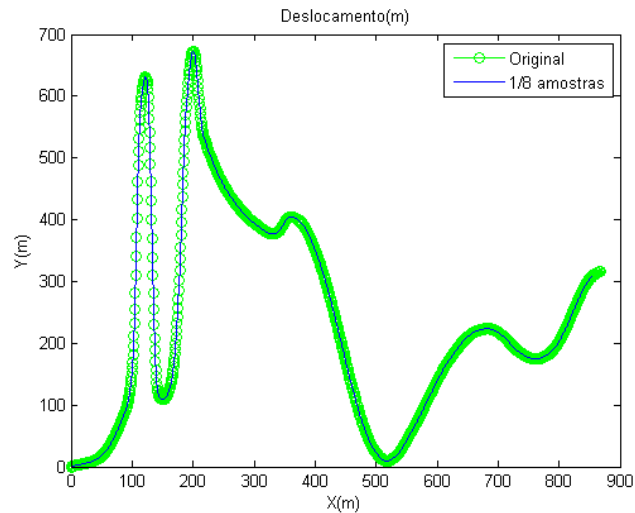


Fonte: Do autor (2017).

De acordo com o método apresentado na Seção 2.5, utilizou-se *splines* cúbicos com o intuito de melhorar o sinal obtido por acelerômetros e girômetros, de forma a preencher algumas lacunas deixadas em alguns instantes de tempo.

A Figura 19 apresenta um comparativo entre o deslocamento original e a trajetória obtida aplicando-se *splines* cúbicos ao sinal de aceleração que gerou a trajetória, em vermelho, na Figura 18 (sinal com perda de amostras). Observa-se que para este caso específico é possível restaurar o sinal original e a imagem gerada é extremamente semelhante à trajetória original, de forma que as duas se sobrepõem em quase todo movimento. Calculou-se o coeficiente de determinação para as amostras obtidas no deslocamento da figura em questão, onde obteve-se um valor em torno de 99,99%, ou seja, as amostras obtidas com a aplicação do *spline*, conseguiram aproximar-se das amostras originais com uma precisão de aproximadamente 99,99%. Em testes experimentais foi comprovado que retirando-se um número maior de amostras a imagem original não foi recuperada.

Figura 19 - Trajetória com a aplicação de *splines*.



Fonte: Do autor (2017).

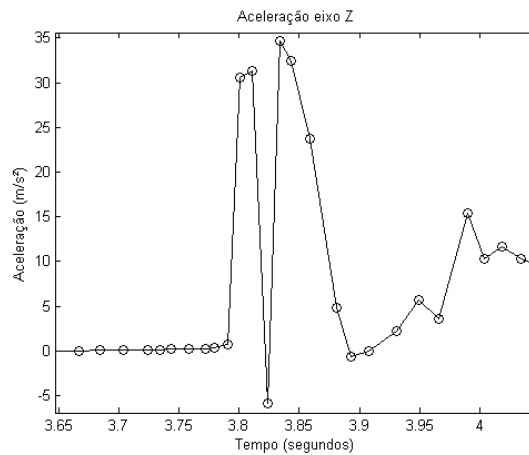
### 3.2 Efeitos da sub amostragem sobre dados reais

As Figuras 14 e 17 apresentam as respectivas trajetórias obtidas ao se processar os sinais de aceleração das Figuras 15 e 16, juntamente com seus correspondentes conjuntos de dados do sensor girômetro, conforme apresenta o diagrama de fluxo mencionado na Seção 2.1. Nestes casos, o teorema de Nyquist foi respeitado e as trajetórias se aproximam.

Por outro lado, há casos onde o teorema da amostragem não é preservado na aquisição de dados, ocasionando assim intervalos onde a informação é perdida. Tal evento gera consequências ao resultado final obtido após o processamento dos dados, de forma que são retornadas trajetórias com taxas de erros fora do aceitável e não condizentes com o deslocamento real realizado pelo dispositivo.

A Figura 20 destaca intervalos de amostragem obtidos com o sensor acelerômetro do *Smartphone* utilizado, onde ocorre uma evidente perda de informação, isto é, intervalos de tempo onde não se pode confiar que a dinâmica da aceleração foi realmente a retornada pelo sensor.

Figura 20 - Intervalos com perda de informações.

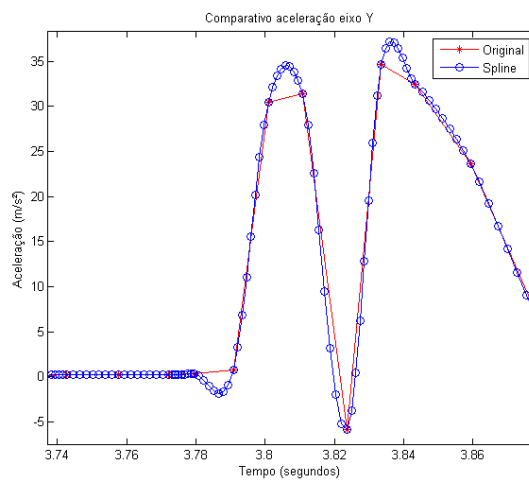


Fonte: Do autor (2017).

Pode-se observar facilmente que “faltam amostras” para completar a dinâmica do sinal entre os tempos (segundos) 3,8 e 3,9, isto se dá devido à baixa frequência de amostragem do sensor, comparada a frequência do movimento gerado. Em outras palavras, o movimento não respeitou ao teorema da amostragem, de forma que ao se aplicar a metodologia apresentada anteriormente, esta levará a uma trajetória com incertezas.

A Figura 21 apresenta um comparativo entre um sinal amostrado pelo sensor acelerômetro do *Smartphone* utilizado, e este mesmo sinal utilizando-se o método de *splines*. Constata-se que o sinal após a utilização do *spline* apresenta-se mais contínuo, ou seja, não há lacunas pois estas foram preenchidas com outras amostras criadas pelo método.

Figura 21 - Comparativo do sinal original com o sinal após aplicação do método *spline*.

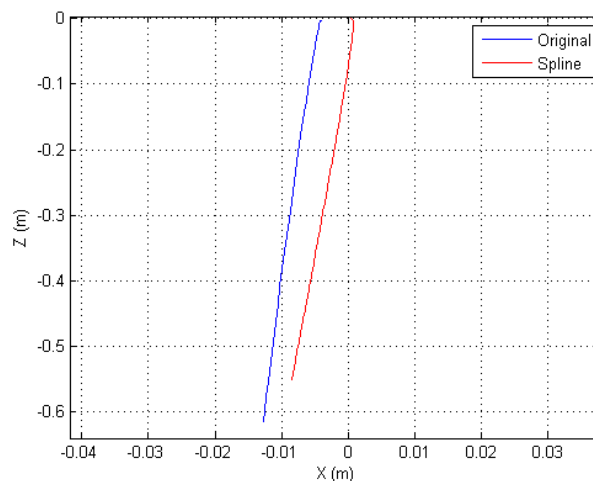


Fonte: Do autor (2017).



A Figura 22 apresenta um comparativo entre os deslocamentos antes e após aplicação do *spline*, para uma trajetória onde o dispositivo foi deixado em queda livre (sentido de aceleração no eixo  $z$ ) por aproximadamente 0,55 m. Analisando-se apenas o eixo  $z$  (eixo da queda livre), dado o deslocamento real (0,55 m), os dados originais apresentaram uma diferença percentual em torno de 11,6%, já os dados com a utilização de *splines* de aproximadamente 0,036%. Com relação ao eixo  $x$  (considerando deslocamento real igual a 0) tais diferenças foram de aproximadamente 1,28% e 0,85% para os dados originais e com *spline*, respectivamente.

Figura 22 - Comparativo de trajetórias obtidas em queda livre com o sinal original e o sinal utilizando-se o método *spline*.



Fonte: Do autor (2017).

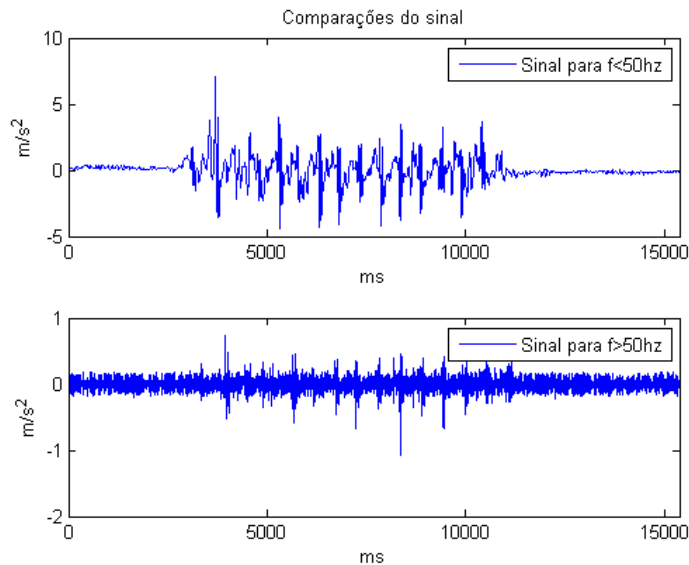
### 3.3 Verificação da frequência de amostragem mínima necessária utilizando a Plataforma Raspberry Pi

A fim de verificar a frequência atingida pelo movimento de uma pessoa caminhando e, conseqüentemente, definir a frequência de amostragem ideal dos sensores utilizados na coleta, para que não haja perda de informações, realizou-se a aquisição de dados usando um acelerômetro com alta frequência de amostragem (MPU-6050) conectado a plataforma Raspberry Pi, conforme descritos na Seção 2.3. O Anexo A item 2 apresenta a especificação de cada um dos dispositivos utilizados.

Conforme descrito no Capítulo 2, a frequência de amostragem atingida pelos sensores do *Smartphone* utilizado é de 100 Hz. Desta forma, realizou-se uma separação do sinal obtido com o sensor MPU-6050 (alta amostragem) em componentes com frequências acima e abaixo dos 50 Hz, a partir da utilização de filtros. A Figura 23 apresenta tal separação do sinal, a partir da qual torna-se possível observar que há perda de informações. Isto se deve porque as

componentes do sinal, para uma pessoa caminhando, atingem frequências superiores que 50 Hz praticamente em todo instante de tempo.

Figura 23 - Comparativo das componentes do sinal em frequências maiores e menores que 50 Hz.



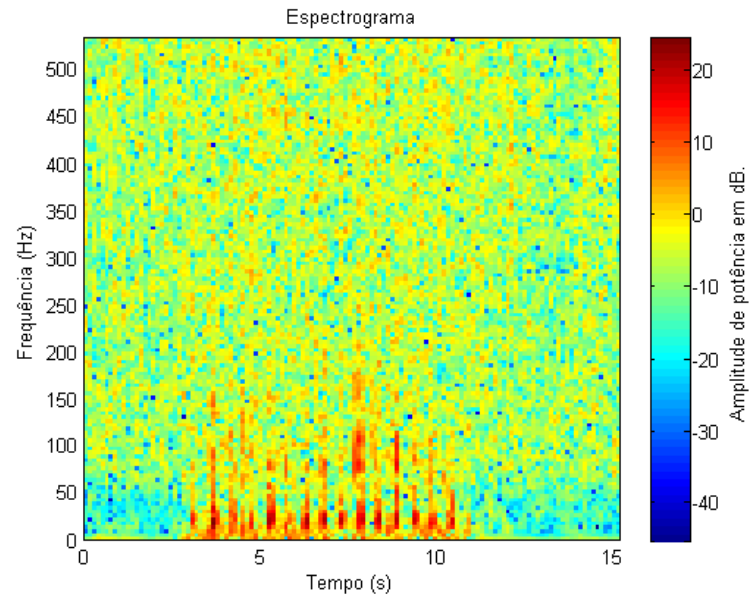
Fonte: Do autor (2017).

A partir da transformada de Fourier obteve-se o espectrograma do sinal adquirido conforme apresentado na Figura 24. O espectrograma permite verificar as faixas de frequências em que há componentes do sinal, assim como com qual intensidade estes se apresentam. As faixas que apresentam coloração mais avermelhada são aquelas em que há uma maior concentração das componentes do sinal. Pode-se notar que há uma grande concentração de componentes abaixo dos 50 Hz, contudo, há momentos que se atinge faixas próximas aos 200 Hz.

Com o intuito de facilitar a visualização das faixas de frequências atingidas, o gráfico da Figura 25 foi gerado a partir dos dados obtidos com a utilização do espectrograma. Nesta imagem, nota-se com uma maior clareza que as componentes do sinal atingem uma frequência máxima de aproximadamente 250 Hz, sendo que após esta frequência o sinal mistura-se com o ruído. De acordo com o teorema da amostragem mencionado na Seção 1, a frequência de amostragem mínima dos sensores para que não haja perda de informações deve ser o dobro da maior faixa de frequência atingida pelo sinal amostrado, portanto conclui-se que para uma

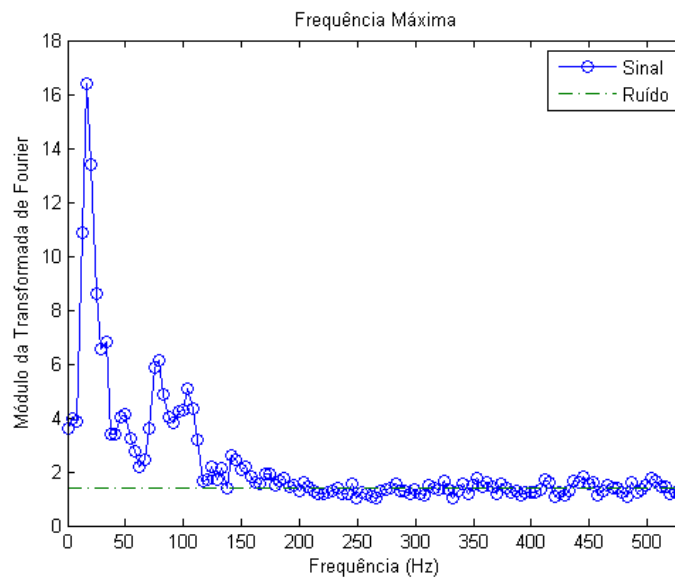
caminhada, ao se utilizar a metodologia descrita no Capítulo 2, os sensores devem possuir ao menos uma taxa de amostragem de 500 Hz.

Figura 24 - Espectrograma do sinal adquirido durante uma caminhada.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 25 - Freqüências atingidas pelo sinal.



Fonte: Do autor (2017).

## 4 CONCLUSÃO

Neste capítulo analisou-se a importância de quando o teorema da amostragem é respeitado, para que assim sejam obtidos dados com alto nível de confiança. Foi também apresentada uma possível solução baseada em *splines* cúbicos para que os erros gerados sejam suavizados.

Pode-se concluir que quando os sinais (dados gerados) não são completos, isto é, há falta de informação, conseqüentemente, o Teorema de Nyquist poderá não ser respeitado e, portanto, o desempenho da metodologia proposta não será satisfatório. Isso confirma o que foi apresentado nas Seções 2.6 e 3, e justifica a aplicação da metodologia de *splines* descrita na Seção 5. A metodologia de *splines* é apontada como uma possível solução para corrigir algumas lacunas (subamostragem) presentes nos sinais dos sensores, suavizando eventuais erros em trajetórias. Neste caso, é assumido que o sinal possui um comportamento monótono, hipótese que não pode ser considerada quando as perdas de dados são elevadas.

A Figura 15 apresenta um sinal simulado considerado ideal. Observando-se a Figura 18, fica evidente que ao se retirar amostras do sinal, ou seja, simulando o comportamento de um sinal onde há a perda de dados, embora a dinâmica da trajetória continue semelhante ao deslocamento realizado, tende a diferenciar-se do real, de forma que os deslocamentos errôneos são retornados.

A Figura 22 apresenta uma comparação entre uma curva antes e após a utilização de *splines*. Este método tende a melhorar os resultados obtidos após a dupla integração do sinal. No entanto, este não é capaz de corrigi-lo completamente pois os *splines* tendem a acompanhar a dinâmica do sinal, sendo capaz apenas de preencher as lacunas mas não de afirmar qual seria o comportamento real do mesmo, caso o teorema da amostragem fosse preservado. Assim, para a metodologia utilizada deve-se preservar o teorema da amostragem. Fica também evidente a necessidade da modernização dos sensores presentes nos *Smartphones* da atualidade, para que assim torne-se possível atingir uma faixa maior de frequências, conforme os resultados apresentados na Seção 3.3. Desta forma, possibilitaria então a execução de aquisições de dados e reconstrução de trajetórias de movimentos com uma amplitude maior de frequências em seu sinal, diferentemente dos sistemas contadores de passo que, por exemplo, não requerem uma grande taxa de amostragem. Estes sistemas contadores registram um passo à medida que o dispositivo identifica movimentos em seus eixos para cima e para baixo, conseqüentemente, à partir de uma configuração inicial da amplitude do passo é capaz de estimar a distância percorrida em função do número de passos realizados. Portanto, conclui-se que embora tais sistemas não necessitem de uma alta taxa de amostragem para estimarem a distância percorrida,

apresentam uma elevada taxa de erro nas distâncias estimadas, caso a amplitude do passo sofra variações durante o percorrido. Estes sistemas contadores também não são capazes de identificar em qual eixo do sistema de coordenadas está sendo realizado o deslocamento.

## REFERÊNCIAS

- ALMAZÁN, J.; et al. Full auto-calibration of a Smartphone on board a vehicle using IMU and GPS embedded sensors. **Intelligent Vehicles Symposium (IV) – 2013 IEEE**, p. 1374 – 1380, Gold Coast, QLD – Australia, 2013.
- ANDROID DEVELOPERS. **Motion sensors**. Disponível em: <[https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors\\_motion.html](https://developer.android.com/guide/topics/sensors/sensors_motion.html)>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- CARVALHO, S. G. Android Studio: Vantagens e Desvantagens com relação ao Eclipse. **iMasters**, n.8, p. 43, nov. 2013.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. McGraw Hill Brasil, 7 ed., 2016.
- CHO, B. S. et al. A dead reckoning localization system for mobile robots using inertial sensors and wheel revolution encoding. **Journal of mechanical science and technology**, v. 25, n. 11, p. 2907-2917, 2011.
- COMER, D.E. **Redes de Computadores e Internet**. 6. ed. Bookman, 2016.
- EMMENDOERFER, G. **Desenvolvimento e implementação de um sistema de medição inercial de trajetórias de dutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- KOTHARI, N. et al. Robust indoor localization on a commercial Smartphone. **The International Workshop on Cooperative Robots and Sensor Networks (RoboSense 2012)**. Procedia Computer Science 10, p. 1114-1120, 2012.
- LEMOES, A. Cidades Inteligentes. **GV-Executivo**, v. 12, n. 2, p. 46-49, 2013.
- LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- PEREIRA, W. **O Uso de Sistemas Inteligentes para o Aumento da Eficácia do Transporte Público por Ônibus: O Sistema de Bilhetagem Eletrônica**. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SHALA, U.; RODRIGUEZ, A. **Indoor positioning using sensor-fusion in android devices**. Part of the requirements for a *Degree of Master in Embedded Systems*. Kristianstad, Suécia, nov. 2011.
- SILVA, F. G. **Reconhecimento de movimentos humanos utilizando um acelerômetro e inteligência computacional**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SILVA, P. R. M. **Localização de robô em ambiente interno utilizando um dispositivo móvel baseado no sistema operacional android para Navegação inercial.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, fev. 2015.

TDK Invensense. **MPU - 6050.** Disponível em: <<https://www.invensense.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>>. Acesso em: 02 ago. 2017.

THE RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi.** Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-2-model-b/>>. Acesso em: 27 jan. 2017.

VIEIRA, L. P.; AGUIAR, C. E. **Experimentos com o acelerômetro de Tablets e Smartphones.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation.** University of Cambridge, Computer Laboratory, 2007.

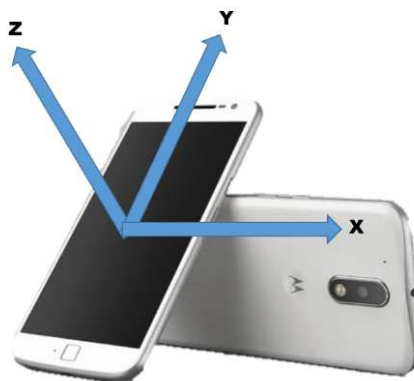
## ANEXO A – Hardware

### 1 Smartphone Moto G4 Plus

O *Smartphone* disponível foi o modelo Moto G4 Plus, fabricado pela empresa Motorola. Este dispositivo é apresentado na Figura 26, e possui as seguintes configurações:

- Sistema operacional: Android 7.0
- Peso: 157 gramas
- Chipset: Qualcomm Snapdragon 617MSM8952
- Processador: Quad-core 1.5 GHz Cortex-A53 + Quad-core 1.2 GHz Cortex-A53
- RAM: 2 GB
- Memória: 32 GB
- Resolução: 1080 x 1920 pixels
- Bateria: Lítio 3000 Mah
- Sensores: acelerômetro, proximidade, girômetro e impressão digital.

Figura 26 - *Smartphone* utilizado nos experimentos, modelo Moto G4 Plus e seu sistema de coordenadas.



Fonte: Do autor (2017).

#### 1.1 Sistema operacional Android

O sistema Android trata-se de uma plataforma de código aberto para dispositivos móveis (celulares, *tablet*, entre outros) que tornou-se a mais utilizada plataforma em *Smartphones* (SHALA; RODRIGUEZ, 2011).



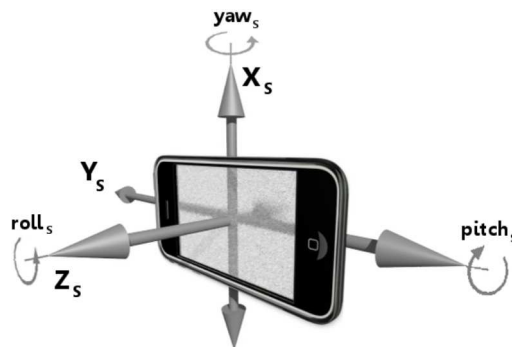
Diversos aplicativos podem ser criados para a plataforma Android, por meio do Android SDK (*Software Development Kit*). As ferramentas, bibliotecas e APIs necessárias para o desenvolvimento das aplicações estão todas contidas no SDK (SILVA, 2015).

Recentemente, a Google lançou um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) oficial, o Android Studio. Possui biblioteca *open-source* para programação na linguagem Java e diversas APIs que permitem integrar sistemas/tecnologias amplamente utilizadas pela comunidade de desenvolvedores (CARVALHO, 2013).

A plataforma Android disponibiliza acesso aos sensores do dispositivo. O acelerômetro é um sensor real, assim como o girômetro. No entanto, há também sensores que podem ser baseados em software, como o sensor de gravidade, de aceleração linear e sensores de rotação de vetores. Tais sensores baseados em software derivam seus dados de sensores reais. Por exemplo, os sensores de gravidade derivam seus dados do acelerômetro (grande maioria dos dispositivos atuais possui o sensor acelerômetro), e retornam um vetor tridimensional indicando a direção e magnitude da gravidade (ANDROID DEVELOPERS, 2017).

Normalmente, os *Smartphones* possuem um sistema de coordenadas orientado conforme apresenta a Figura 27 (ALMAZÁN et al., 2013).

Figura 27 - Sistema de referência de *Smartphones*.



Fonte: Almazán et al. (2013).

## 2 Raspberry Pi (C) 2011 e Invensense MPU-6050

Criado pela *Raspberru Pi Foundation*, o Raspberry Pi é um minicomputador desenvolvido com o intuito de estimular, nas escolas e universidades, o ensino da ciência da computação. Este dispositivo possui potencial de processamento significativo, embora possua o hardware em uma placa eletrônica única de tamanho reduzido, podendo ser utilizado em variados projetos tecnológicos, como por exemplo em experimentos remotos exercendo a função de um Micro servidor web (CROTTI et al., 2013).

Algumas características adicionais são apresentadas a seguir (TDK Invensense, 2017; THE RASPBERRY PI FOUNDATION, 2017):

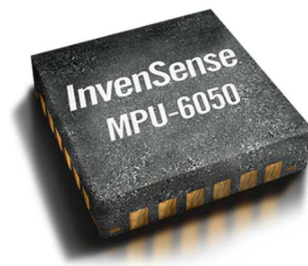
a) Raspberry Pi:

- Sistema operacional compatível: Linux
- Tensão de operação: 700mA.
- Processador: 700 MHz ARM11
- RAM: 256 MB
- Portas: USB (2), *Slot* MicroSD.

b) Invensense MPU – 6050:

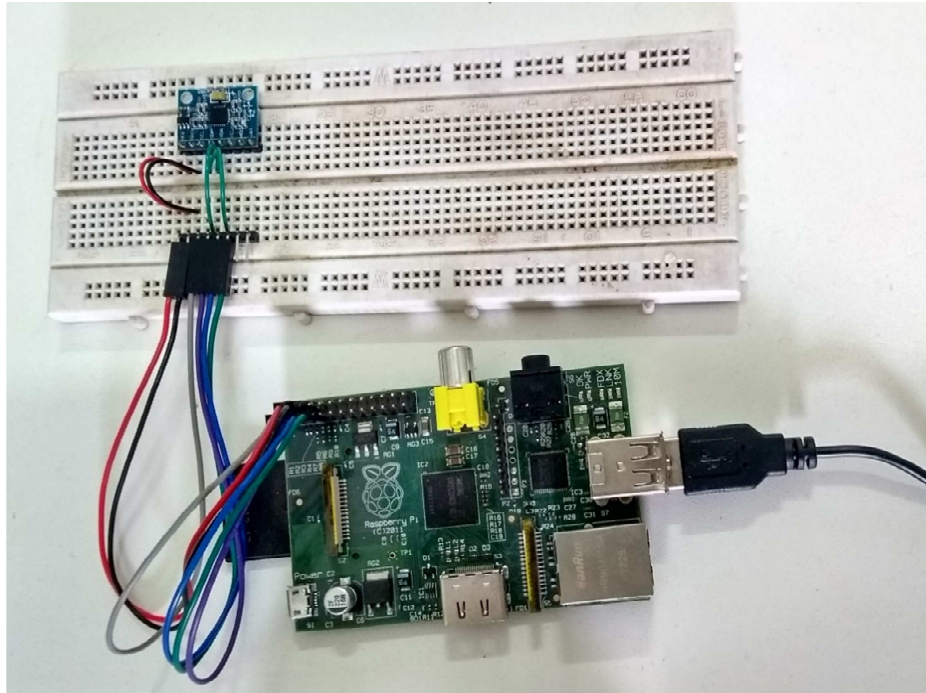
- Modelo: MPU – 6050 Six – Axis (*Gyro + Accelerometer*) MEMS MotionTracking Devices.
- Frequência de amostragem: Girômetro 8Khz e Acelerômetro 1 Khz.
- Tensão de operação: 2.375V–3.46V.
- Tamanho: 4x4x0.9 mm.
- Faixas de escala: Girômetro  $\pm 250 \pm 500 \pm 1000 \pm 2000$  °/sec e Acelerômetro  $\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16$  g.
- Descrição: o dispositivo combina um acelerômetro de 3 eixos e um girômetro de 3 eixos em uma única matriz de silício, em conjunto com um processador de movimento digital (DPM) integrado.

Figura 28 - Invensense MPU - 6050



Fonte: TDK Invensense (2017).

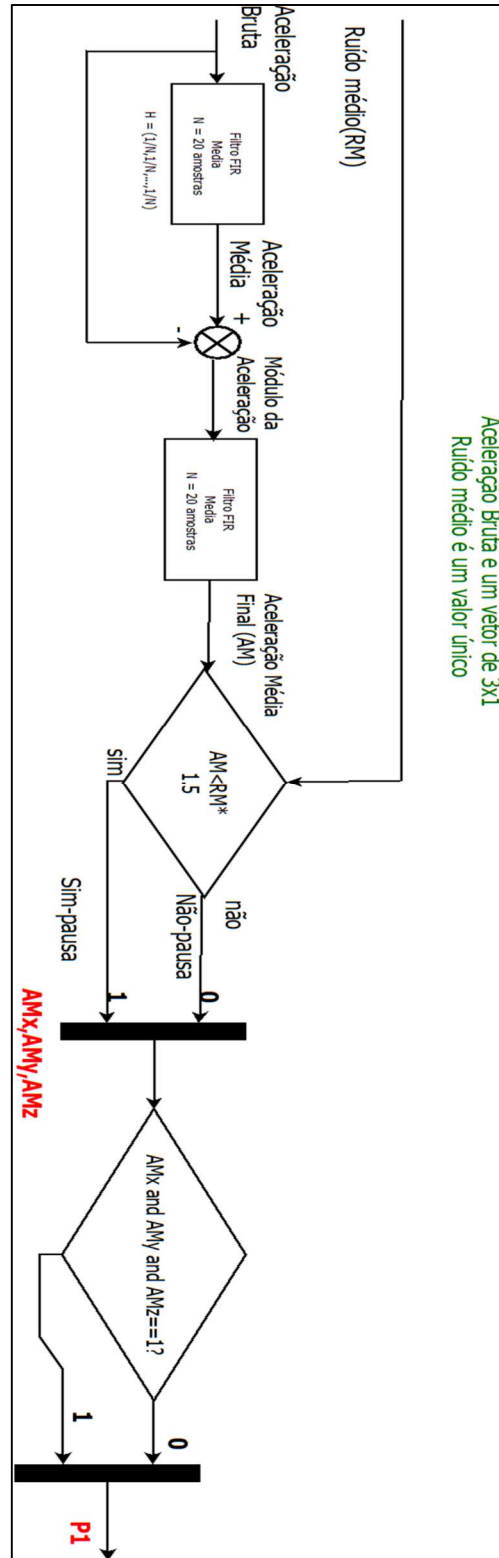
Figura 29 - Montagem do conjunto: Raspberry Pi + MPU – 6050.



Fonte: Do autor (2017).

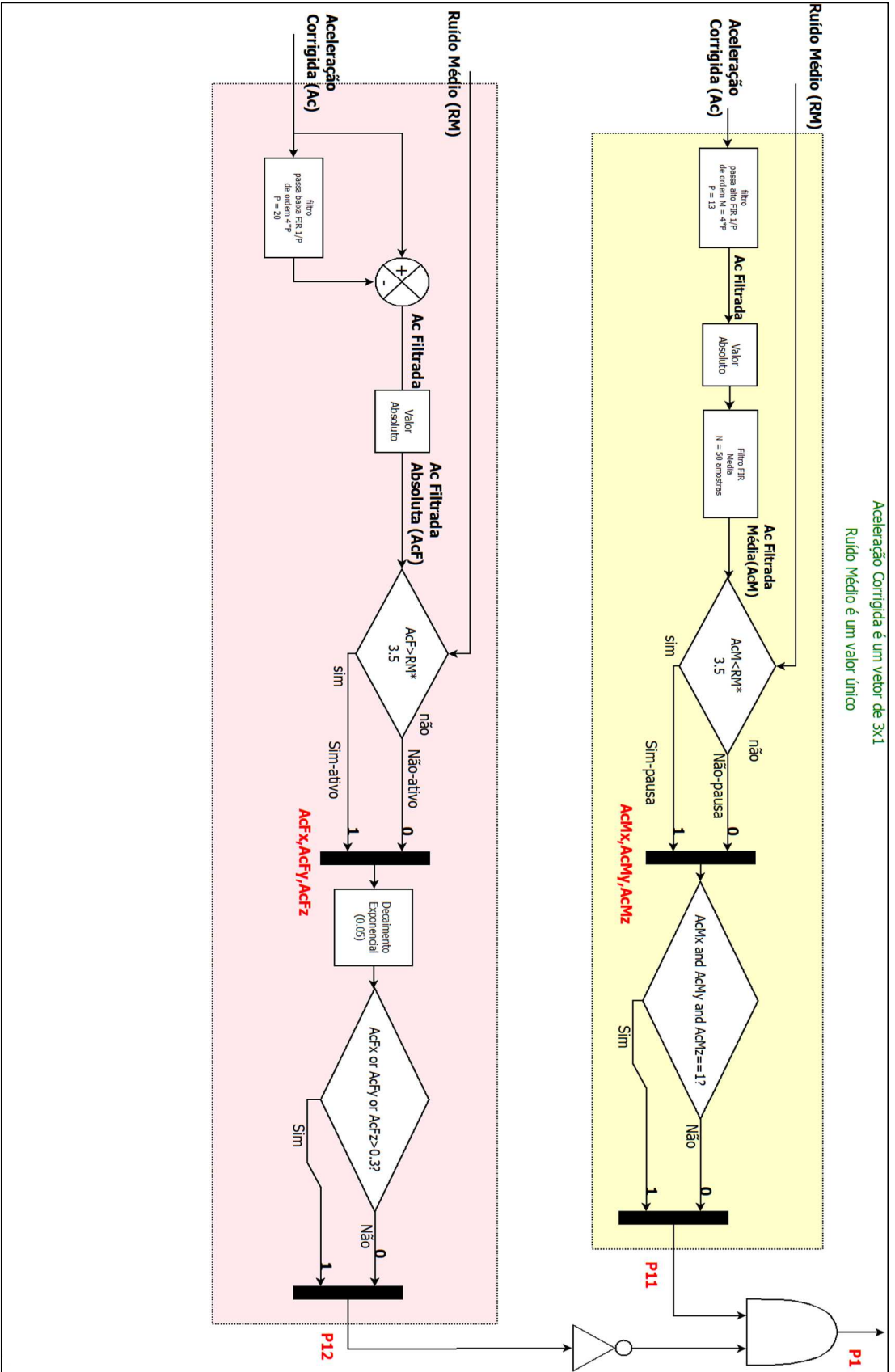
## ANEXO B – Fluxogramas dos módulos detectores de pausas

Figura 30 - Módulo detector de pausas 1



Fonte: Do autor (2017).

Figura 31 - Módulo detector de pausas 2



Fonte: Do autor (2017).