



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Danilo Carreiro Calache

**Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas
Microeletromecânicos (MEMS)**

Rio de Janeiro
2013

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C141 Calache, Danilo Carreiro.
Caracterização de um Acelerômetro Baseado em
Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) / Danilo Carreiro
Calache. – 2013.
89f.

Orientador: José Paulo Vilela Soares da Cunha.
Projeto Final (Graduação) - Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
Bibliografia p.66-69.

1. Engenharia elétrica. 2. Acelerômetros. 3. Dispositivos
eletromecânicos. I. Cunha, José Paulo Vilela Soares da. II.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 621.3

Danilo Carreiro Calache

**Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas
Microeletromecânicos (MEMS)**



Projeto de graduação apresentado, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, à Faculdade de Engenharia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. José Paulo Vilela Soares da Cunha

Rio de Janeiro
2013

Danilo Carreiro Calache

**Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas
Microeletromecânicos (MEMS)**

Projeto de graduação apresentado,
como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro Eletricista, à
Faculdade de Engenharia, da
Universidade do Estado do Rio de
Janeiro.

Aprovado em 11 de junho de 2013.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Paulo Vilela Soares da Cunha (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Téo Cerqueira Revoredo
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Fernando Agustin Pazos
Faculdade de Engenharia – UERJ

Rio de Janeiro
2013

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Paulo Vilela Soares da Cunha por me orientar além do projeto de graduação.

Aos meus pais Jorge e Lenira pela paciência e apoio. Aos meus irmãos Suzanna e Thiago pelo exemplo que sempre me deram e a minha namorada Thieline Bard de Oliveira por sempre acreditar em mim.

RESUMO

CALACHE, Danilo Carreiro. *Caracterização de um Acelerômetro Baseado em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)*. 2013. 89 f. Projeto Final (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Neste trabalho são apresentados e aplicados métodos para a calibração e caracterização de um acelerômetro MEMS triaxial. Também é desenvolvido e testado experimentalmente um sistema de controle de posição que utiliza o acelerômetro e um sensor de posição para construir um observador de estado independente dos parâmetros do mecanismo posicionador. Devido ao seu baixo custo, peso e tamanho, acelerômetros microeletromecânicos (*micro-electro-mechanical systems* – MEMS) são viáveis como sensores adicionais que garantam maior robustez e melhor desempenho em sistemas de controle de posição. Os acelerômetros são uma alternativa ao uso de tacogeradores, geralmente maiores e mais onerosos que acelerômetros MEMS. Os resultados obtidos mostraram a vantagem de se utilizar o acelerômetro no sistema melhorando a precisão do posicionamento.

Palavras-chave: Acelerômetro. MEMS. Caracterização. Observador de estados.

ABSTRACT

In this work, it is described and applied a procedure for the calibration and characterization of a accelerometer MEMS. A a position control system is also developed and experimentally tested. The system is based on an accelerometer and a position sensor applied in the design of a state observer independent of the parameters of the controlled mechanical positioning system. Micro-electro-mechanical systems (MEMS) accelerometers are reliable sensors due to their low cost, lightweight and small size, characteristics which can guarantee robustness and performance improvements in position control systems. They are an alternative to tachogenerators, which are generally larger and more expensive than MEMS accelerometers. The results showed the advantage of using the accelerometer in the system improving the positioning accuracy.

Keywords: Accelerometer. MEMS. Characterization. State Observer.

Lista de figuras

Figura 2.1: Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS (Acar e Shkel, 2003).....	18
Figura 2.2: Representação conceitual de um acelerômetro (Kaajakari , 2009).....	19
Figura 2.3: Modelo simplificado do transdutor capacitivo extraído do datasheet MMA7260 QT da Freescale.....	20
Figura 2.4: Circuito impresso com o acelerômetro MMA7260QT.....	22
Figura 2.5: Diagrama eletrônico do circuito auxiliar com o acelerômetro extraído de http://www.pololu.com/picture/view/0J672	23
Figura 3.1: Servomecanismo para movimentos angulares	25
Figura 3.2: Servomecanismo para movimentos lineares.....	26
Figura 3.3: Conexões entre o acelerômetro, o servomecanismo e a placa de aquisição de dados.....	27
Figura 3.4: Cabo para conexão do acelerômetro.....	27
Figura 4.1: Diagrama em blocos do experimento rotativo.....	30
Figura 4.2: Acelerômetro montado no servomecanismo da Quanser SRV-02.....	31
Figura 4.3: Gráfico ângulo medido pelo acelerômetro x ângulo medido pelo potenciômetro	34
Figura 4.4: Ampliação do gráfico para tentar visualizar a histerese em torno da origem.....	35
Figura 4.5: Acelerômetro fixado a o servomecanismo SRV-02.....	37
Figura 4.6: Saídas do acelerômetro para movimento giratório.....	37
Figura 5.1: Esquema mecânico do sistema, adaptado de Silva e Antunes (2010).....	43
Figura 5.2: Modelo simplificado do motor.....	44
Figura 5.3: Diagramas de blocos do controle com observador: (a) Sem acelerômetro, (b) com acelerômetro.....	48
Figura 5.4: Diagrama de blocos do sistema e do observador de estado.....	51
Figura 5.5: Diagrama em blocos do controlador com observador sem acelerômetro.....	55
Figura 5.6: Diagrama em blocos do controlador com observador com acelerômetro.....	55
Figura 5.7: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s	56
Figura 5.8: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s	57
Figura 5.9: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s.....	58

Figura 5.10:Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s	59
Figura 5.11: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s	60
Figura 5.12 Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s	61
Figura 5.13: Sinais de controle para autovalores iguais a -2 rad/s e 1,5 rad/s	62
Figura 5.14:Sinais de controle para autovalores iguais a -20 rad/s e 15 rad/s	62
Figura 5.15: Sinais de controle para autovalores iguais a -200 rad/s e 150 rad/s	63
Figura B.1: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	71
Figura B.2:Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	72
Figura B.3: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	73
Figura B.4: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	74
Figura B.5: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	75
Figura B.6: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 600mV/g	75
Figura B.7: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	76
Figura B.8: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	77
Figura B.9: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	77
Figura B.10: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	78
Figura B.11: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	79
Figura B.12: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 300mV/g	79
Figura B.13: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 200mV/g	80

Figura B.14: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 200mV/g.....	81
Figura B.15: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 200mV/g.....	81
Figura B.16: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 200mV/g.....	82
Figura B.17: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 200mV/g.....	83
Figura B.18: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 200mV/g.....	83

Lista de tabelas

Tabela 1.1: Aplicações típicas para acelerômetros e suas características desejáveis (Beeby et al. 2004).....	16
Tabela 2.3.1: Principais características do acelerômetro MMA7260QT.....	25
Tabela 4.1.1: Calibração sensibilidade 800 mV/g.....	33
Tabela 4.1.2: Calibração sensibilidade 600 mV/g.....	33
Tabela 4.1.3: Calibração sensibilidade 300 mV/g.....	33
Tabela 4.1.4: Calibração sensibilidade 200 mV/g.....	34
Tabela 4.1.5: Resumo dos parâmetros medidos.....	34
Tabela 4.4.1: Ângulo entre os eixos do acelerômetro.....	40
Tabela 4.4.2: Desvio de zero e sensibilidade.....	40
Tabela 4.5.1: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 800 mV/g.....	42
Tabela 4.5.2: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 200 mV/g.....	42
Tabela 5.6.1: Autovalores usados nos observadores.....	55
Tabela A.1: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 600 mV/g.....	71
Tabela A.2: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 300 mV/g.....	71

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

e_a – Tensão aplicada a armadura do motor

e_{est} – Erro de estimação

e_{obs} – Erro de observação

e_p – Tensão sobre o potenciômetro

f_c – Frequência de corte

g – Valor da aceleração da gravidade local

K – Vetor de ganho do controlador

L – Vetor de ganho do observador

MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems* – Sistemas microeletromecânicos

p – Posição

p_c – Polinômio característico

r – Ruído

u – Sinal de controle

x – Vetor de estados

x_{out} – Saída do eixo x do acelerômetro

y – Saída do sistema

y_{out} – Saída do eixo y do acelerômetro

z_{out} – Saída do eixo z do acelerômetro

α – Ângulo de defasagem entre o eixo do acelerômetro e a referência

β – Ângulo entre os eixos do acelerômetro

λ_1, λ_2 – Autovalores do sistema

σ – Desvio padrão

Sumário

1 Introdução.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Organização do trabalho.....	16
2 Sistemas Microeletromecânicos.....	17
2.1 Acelerômetros MEMS.....	17
2.2 Alguns tipos de Acelerômetros MEMS.....	20
2.2.1 Piezoresistivos	20
2.2.2 Capacitivos	20
2.2.3 Piezoelétricos	21
2.2.4 Efeito túnel	21
2.3 Acelerômetro MMA7260QT.....	22
3 Aparato experimental.....	25
3.1 Servomecanismo SRV-02.....	25
3.2 Servomecanismo IP-01.....	26
3.3 Sistema de aquisição de dados.....	26
4 Caracterização.....	28
4.1 Calibração.....	28
4.1.1 Experimento Para Calibração.....	30
4.2 Histerese.....	33
4.3 Não-linearidade em medição de ângulos.....	35
4.4 Ortogonalidade entre os eixos.....	36
4.5 Análise do ruído no sistema.....	39
5 Aplicação do acelerômetro em um sistema de controle.....	42
5.1 Modelagem Dinâmica do Sistema.....	42
5.2 Observador de estados:.....	47
5.3 Controle com observador convencional.....	48
5.4 Sistema controlado com observador e acelerômetro.....	52
5.5 Sistema controlado com observador e acelerômetro com desvio de zero estimado..	53
5.6 Experimentos e resultados.....	54
6 Considerações finais.....	64

6.1 Propostas para trabalhos futuros.....	64
Referências Bibliográficas.....	66
Apêndice A –Resultados Adicionais do experimento de análise do ruído.....	70
Apêndice B –Resultados adicionais do experimento de controle de posição.....	71
B.1.Sensibilidade em 600 mV/g.....	71
B.2.Sensibilidade em 300 mV/g.....	76
B.3.Sensibilidade em 200 mV/g.....	80
Apêndice C –Programa para o Calculo do Ruído RMS e do Valor médio do Sinal.....	84
Apêndice D –Programa para O Calculo Da Ortogonalidade	85
Apêndice E –Programa para o Calculo dos Ganhos do Controlador sem acelerômetro.....	87
Apêndice F –Programa para o Calculo dos Ganhos do Controlador com acelerômetro.....	88
Apêndice G –Programa para o Calculo dos Ganhos do Controlador com acelerômetro e estimador de offset.....	89

1 INTRODUÇÃO

Sensores são partes fundamentais de um sistema de controle e precisam medir de forma aceitável a variável de interesse. Apesar de apresentarem boa exatidão, acelerômetros microfabricados podem produzir erros que inviabilizariam o seu uso. A caracterização desses dispositivos é importante para que se conheçam bem suas peculiaridades e assim determinar se é válida a sua utilização em uma determinada aplicação.

Acelerômetros encontram aplicações tanto no setor militar (guiamento de mísseis e navegação inercial) quanto no setor civil. Na indústria podem ser utilizados para a monitoração de vibrações em máquinas e equipamentos, em automóveis são utilizados no mecanismo de disparo de *air bags* e em ensaios de colisão. Até mesmo na área da saúde esses dispositivos são encontrados auxiliando o estudo de distúrbios do sono e detecção de variáveis fisiológicas (Figueiredo et. al., 2007).

Observando a Tabela 1.1 pode-se perceber que as aplicações de acelerômetros são bem variadas assim como suas características desejáveis.

Graças a fabricação em larga escala (o que leva a um custo reduzido) e ao seu desempenho satisfatório para vários projetos, os acelerômetros microfabricados estão conquistando rapidamente novas áreas de aplicação (Beeby et al., 2004).

Os acelerômetros conseguem medir a aceleração de forma indireta, ou seja, uma massa, dentro do acelerômetro, quando este é acelerado fica submetida a uma força inercial que pode então ser medida (Junior, 2010).

Tabela 1.1: Aplicações típicas para acelerômetros e suas características desejáveis (Beeby et al. 2004)

Aplicação	Banda	Resolução	Alcance dinâmico
<i>Air bag</i>	0 – 0,5 kHz	< 500 mg	± 100 g
Controle de estabilidade de automóveis	0 – 0,5 kHz	< 10 mg	± 2 g
Navegação inercial	0 - 100 Hz	< 5 µg	± 1 g
Aplicações médicas	0 – 100 Hz	< 10 mg	± 100
Medida de vibrações	1 – 100 kHz	<100 mg	± 10 ⁴ g
Realidade virtual	0-100 Hz	< 1 mg	± 10 g
Medida de microgravidade	0 – 10 Hz	< 1µg	± 1 g
Munição inteligente	10 Hz – 100 kHz	1 g	± 10 ⁵ g
Monitoração de pacotes frágeis	0 – 1 kHz	< 100 mg	± 10 ³ g

Os acelerômetros conseguem medir a aceleração de forma indireta, ou seja, uma massa, dentro do acelerômetro, quando este é acelerado fica submetida a uma força inercial que pode então ser medida (Junior, 2010).

A unidade apropriada para a medida da aceleração é metros por segundo ao quadrado (m/s^2) mas segundo Rodrigues et al. (2010), apesar de não fazer parte do Sistema Internacional de Unidades, a unidade g que significa a aceleração da gravidade local (no caso $9,788 m/s^2$) é amplamente utilizada por fabricantes e especialistas da área para indicar níveis de aceleração. Por isso durante este projeto utilizaremos também esta unidade.

1.1 Objetivos

Com base em artigos publicados como Ang et al. (2007) os objetivos desse trabalho são estudar as características de um acelerômetro do tipo MEMS

(*Micro-Electro-Mechanical Systems*) e desenvolver procedimentos para medir essas características. Além disso outro objetivo é desenvolver um controle de servomecanismo com o auxílio do acelerômetro.

1.2 Organização do trabalho

Primeiramente, no capítulo 2 este trabalho faz um breve estudo da tecnologia MEMS, mais especificamente dos acelerômetros microfabricados.

No capítulo 3 são apresentados os equipamentos onde os experimentos foram realizados.

No decorrer do capítulo 4 é feita a caracterização do acelerômetro onde são definidos os parâmetros desvio de zero e sensibilidade e seus valores são obtidos através da calibração.

Para observar o acelerômetro em um sistema de controle, no capítulo 5 são desenvolvidos controladores para um sistema de posicionamento linear com e sem o uso do acelerômetro e posteriormente são apresentados os resultados obtidos.

As considerações finais são apresentadas no capítulo 6 juntamente com sugestões para trabalhos futuros que possam complementar o projeto desenvolvido.

2 SISTEMAS MICROELETROME CÂNICOS

Sistema Microeletromecânico ou MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*, em inglês) foi o termo criado no fim dos anos 80 nos Estados Unidos para descrever sistemas miniaturizados compostos basicamente de um sensor, que insere informações no sistema, um circuito eletrônico que trata o sinal do sensor e um atuador que responde ao sinal gerado pelo circuito eletrônico (Beeby et al., 2004). Com o passar do tempo esse termo passou a ser usado também para microssistemas sem atuadores. Os dispositivos MEMS são ditos as menores máquinas criadas pelos humanos (Korvink e Paul, 2006).

Os MEMS são construídos em sua grande maioria de silício utilizando técnicas de fabricação similares as dos circuitos integrados (Beeby et al., 2004).

2.1 Acelerômetros MEMS

Em Roylance e Angell (1979) foi reportado o primeiro acelerômetro MEMS, o que deu início à pesquisa de sensores inerciais microfabricados e desde então essa área tem sido objeto de intensa pesquisa. Atualmente os acelerômetros microfabricados são amplamente utilizados e possuem o segundo maior volume de vendas entre os dispositivos MEMS ficando atrás apenas dos sensores de pressão (Acar e Shkel, 2003).

Os acelerômetros MEMS possuem o mesmo princípio básico dos acelerômetros discretos, ou seja, são basicamente um sistema massa, mola e amortecedor mas obviamente em uma escala muito reduzida.

A Figura 2.1 mostra a fotografia do sistema massa-mola de um acelerômetro MEMS.

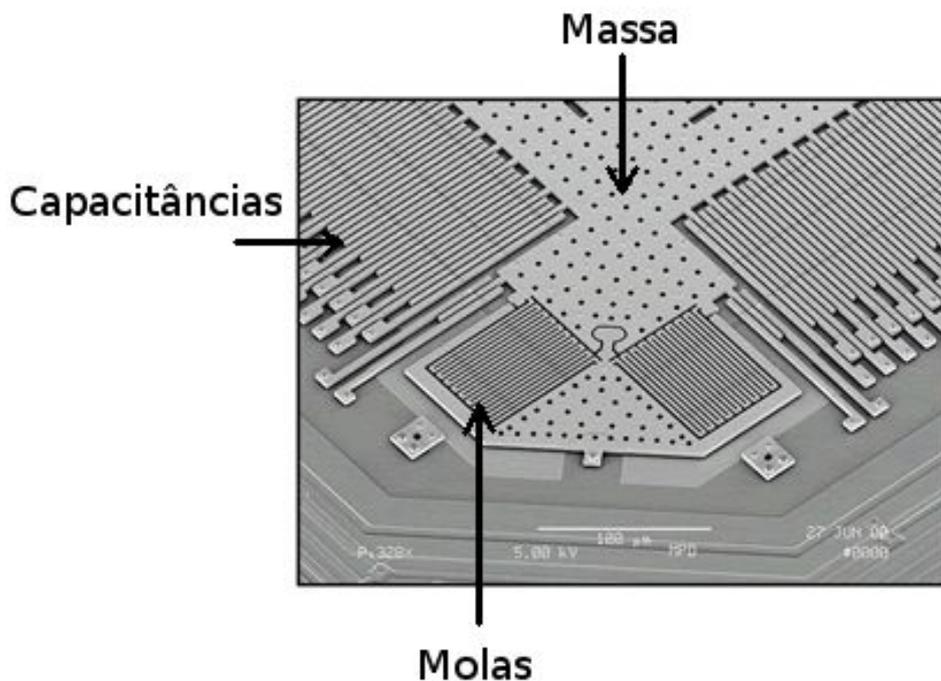


Figura 2.1:Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS (Acar e Shkel, 2003)

Como foi dito anteriormente, o princípio básico de operação dos acelerômetros consiste em uma massa de prova, conectada a uma referência através de uma mola com coeficiente elástico k e um amortecedor com coeficiente de amortecimento γ , ou seja, um sistema massa-mola- amortecedor como o ilustrado na Figura 2.2.

Devido a inércia, o movimento da massa de prova m não será exatamente o mesmo do que o da referência, assim, é possível usar essa diferença de posição ($x=x_f - x_m$) para medir a aceleração.

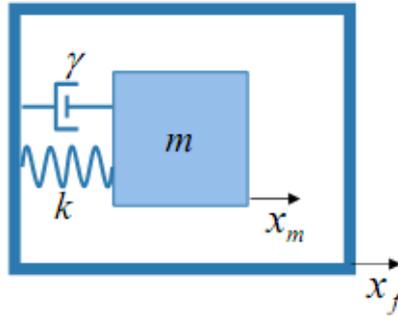


Figura 2.2: Representação conceitual de um acelerômetro (Kaajakari , 2009).

A partir da segunda lei de Newton pode-se modelar o sistema e encontrar a seguinte equação diferencial:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + kx = F \quad (2.1)$$

Onde m é a massa de prova, x é a diferença entre a posição de referência x_f e a posição da massa x_m , γ o coeficiente de amortecimento, k o coeficiente de elasticidade da mola e F a força aplicada ao sistema.

Usando a transformada de Laplace para resolver a equação (2.1) e definindo a frequência natural do sistema ω_0 como:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

e o fator de qualidade Q como:

$$Q = \omega_0 \frac{m}{\gamma} \quad (2.3)$$

obtemos a função de transferência H_s do sistema:

$$H_s = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (2.4)$$

2.2 Alguns tipos de Acelerômetros MEMS

Os acelerômetros podem ser classificados de acordo com o transdutor utilizado.

2.2.1 Piezoresistivos

Esses acelerômetros utilizam materiais piezoresistivos nas suas molas. Com o movimento, a resistência do material piezoresistivo varia possibilitando assim que a aceleração seja deduzida (Kaajakari, 2009).

Esse tipo de acelerômetro MEMS foi o primeiro a ser desenvolvido Roylance e Angell (1979).

Apesar de ser simples para se implementar, esses acelerômetros consomem bastante energia e são muito suscetíveis a ruídos (Kaajakari, 2009) e a temperatura (Korvink e Paul, 2006).

2.2.2 Capacitivos

Nos acelerômetros do tipo capacitivo a massa de prova fica localizada entre duas placas paralelas formando assim dois capacitores, como mostrado na Figura 2.3. A aceleração então pode ser medida de acordo com a capacitância entre as placas que varia com a posição da massa de prova (placa central) (Korvink e Paul, 2006).

Diferentemente dos acelerômetros piezoresistivos, os capacitivos conseguem gerar um sinal de saída grande e com melhor sensibilidade (Beeby et al. 2004).

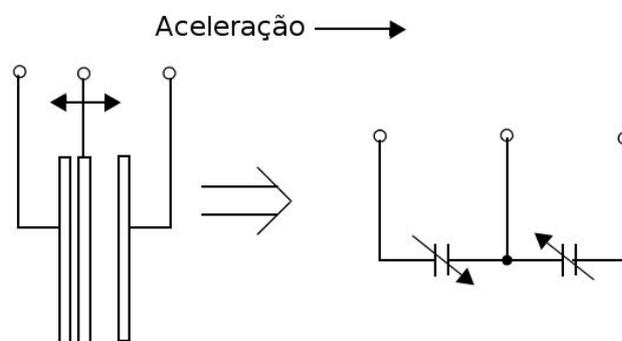


Figura 2.3: Modelo simplificado do transdutor capacitivo extraído do datasheet MMA7260 QT da Freescale

Os acelerômetros do tipo capacitivo são os mais utilizados devido ao seu baixo custo, baixo consumo de energia e baixa suscetibilidade a ruído (Kaajakari, 2009).

Uma desvantagem desse tipo de acelerômetro é a sua sensibilidade a campos magnéticos, por isso é preciso blindá-lo durante a fabricação ou na utilização (Beeby et al. 2004).

Esse trabalho utilizou em seus experimentos um acelerômetro MEMS do tipo capacitivo.

2.2.3 Piezoelétricos

Acelerômetros convencionais normalmente utilizam transdutores piezoelétricos para medir o deslocamento da massa de prova e alguns acelerômetros MEMS utilizam esse mesmo princípio (Kaajakari, 2009).

A grande vantagem em se utilizar um transdutor piezoelétrico é a larga banda que esses dispositivos possuem (Beeby et al. 2004). Foi descrito por Nemirovsky et al. (1996) um acelerômetro com sensibilidade de 320 mV/g e com uma resposta de frequência de 1 Hz até 200 kHz.

A desvantagem desses dispositivos é que eles não respondem em baixas frequências ou parados por causa da pequena carga inicial que os materiais piezoelétricos necessitam para funcionar (Beeby et al. 2004).

2.2.4 Efeito túnel

Um novo tipo de acelerômetro de alto desempenho vem sendo desenvolvido e utiliza o efeito túnel para medir a aceleração através da corrente que passa de uma ponta afiada até um eletrodo. Devido à relação exponencial entre a corrente de tunelamento e a distância da massa de prova é possível conseguir um alto desempenho com esses dispositivos. Teoricamente esse é o mecanismo de detecção mais sensível de todos (Beeby et al. 2004).

2.3 Acelerômetro MMA7260QT

O acelerômetro MMA7260QT do fabricante Freescale foi escolhido para realização dos experimentos por medir a aceleração em três eixos, possuir sensibilidade selecionável e saídas analógicas. Este é um acelerômetro capacitivo, triaxial com alcance selecionável entre $\pm 1,5g$, $\pm 2g$, $\pm 4g$ e $\pm 6g$. Sua área é de 36 mm^2 e ele possui compensação de temperatura. O consumo de corrente de alimentação I_F é de $500 \mu\text{A}$ quando em funcionamento normal e de $3 \mu\text{A}$ no modo de espera. Vale a pena destacar que as saídas desse acelerômetro possuem diferentes respostas de frequência, enquanto as saídas dos eixos X e Y possuem uma frequência de corte de 350 Hz a do eixo Z tem sua frequência de corte em 150 Hz.

Ele foi adquirido através do distribuidor Pololu que o disponibiliza pré-soldado em uma placa junto com um regulador de tensão e filtros nas saídas como recomendado pelo fabricante o que facilitou a realização dos experimentos. Os filtros nas saídas do acelerômetro possuem frequência de corte de aproximadamente 1,6 kHz e tem como função minimizar o ruído gerado pelo clock interno do acelerômetro.

A Figura 2.4 mostra o acelerômetro com os circuitos adicionais.



Figura 2.4: Circuito impresso com o acelerômetro MMA7260QT

O esquema eletrônico da placa com o acelerômetro é mostrado na Figura 2.5 onde U1 é o acelerômetro e U2 o regulador de tensão.

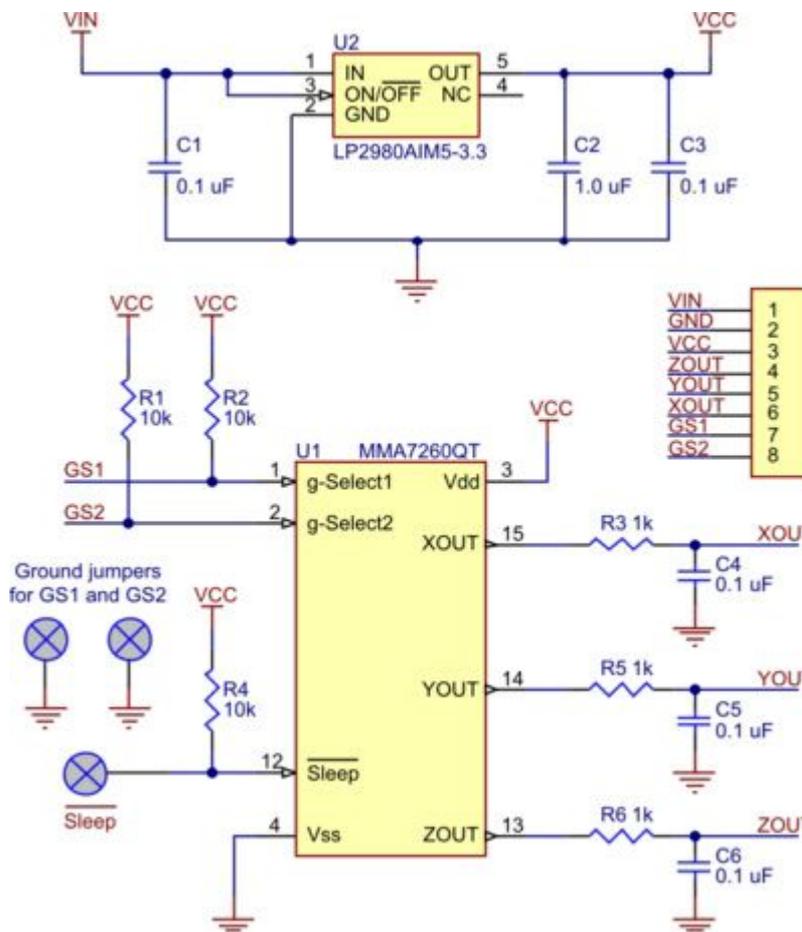


Figura 2.5: Diagrama eletrônico do circuito auxiliar com o acelerômetro extraído de <http://www.pololu.com/picture/view/0J672>

V_{in} é a entrada do regulador de tensão que permitir uma faixa de alimentação entre 3,3V a 16V. Nos experimentos o valor usado foi $V_{in}=6V$. V_{cc} é a entrada de alimentação do acelerômetro que segundo o fabricante deve ser entre 2,2V e 3,6V. V_{ss} é o terra do acelerômetro e GND o do regulador. GS1 e GS2 são as chaves para seleção do alcance do acelerômetro enquanto X_{OUT} , Y_{OUT} e Z_{OUT} são as saídas referente aos eixos x, y e z do acelerômetro respectivamente.

Tabela 2.3.1: Principais características do acelerômetro MMA7260QT

Característica	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
Tensão de alimentação	V_{CC}	2,2	3,3	3,6	V
Corrente de alimentação	I_F	-	500	800	μA
Desvio de zero	V_0	1,485	1,650	11,815	V
Sensibilidade					
1,5g	S	740	800	860	mV/g
2g	S	555	600	645	mV/g
4g	S	277,5	300	322,5	mV/g
6g	S	185	200	215	mV/g
Ruido RMS	r_{RMS}	-	4,7	-	mV_{RMS}
Resposta de frequência					
X_{OUT}	f_c	-	350	-	Hz
Y_{OUT}	f_c	-	350	-	Hz
Z_{OUT}	f_c	-	150	-	Hz

Mais informações sobre o acelerômetro MA7260QT podem ser encontradas em http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7260QT.pdf

3 APARATO EXPERIMENTAL

Para realização dos experimentos foram utilizados os conjuntos SRV-02 e IP-01 fabricados pela *Quanser Consulting*. Os servomecanismos são descritos em Apkarian, J.(1995).

3.1 Servomecanismo SRV-02

O conjunto SRV-02 (Figura 3.1) é um servomecanismo de posicionamento angular composto por um motor de corrente contínua fixado em uma moldura de alumínio sólido. O motor é equipado com uma caixa de redução interna que aciona as engrenagens externas. O modelo SRV-02 vem equipado com um potenciômetro para medir a posição angular da saída. O potenciômetro possui uma zona morta de 10° onde não é possível realizar a medição da posição.



Figura 3.1: Servomecanismo para movimentos angulares

3.2 Servomecanismo IP-01

O conjunto IP-01 (Figura 3.2) é um servomecanismo de posicionamento linear que consiste de um carrinho movido por um motor elétrico de corrente contínua que se movimenta sobre um trilho. O carrinho também está equipado com uma junta rotativa para que uma haste de pêndulo possa ser anexada. Tanto a posição do carrinho quanto o ângulo do pêndulo são sentidos através de potenciômetros. Nos experimentos realizados neste trabalho não se utilizou a haste metálica.

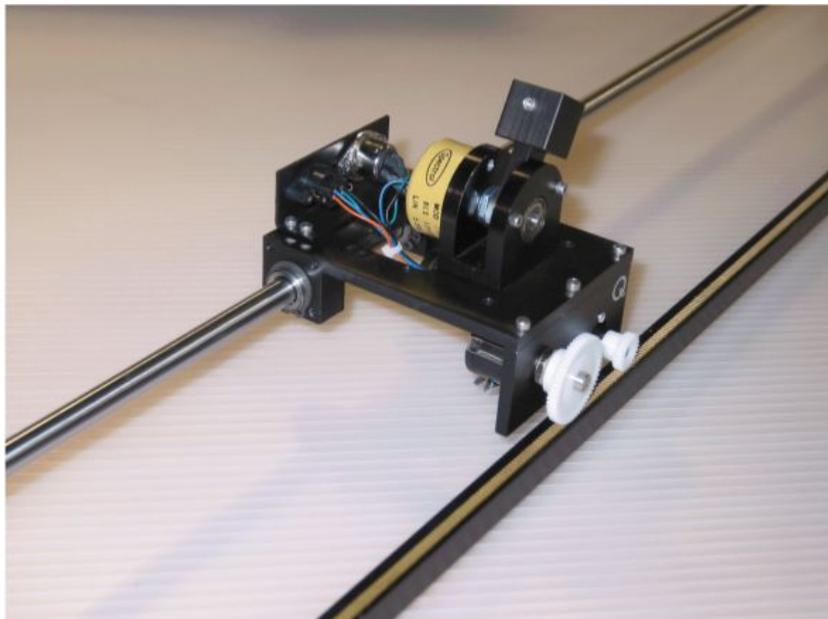


Figura 3.2: Servomecanismo para movimentos lineares

3.3 Sistema de aquisição de dados

Os dois servomecanismos, além do acelerômetro, foram conectados a uma placa de aquisição de dados para que pudesse ser feito o controle dos experimentos e as leituras dos resultados. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o MultiQ-3 da *Quanser Consulting* e foi descrito por Silva et al. (2001). Ele aceita entradas analógicas permitindo que as saídas do acelerômetro fossem diretamente ligadas à placa de aquisição de dados através de um cabo produzido anteriormente. A ligação é ilustrada pela Figura 3.3.

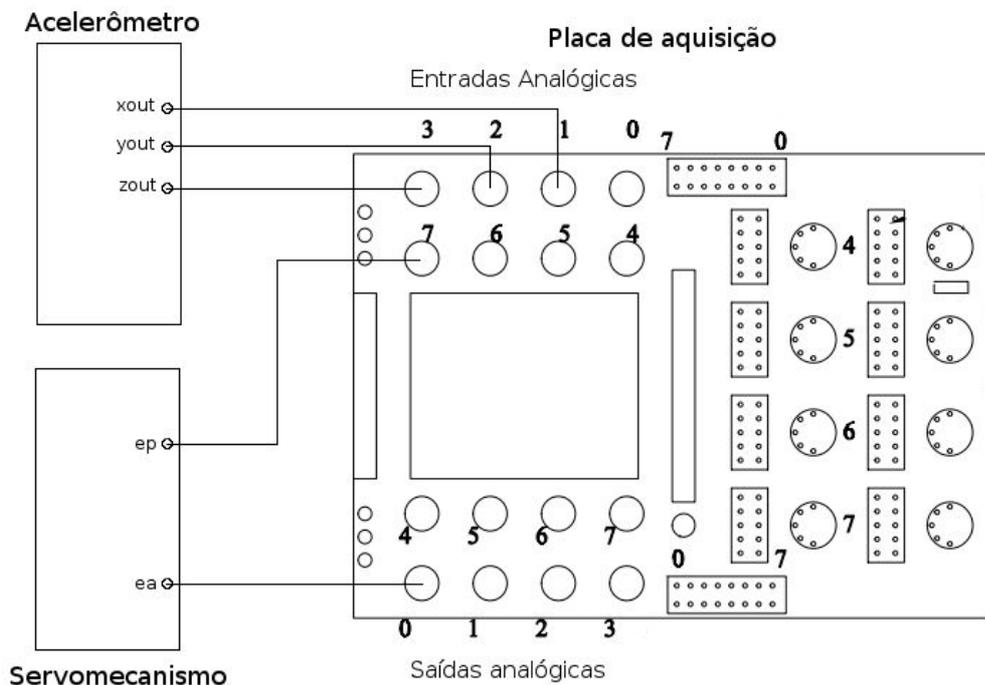


Figura 3.3: Conexões entre o acelerômetro, o servomecanismo e a placa de aquisição de dados

O cabo para conexão do acelerômetro (Figura 3.4) possui um conector *flat* de 16 pinos para encaixar na placa do acelerômetro e na outra extremidade possui conectores RCA para conexão na placa de aquisição e conectores “banana” para conectar a fonte de alimentação.



Figura 3.4: Cabo para conexão do acelerômetro

4 CARACTERIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados para fazer a caracterização do acelerômetro obtendo assim parâmetros como sensibilidade (fator de escala), desvio de zero (*zero offset*), sua curva de histerese e a verificação da ortogonalidade entre os eixos.

4.1 Calibração

Segundo Ripper et al. (2008), calibração é definida como o “conjunto de procedimentos usados para verificar todas as características que podem influenciar a exatidão das medições feitas com um transdutor, equipamento, cadeia ou sistema de medição”. O padrão IEEE1559-2009 cita o desvio de zero, a sensibilidade, o desalinhamento entre os eixos e a sensibilidade à temperatura como sendo essas características.

Em Rodrigues et al. (2010) é apresentado um método de calibração por comparação onde o acelerômetro a ser calibrado é comparado com um de referência (*back to back method*).

Por sua vez em Ripper et al. (2010) é exposto um método onde é utilizado um excitador eletrodinâmico em combinação com um interferômetro para realizar a calibração em baixas frequências.

Fixando um acelerômetro triaxial a um braço robótico com seis graus de liberdade, os autores de Renk et al. (2005) coletaram medidas enquanto o braço realizava movimento suaves para que a única aceleração detectada fosse a da gravidade. A calibração então foi feita utilizando esses dados e a aplicação de algoritmos de mínimos quadrados.

É discutido em Xiaoxiong et al. (2008) um método de calibração de alta precisão para um acelerômetro com dois eixos ortogonais onde através do uso de uma mesa de movimentos angulares de dois eixo é eliminado o efeito de erros no posicionamento angular relativo entre os sensores.

Para calibrar um acelerômetro do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) os autores de Zhou et al. (2009) fizeram uso de uma centrífuga para submeter o dispositivo a variações de aceleração entre $-55g$ até $+55g$. Nos dados coletados foram aplicados o método de mínimos quadrados e algoritmos genéticos para a se conseguir as características do acelerômetro.

Como se pode perceber pelos artigos citados os diversos métodos de calibração existentes variam de acordo com sua complexidade e a quantidade de parâmetros considerados . As principais fontes de erro no caso específico de um acelerômetro são o seu desvio de zero (*zero offset*) e sua sensibilidade (Takahashi et al., 2010), então, o principal objetivo da calibração nesse projeto será a determinação desses parâmetros.

A sensibilidade de um sistema de medida pode ser definida como a razão entre sua resposta e o estímulo a essa resposta (Rodrigues et al., 2010). Assim podemos definir a sensibilidade do acelerômetro como:

$$S = \frac{V_2 - V_1}{a_2 - a_1} \quad (4.1)$$

na qual S é a sensibilidade, V_1 e V_2 são tensões de saída e a_1 e a_2 são suas respectivas acelerações.

O desvio de zero pode ser definido como o valor de saída do sensor na ausência de entrada, causado por imperfeições na fabricação (Lawrence, 1998) .

Assumindo que a relação entre o sinal de saída do acelerômetro e o valor da aceleração nele aplicado é linear (Tuck, 2007a), o sinal de saída pode ser descrito como:

$$V_s = S \times g + V_0 \quad (4.2)$$

na qual V_s é o sinal de saída, g é o valor da aceleração local e V_0 é o desvio de zero.

Com esse modelo de primeira ordem podemos obter esses dois principais parâmetros do acelerômetro.

4.1.1 Experimento Para Calibração

Para se obter a sensibilidade dos eixos do acelerômetro a ideia foi obter os valores máximos e mínimos do sinal de cada saída do acelerômetro quando este estiver alinhado com o vetor gravitacional.

O controle do experimento foi feito através dos programas MATLAB, Simulink e Wincon¹. O diagrama da Figura 4.1 foi montado no Simulink para que pudesse controlar todos os testes com o servomecanismo rotativo.

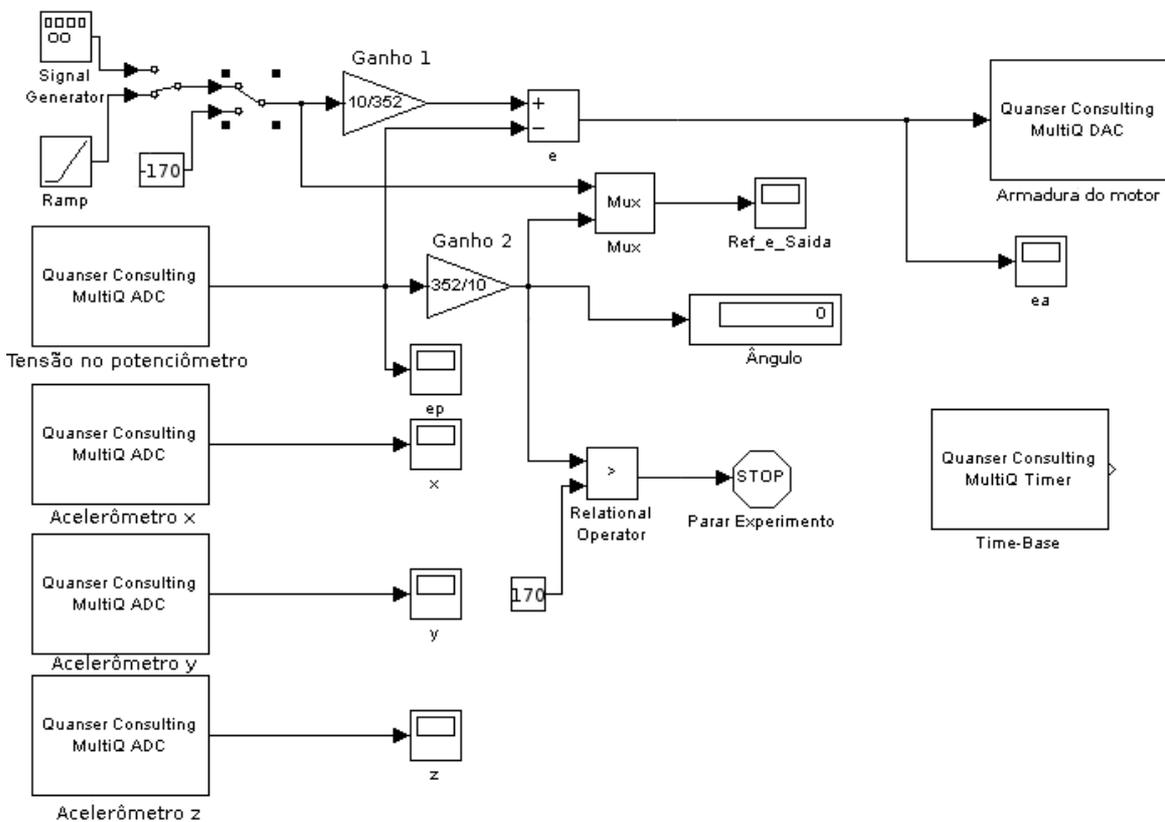


Figura 4.1: Diagrama em blocos do experimento rotativo

No diagrama, o *ganho 1* converte o sinal de entrada (posição angular desejada, em graus) em tensão para que possa ser feita uma comparação com a tensão sobre o potenciômetro. Essa diferença é então aplicada à armadura do motor para que a posição desejada seja igual à posição medida pelo potenciômetro. O *ganho 2* por sua vez converte a tensão sobre o potenciômetro em graus para

¹ Descrição mais detalhada do funcionamento desse sistema em Silva (2010).

facilitar a visualização da posição angular atual. Há ainda no diagrama um comparador para parar o experimento caso a posição se aproxime da zona onde o potenciômetro não consegue medir evitando que o experimento saia do controle.

Após montado o acelerômetro no equipamento (Figura 4.2), este foi controlado para que realizasse um movimento de rotação lento fazendo com que o acelerômetro experimentasse praticamente apenas a aceleração da gravidade, procedimento esse análogo ao descrito por Renk et al. (2005).

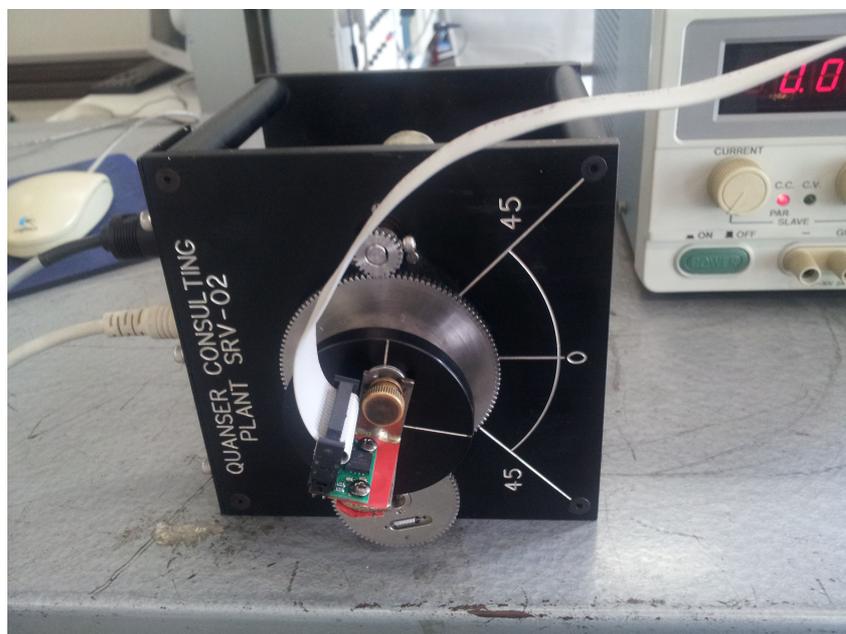


Figura 4.2: Acelerômetro montado no servomecanismo da Quanser SRV-02

Utilizado o equipamento SRV-02 da *Quanser* e o sistema de aquisição de dados para automatizar o processo, o acelerômetro foi rotacionado lentamente em torno de cada eixo e assim foram obtidos os valores do sinal de saída máximo ($V_{\text{máx}}$) e mínimo ($V_{\text{mín}}$) ou seja quando o eixo medido se alinhava com o vetor gravitacional. Esse procedimento foi repetido para os três eixos do acelerômetro e para cada seleção de sensibilidade que o acelerômetro possui.

Como nesse caso $-g_1 = g_2 = g$, a equação (4.1) pode ser simplificada e a sensibilidade então pode ser calculada usando a seguinte equação:

$$S = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2} (V/g) \quad (4.3)$$

Depois de aquisitados os dados, com a ajuda do o Matlab os valores máximos e mínimos foram identificados e aplicados na equação (4.3) para se encontrar a sensibilidade. Sabendo a sensibilidade, o desvio de zero pôde ser calculado utilizando a equação (4.2). Os resultados encontrados são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 4.1.1: Calibração sensibilidade 800 mV/g

Eixo	V_{máx}(V)	V_{min}(V)	S(mV/g)	V₀(V)
x	2,355	0,734	810	1,544
y	2,476	0,844	815	1,660
z	2,525	0,850	837	1,687

Tabela 4.1.2: Calibração sensibilidade 600 mV/g

Eixo	V_{máx}(V)	V_{min}(V)	S(mV/g)	V₀(V)
x	2,172	0,948	612	1,560
y	2,261	1,030	615	1,646
z	2,306	1,034	635	1,670

Tabela 4.1.3: Calibração sensibilidade 300 mV/g

Eixo	V_{máx}(V)	V_{min}(V)	S(mV/g)	V₀(V)
x	1,887	1,270	308	1,579
y	1,936	1,319	308	1,628
z	1,946	1,305	320	1,625

Tabela 4.1.4: Calibração sensibilidade 200 mV/g

Eixo	V_{máx}(V)	V_{mín}(V)	S(mV/g)	V₀(V)
x	1,794	1,382	205	1,588
y	1,829	1,415	207	1,622
z	1,843	1,433	205	1,638

A Tabela 4.1.5 resume os parâmetros medidos dos três eixos do acelerômetro mostrando que os valores obtido são bem próximos aos indicados pelo fabricante (Freescale, 2008).

Tabela 4.1.5: Resumo dos parâmetros medidos

Alcance (g)	S (mV/g)			V₀(V)		
	x	y	z	x	y	z
1,5	810	815	837	1,544	1,660	1,670
2	612	615	635	1,560	1,646	1,670
4	308	308	320	1,579	1,628	1,625
6	205	207	205	1,588	1,622	1,638

4.2 Histerese

Devido às características construtivas do acelerômetro e de suas partes móveis pode ocorrer um fenômeno parecido com a histerese que é observada em materiais ferromagnéticos.

Para tentar se observar o fenômeno da histerese no sinal de saída do acelerômetro foi utilizado o procedimento descrito em Ang et al. (2007) onde foi preciso estimulá-lo de -1g até +1g e depois de volta para -1g. Para isso o acelerômetro foi montado no mesmo sistema rotativo utilizado na sua calibração e

foi girado de +90° até -90° e depois de -90° até +90° onde o plano horizontal, perpendicular ao plano gravitacional é a referência de 0°.

Com as medidas obtidas foi possível construir um gráfico (Figura 4.3) entre o valor do ângulo medido pelo potenciômetro e o ângulo calculado usando a medida do acelerômetro. Segundo Clifford e Gomez (2005) pode-se calcular o ângulo através da medida do acelerômetro utilizando a seguinte equação:

$$\theta = \arcsen\left(\frac{V_s - V_0}{S}\right) \quad (4.4)$$



Figura 4.3: Gráfico ângulo medido pelo acelerômetro x ângulo medido pelo potenciômetro

Mesmo ampliando a área do gráfico (Figura 4.4) na faixa onde o fenômeno da histerese seria mais visível (em torno do zero) a histerese não pôde ser observada com os instrumentos disponíveis.

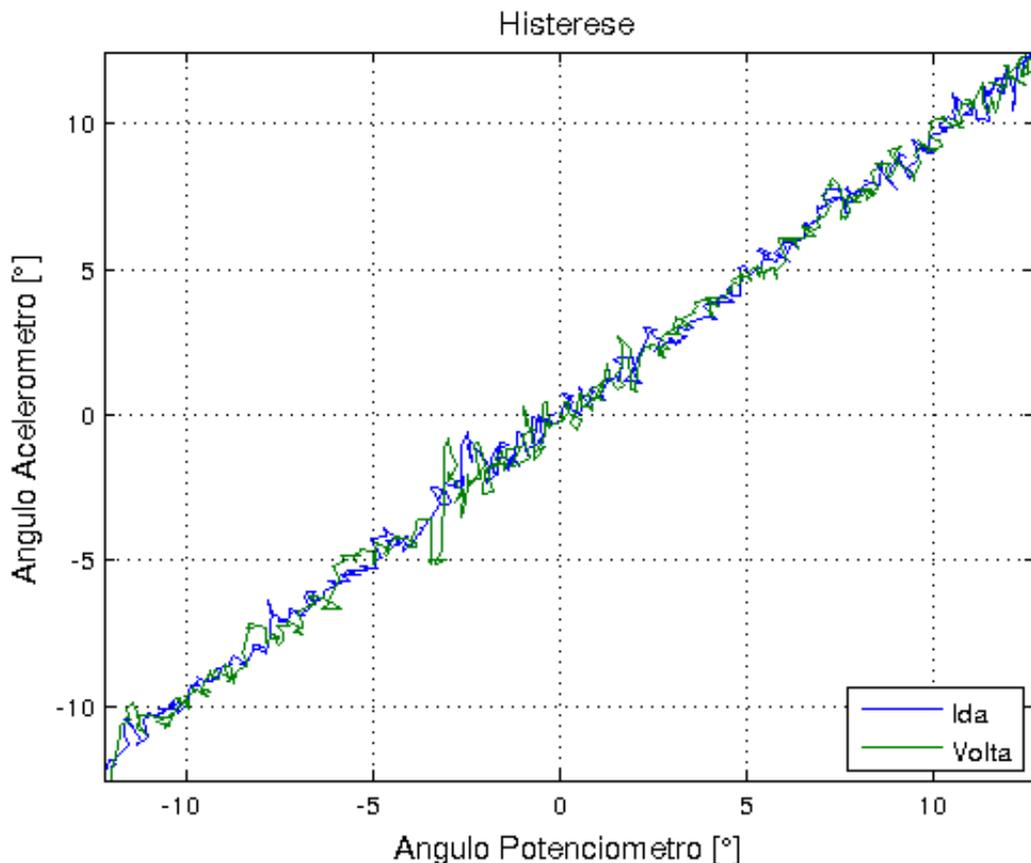


Figura 4.4: Ampliação do gráfico para tentar visualizar a histerese em torno da origem

4.3 Não-linearidade em medição de ângulos

Para a medição de ângulos a relação entre entrada e saída do acelerômetro não é completamente linear. Nesse caso, a sensibilidade do acelerômetro diminui à medida que ele se alinha com a gravidade (Tuck, 2007b) então é preciso conhecê-la para poder buscar soluções.

Essa não linearidade pode ser observada na Figura 4.3. Tendo em vista que a sensibilidade é proporcional à inclinação da curva (Tuck, 2007a) percebemos que ela diminui próximo de -90° e $+90^\circ$. Com acelerômetros triaxiais (Tuck, 2007b)

propõe que se utilize informações de mais de um eixo para que essa não linearidade não atrapalhe a medida de ângulos.

4.4 Ortogonalidade entre os eixos

Teoricamente um acelerômetro triaxial deve possuir seus eixos perfeitamente alinhados formando uma tríade ortogonal mas isso pode não acontecer. Segundo Junior (2010) “a tolerância na ortogonalidade da tríade de um acelerômetro MEMS triaxial é da ordem de um grau”.

Sabendo que ao girar o acelerômetro verticalmente, as tensões nas saídas dos eixos que irão variar (V_x e V_y) serão da forma senoidal (Ripper, 2005) podemos modelar esses sinais como Tretter (1985):

$$V_s = V_0 + S \cos(\theta + \alpha) \quad (4.5)$$

Onde θ é o ângulo de referência medido pelo potenciômetro do servomecanismo SRV-02 a partir do plano horizontal, α é o ângulo de defasagem entre o eixo do acelerômetro e o ângulo de referência θ . Assim, a diferença entre as defasagens α de dois eixos será o ângulo β entre eles. O sinal médio V_0 é o desvio de zero enquanto S é a sensibilidade de seus respectivos eixos.

Então, a fim de determinar o desvio de ortogonalidade entre os eixos do acelerômetro, ele foi montado no servomecanismo SRV-02 (Figura 4.5) e rotacionado lentamente desde -170° até $+170^\circ$.

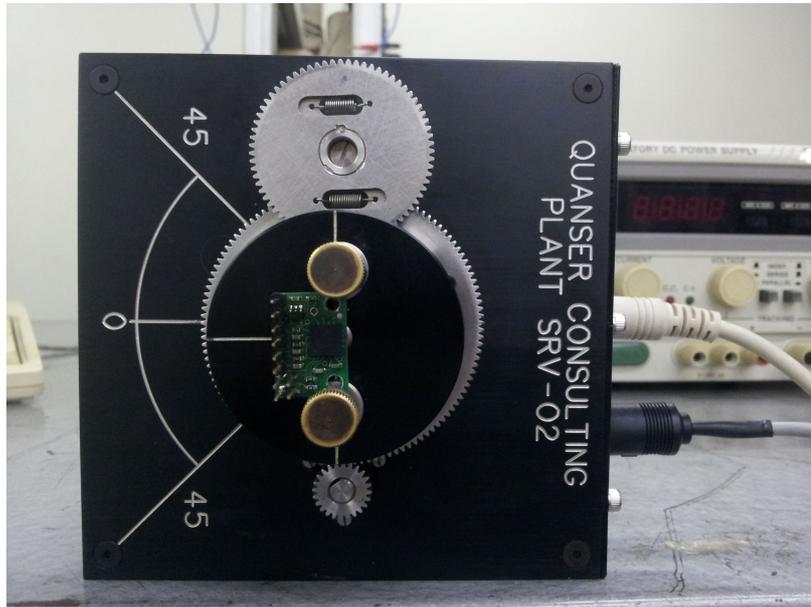


Figura 4.5: Acelerômetro fixado a o servomecanismo SRV-02

Confirmou-se que os sinais obtidos nas saídas do acelerômetro contidas no plano do vetor gravitacional seguem formas de sinais senoidais (Figura 4.6).

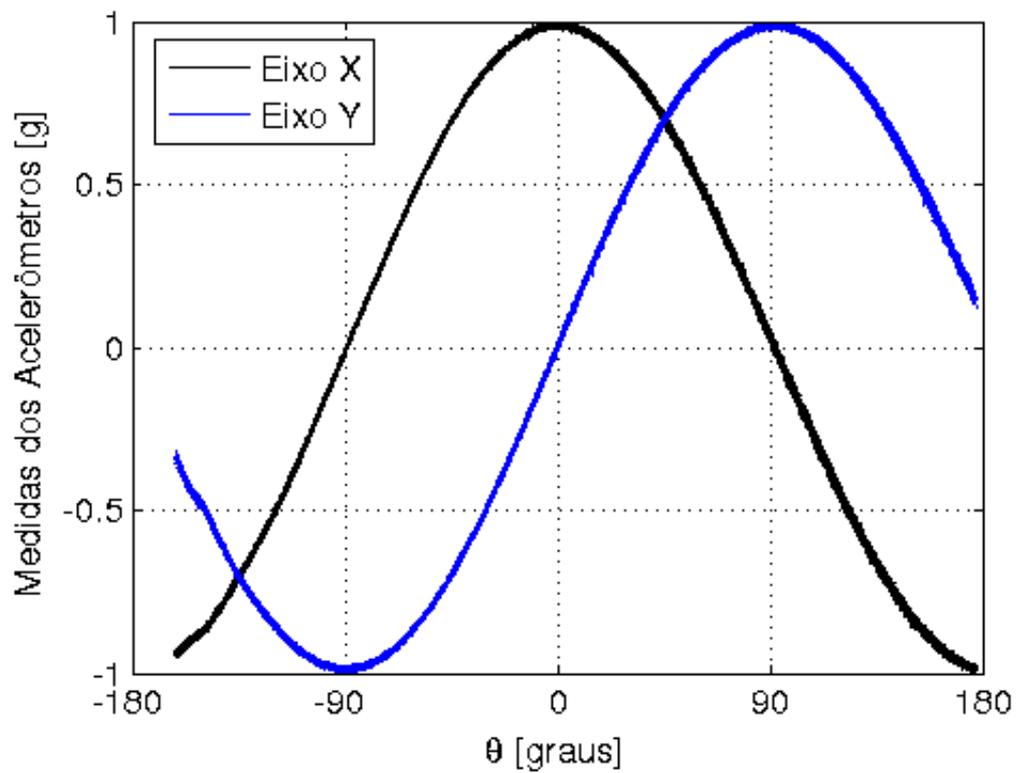


Figura 4.6: Saídas do acelerômetro para movimento giratório

Utilizando as identidades trigonométricas a equação (4.5) foi reescrita da seguinte forma:

$$V_s = V_0 - (S \operatorname{sen} \alpha) \operatorname{sen} \theta + (S \cos \alpha) \cos \theta. \quad (4.6)$$

Nos experimentos para a calibração do acelerômetro, foram registrados cerca de $350 \cdot 10^3$ valores de V_s para diversos valores do ângulo θ (Figura 4.6), a fim de permitir estimar a sensibilidade (S), o desvio de zero (V_0) e o ângulo de defasagem (α) entre cada par de eixos. Para isso as equações foram rearranjadas na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 1 & \operatorname{sen} \theta_1 & \cos \theta_1 \\ 1 & \operatorname{sen} \theta_2 & \cos \theta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \operatorname{sen} \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ -S \operatorname{sen} \alpha \\ S \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S_1} \\ V_{S_2} \\ \vdots \\ V_{S_n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

onde ε_n é o erro residual de cada medida.

Essa é uma equação linear do tipo:

$$A \cdot c = b + \varepsilon \quad (4.8)$$

na ε qual é o erro residual e c o vetor que queremos encontrar pois é formado pelo desvio de zero, a sensibilidade e o ângulo de defasagem do eixo em relação ao ângulo de referência como mostra a equação (4.9).

$$c = \begin{bmatrix} V_0 \\ -S \operatorname{sen} \alpha \\ S \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Resolvendo o sistema de equações pelo método dos mínimos quadrados, a fim de minimizar a norma Euclidiana do erro residual ε (Strang, 2003), foram obtidos os valores de desvio de zero, da sensibilidade e dos ângulos entre os eixos.

Como durante o experimento foram coletados diversos valores de V_s e θ obteve-se um sistema de equações lineares e para resolvê-lo foi utilizado o auxílio do programa Matlab (Apêndice D) encontrando assim o vetor c e depois V_0 , S e α .

O procedimento foi repetido reposicionando o acelerômetro para que se pudesse medir o ângulo entre os eixos x e z e depois entre os eixos y e z.

A Tabela 4.4.1 mostra os resultados obtidos e pode-se observar que o desalinhamento entre os eixos varia bastante podendo chegar a mais de 1°. Os valores de calibração (Tabela 4.4.2) ficaram próximos aos obtidos anteriormente no experimento descrito na seção 4.1.1.

Tabela 4.4.1: Ângulo entre os eixos do acelerômetro

<i>Eixos</i>	$\beta(^{\circ})$
x-y	90,1
y-z	91,7
z-x	90,9

Tabela 4.4.2: Desvio de zero e sensibilidade

<i>Eixo</i>	$V_0 (V)$	$S (mV/g)$
x	1,564	817
y	1,670	825
z	1,647	795

Comparando a Tabela 4.4.2 com a Tabela 4.4.1 temos uma diferença máxima de 2,4% entre os valores de V_0 e de 5% nos valores S . Pode-se supor que os resultados da Tabela 4.4.2 são mais confiáveis já que foram obtidos a partir de diversos pontos enquanto que na Tabela 4.4.1 foram utilizados apenas dois.

4.5 Análise do ruído no sistema

Para fazer uma análise do ruído no sistema foi realizado um experimento onde o acelerômetro ficou imóvel e os dados relativos aos três eixos foram coletados. Como a sensibilidade do acelerômetro pode variar com sua posição (Tuck, 2007a) foram feitas medidas em duas posições distintas para cada eixo do acelerômetro. Na “Posição Vertical” o eixo medido ficou alinhado com a força da gravidade enquanto que na “Posição Horizontal” ficou perpendicular a ela.

Como o acelerômetro possui uma chave seletora de sensibilidade os experimentos foram repetidos para cada uma das seleções possíveis.

De acordo com Bissell e Chapman (1992) o valor RMS de um sinal pode ser calculado como:

$$r_{rms} = \sqrt{\bar{r}^2 + \sigma_r^2} \quad (4.10)$$

Onde r_{rms} é o valor rms do sinal, \bar{r} é o valor médio do sinal e σ_r o seu desvio padrão. Por sua vez, o desvio padrão é definido como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2} \quad (4.11)$$

Tendo o acelerômetro ficado estático pode-se concluir que o ruído será o sinal coletado menos a sua média, logo o ruído possui valor médio igual a zero e a equação (4.10) fica reduzida a:

$$r_{rms} = \sigma_r \quad (4.12)$$

Foi calculado também o valor pico a pico do ruído (r_{pp}) como a diferença entre o valor máximo e mínimo.

$$r_{pp} = r_{máx} - r_{mín} \quad (4.13)$$

Os valores obtidos para as sensibilidades de 800 mV/g e 200 mV/g são mostrados nas Tabelas 1.1 e 1.2 respectivamente enquanto que os resultados análogos para as demais sensibilidades são apresentadas no Apêndice A.

Observando a Tabela 4.5.1 referente ao experimento em que o acelerômetro está configurado para a sua maior sensibilidade, é possível perceber uma variação na medição do ruído devido a posição. Isto é devido ao fato da sensibilidade variar com a posição como observado no item 4.2 e relatado por Tuck (2007a). Essa

variação fica praticamente imperceptível quando o acelerômetro é configurado para sua menor sensibilidade como pode ser visto na Tabela 4.5.2.

Tabela 4.5.1: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 800 mV/g

Eixo	Posição Vertical			Posição Horizontal		
	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)
x	6,3	41,5	755	7,7	53,7	1605
y	6,2	40,4	848	7,6	54,9	1728
z	6,0	42,7	868	7,2	59,8	1745

Tabela 4.5.2: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 200 mV/g

Eixo	Posição Vertical			Posição Horizontal		
	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)
x	2,4	18,3	1391	2,6	22,0	1589
y	2,5	17,1	1418	2,6	20,8	1617
z	2,6	17,9	1429	2,6	21,7	1639

Analisando os valores das Tabelas pode-se perceber que o valor RMS do ruído não chega a 0,9% do valor médio do sinal.

Deve-se observar que o ruído medido pode ter sido gerado não apenas pelo acelerômetro testado mas também pelo sistema de aquisição de dados.

5 APLICAÇÃO DO ACELERÔMETRO EM UM SISTEMA DE CONTROLE

Feita a calibração do acelerômetro o próximo passo seria saber como ele se comportaria em um sistema de controle e se seria válida a sua utilização. Para isso foram projetados três sistemas de controle: dois com o acelerômetro e outro sem.

Neste capítulo são apresentados esses sistemas e os resultados experimentais obtidos.

5.1 Modelagem Dinâmica do Sistema

Segundo Ogata (1998), “a maioria dos sistemas dinâmicos ... podem ser caracterizados por equações diferenciais”. Então, para modelar um sistema é necessário encontrar suas equações diferenciais utilizando as leis físicas que regem o sistema.

O sistema a ser controlado é o servomecanismo IP-01 da *Quanser* que consiste em um carro com motor elétrico de corrente contínua com ímãs permanentes que se desloca sobre um trilho (Apkarian, 1995).

A Figura 5.1 representa o esquema mecânico do sistema. Podemos aplicar a segunda lei de Newton e obter a equação (5.1).

$$F = m \cdot \ddot{p} \quad (5.1)$$

Onde F é a força que movimenta o carro, m é a massa do carro, p sua posição e \ddot{p} a derivada segunda da posição, ou seja, a aceleração.

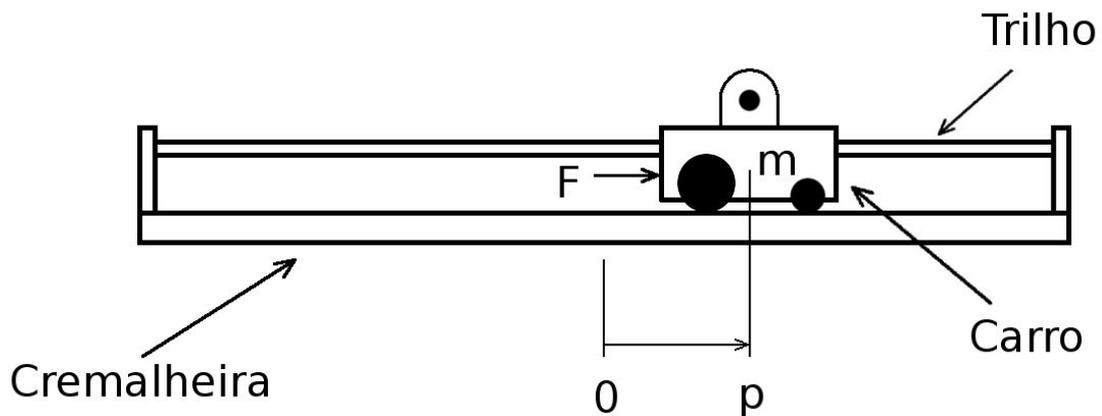


Figura 5.1: Esquema mecânico do sistema, adaptado de Silva e Antunes (2010)

A força F gerada pelo motor DC pode ser expressa como:

$$F = \frac{k_g \cdot T}{r} \quad (5.2)$$

Onde k_g é a relação entre as engrenagens do motor, T é o torque desenvolvido e r é o raio da engrenagem do motor.

Para um motor elétrico o torque é dado pela equação (5.3) onde η é a eficiência do motor, k_t é a constante do torque e i_a é a corrente de armadura no motor.

$$T = \eta \cdot k_t \cdot i_a \quad (5.3)$$

Substituindo a expressão do torque na equação (5.2) e igualando a equação (5.1) temos:

$$m \cdot \ddot{p} = \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_t \cdot i_a}{r} \quad (5.4)$$

A aceleração então é dada pela equação (5.5).

$$\ddot{p} = \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_y \cdot i_a}{r \cdot m} \quad (5.5)$$

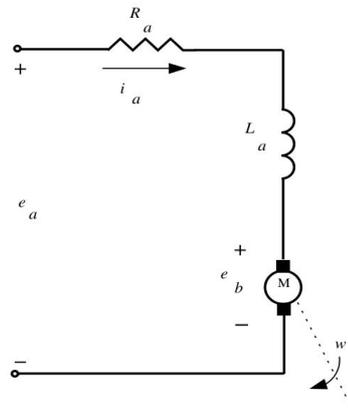


Figura 5.2: Modelo simplificado do motor

Analisando o modelo simplificado do motor ilustrado na Figura 5.2 e aplicando a lei de Kirchoff das tensões, obtemos a seguinte equação:

$$e_a - R_a \cdot i_a - L_a \frac{di_a}{dt} - e_b = 0 \quad (5.6)$$

Onde e_a é a tensão aplicada a armadura, R_a é a resistência de armadura, L_a é a indutância de armadura e e_b é a força contra-eletromotriz.

Como L_a é muito menor que R_a podemos desprezar a indutância do motor e obter a corrente de armadura i_a como:

$$i_a = \frac{e_a - e_b}{R_a} \quad (5.7)$$

Sabendo que a tensão contra-eletromotriz é proporcional à velocidade angular ω , a corrente de armadura será dada por:

$$i_a = \frac{e_a - k_m \cdot \omega}{R_a} \quad (5.8)$$

A velocidade angular é dada por :

$$\omega = k_g \cdot \frac{\dot{p}}{r} \quad (5.9)$$

A força contra-eletromotriz é proporcional à velocidade angular assim pode ser expressa por:

$$e_b = k_m \cdot \omega \quad (5.10)$$

Onde k_m é a constante da força contra-eletromotriz.

Substituindo a equação (5.9) na equação (5.10) temos:

$$e_b = \frac{k_m \cdot k_g \cdot \dot{p}}{r} \quad (5.11)$$

A corrente de armadura então poderá ser escrita como:

$$i_a = \frac{e_a}{R_a} - \frac{k_m \cdot k_g \cdot \dot{p}}{R_a \cdot r} \quad (5.12)$$

Substituindo a equação (5.12) na equação (5.5) temos:

$$\ddot{p} = \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_t}{R_a \cdot r \cdot m} \cdot e_a - \frac{k_g^2 \cdot k_t \cdot k_m \cdot \eta}{R_a \cdot r^2 \cdot m} \cdot \dot{p} \quad (5.13)$$

Se levarmos em consideração o momento de inércia do rotor a massa total M será a massa m do carrinho mais uma massa m_m devido a esse momento de inércia.

$$M = m + m_m \quad (5.14)$$

Sabemos que o momento de inércia J é calculado através da seguinte equação:

$$J = m_m \cdot r^2 \quad (5.15)$$

A massa total M então será:

$$M = m + \frac{J}{r^2} \quad (5.16)$$

Substituindo m por M na equação (5.13) temos a equação dinâmica do sistema:

$$\ddot{p} = \frac{-k_g^2 \cdot k_t \cdot k_m \cdot \eta}{R_a \cdot r^2 \cdot M} \dot{p} + \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_t}{R_a \cdot r \cdot M} e_a \quad (5.17)$$

Assim é possível usar a representação em espaço de estados da forma:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \quad (5.18)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (5.19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-k_g^2 \cdot k_t \cdot k_m \cdot \eta}{R_a \cdot r^2 \cdot m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_t}{R_a \cdot r \cdot m} \end{bmatrix} e_a \quad (5.20)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Substituindo os valores das constantes do sistema temos:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -14,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3,33 \end{bmatrix} u \quad (5.22)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix}, \quad (5.23)$$

onde u é a tensão aplicada à armadura do motor e y a saída do sistema.

5.2 Observador de estados:

Nesse trabalho comparou-se três sistemas de controle com realimentação de estados, um sem acelerômetro e outros dois com.

Para se realizar um controle por realimentação de estados é preciso conhecer estes estados. Entretanto muitas vezes isso pode não ser possível ou viável em um sistema real (Ogata, 1998). Para solucionar esse problema é possível estimar esses estados através de um observador de estados.

O observador de estados é um sistema que modela o sistema real permitindo assim estimar os estados do sistema dinâmico que não podem ser obtido diretamente.

Com a introdução do acelerômetro no sistema é possível usar a própria aceleração como uma das entradas do observador como mostra Figura 5.3b onde r é o sinal de referência, u o sinal de controle, y de saída e \hat{x} o vetor de estado estimado. Para garantir um erro nulo em regime permanente introduziu-se também um ganho K_c .

Com uso do acelerômetro as equações de estados ficam independente das características do motor e do carro (Zheng e Fu, 2010).

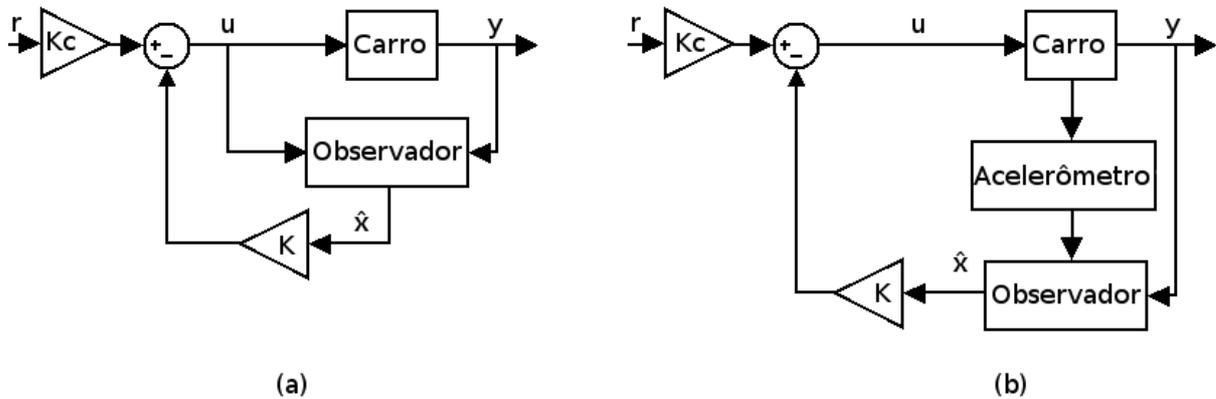


Figura 5.3: Diagramas de blocos do controle com observador: (a) Sem acelerômetro, (b) com acelerômetro.

5.3 Controle com observador convencional

Foi adotada a lei de controle:

$$u = r K_c - K \hat{x} \quad , \quad (5.24)$$

na qual u é o sinal de controle, r a referência, K_c o ganho da referência, K o vetor de ganho do controlador e x o vetor de estados. Onde:

$$K = [k_1 \quad k_2] \quad . \quad (5.25)$$

Assim a lei de controle fica sendo:

$$e_a = -k_1 \dot{p} - k_2 p \quad (5.26)$$

Para simplificação, define-se:

$$\alpha = \frac{k_g^2 \cdot k_t \cdot k_m \cdot \eta}{R_a \cdot r^2 \cdot M} \quad (5.27)$$

$$\beta = \frac{k_g \cdot \eta \cdot k_t}{R_a \cdot r \cdot M} \quad (5.28)$$

A equação (5.17) pode ser reescrita como:

$$\ddot{p} + \alpha \dot{p} - \beta e_a \quad (5.29)$$

Substituindo a lei de controle (5.26) na equação dinâmica do sistema (5.29) temos:

$$\ddot{p} + (\alpha - \beta k_1) \dot{p} - \beta k_2 p = 0 \quad (5.30)$$

Podemos achar os valores de k_1 e k_2 em função dos autovalores do sistema λ_1 e λ_2 resolvendo a seguinte equação característica :

$$\begin{aligned} \lambda^2 + (\alpha - \beta k_1) \lambda - \beta k_2 &= 0 \\ \lambda_1 &= -(\alpha - \beta k_1) + \sqrt{(\alpha - \beta k_1)^2 + 4\beta k_2} \\ \lambda_2 &= -(\alpha - \beta k_1) - \sqrt{(\alpha - \beta k_1)^2 + 4\beta k_2} \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\lambda_1 + (\alpha - \beta k_1) = \sqrt{(\alpha - \beta k_1)^2 + 4\beta k_2}$$

$$k_1 = \frac{\lambda_1^2 + 2\lambda_1\alpha - 4\beta k_2}{2\lambda_1\beta} \quad (5.32)$$

$$\lambda_2 + (\alpha - \beta k_1) = -\sqrt{(\alpha - \beta k_1)^2 + 4\beta k_2} \quad (5.33)$$

$$k_2 = \frac{\lambda_2^2 + 2\lambda_2(\alpha - \beta k_1)}{4\beta} \quad (5.34)$$

Substituindo a equação (5.34) na equação (5.32), obtém-se:

$$k_1 = \frac{\lambda_1(\lambda_1 + 2\alpha) - \lambda_2(\lambda_2 + 2\alpha)}{2\beta(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (5.35)$$

Substituindo a equação (5.35) na equação (5.33), obtém-se:

$$k_2 = \lambda_2 \lambda_1 \frac{(\lambda_2 + 2\alpha) - (\lambda_1 + 2\alpha)}{4\beta(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (5.36)$$

Os autovalores foram ajustados experimentalmente e chegou-se aos seguintes valores: $\lambda_1 = -20$ rad/s e $\lambda_2 = -15$ rad/s. Com esses autovalores pode-se obter o vetor ganho K.

$$K = [90,1 \quad 6,04] \quad (5.37)$$

Para garantir um ganho CC unitário entre a entrada de referência e a posição medida, foi calculado o ganho K_c como:

$$K_c = [C(B.K - A)^{-1} . B]^{-1} \quad (5.38)$$

$$K_c = 90,1 \quad (5.39)$$

Com o observador, o estado $x(t)$ será aproximado pelo estado $\hat{x}(t)$. O modelo matemático do observador então pode ser definido como:

$$\dot{\hat{x}}(t) = \hat{A} . \hat{x}(t) + \hat{B} . u(t) + L . (y(t) - \hat{C} . \hat{x}(t)) \quad (5.40)$$

$$\hat{y}(t) = \hat{C} . \hat{x}(t) \quad (5.41)$$

Onde L é a matriz ganho do observador que multiplica a diferença entre a saída y da planta e a saída \hat{y} do observador, ou seja, o erro de observação (e_{obs}).

A Figura 5.4 mostra o diagrama de blocos do sistema e do observador em malha fechada.

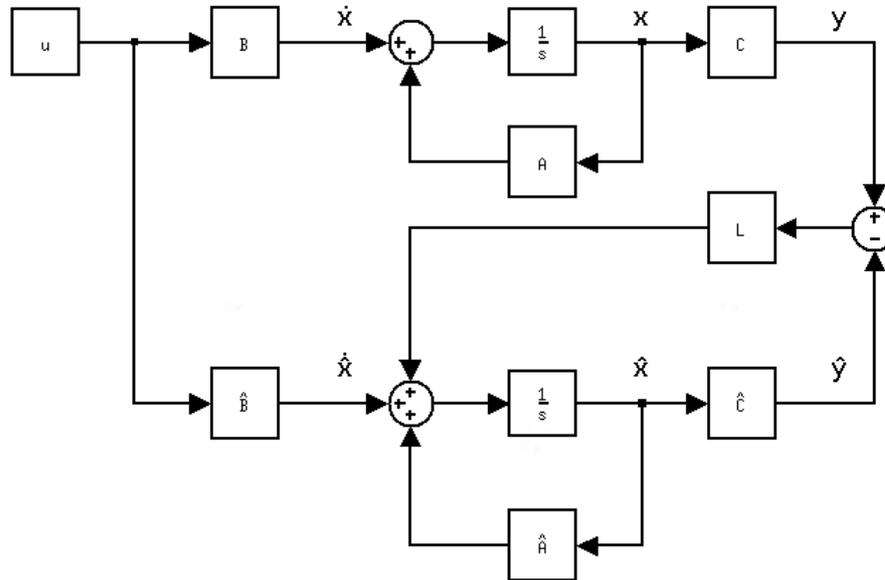


Figura 5.4: Diagrama de blocos do sistema e do observador de estado

Seja os erros de observação e de estimação definidos por:

$$e_{est} = x(t) - \hat{x}(t) \quad (5.42)$$

$$e_{obs} = y(t) - \hat{y}(t) \quad (5.43)$$

Subtraindo a equação (5.40) da equação (5.38) obtemos a seguinte equação dinâmica para o erro de estimação:

$$\dot{e}_{est} = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (5.44)$$

$$\dot{e}_{est} = A.x(t) + B.u(t) - \hat{A}.\hat{x}(t) - \hat{B}.u(t) - L.(y(t) - \hat{C}.\hat{x}(t)) \quad (5.45)$$

Se $\hat{A} = A, \hat{B} = B, \hat{C} = C$, então:

$$\dot{e}_{est} = (A - LC).e_{est} \quad (5.46)$$

Segundo Ogata (1998), o projeto de um observador se resume a determinar a matriz de ganho do observador L de forma com que o erro de estimação tenda para zero num tempo satisfatório. Para que isso aconteça os autovalores de $(A-L.C)$ têm que possuir parte real negativa.

Para se determinar a matriz L temos que fazer o casamento de um polinômio característico p_c , que possui os autovalores desejados, com o determinante da matriz $(s.I - A + L.C)$.

No sistema sem o acelerômetro as matrizes do observador serão iguais às do sistema já que as entradas do observador serão o sinal de controle u e a saída y . Então, definindo o vetor de estado x como a posição e a velocidade temos:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \end{bmatrix}, \quad (5.47)$$

a equação de estado do observador como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -14,9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3,33 \end{bmatrix} e_a + L \left(y - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} \right) \quad (5.48)$$

e a equação de saída igual a:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}. \quad (5.49)$$

A matriz L foi então escolhida para que os autovalores da matriz $(A-LC)$ da equação do erro de estimação fossem os desejados conforme a seção 5.6.

5.4 Sistema controlado com observador e acelerômetro

A introdução do acelerômetro no sistema possibilita usar a aceleração medida como uma das entradas do observador, como mostra a Figura 5.3b. Assim as

equações de estado independem das características do mecanismo de posicionamento (Zheng e Fu, 2010) .

As equações do observador com o acelerômetro ficam sendo as seguintes:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{p}} \\ \dot{\ddot{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \dot{\hat{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} a_m + L(y - \hat{y}) \quad , \quad (5.50)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \dot{\hat{p}} \end{bmatrix} \quad , \quad (5.51)$$

nas quais a_m é a aceleração medida pelo acelerômetro.

5.5 Sistema controlado com observador e acelerômetro com desvio de zero estimado

Um problema observado durante o controle com o acelerômetro foi a alta dependência do sistema de controle com os parâmetros de calibração especialmente o desvio de zero (a_0). Foi projetado então um outro observador que estima também o desvio de zero do acelerômetro, a fim de reduzir os erros de estimação:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{p}} \\ \dot{\ddot{p}} \\ \dot{\hat{a}}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \dot{\hat{p}} \\ \hat{a}_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} a_m + L(y - \hat{y}) \quad , \quad (5.52)$$

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \dot{\hat{p}} \\ \hat{a}_0 \end{bmatrix} \quad (5.53)$$

O desvio de zero pode ser causado, por exemplo, pelo desalinhamento do trilho, que deveria ser ortogonal à vertical para evitar o efeito da gravidade na medida da aceleração.

Nota-se que ambos observadores (5.50)-(5.51) e (5.52)-(5.53) independem dos parâmetros do mecanismo (equação (5.22)), o que lhes oferece mais robustez do que o observador sem o acelerômetro.

5.6 Experimentos e resultados

Com o sistema e os observadores modelados foi possível utilizar o *Matlab* para calcular o ganho L de cada observador para diferentes autovalores e depois realizar o controle do sistema. Foram escolhidos autovalores para o observador em função dos autovalores do sistema em malha fechada da seguinte forma:

- um décimo dos autovalores do sistema ($\lambda_1 = -2$ rad/s e $\lambda_2 = -1,5$ rad/s);
- iguais aos autovalores do sistema ($\lambda_1 = -20$ rad/s e $\lambda_2 = -15$ rad/s);
- dez vezes os autovalores do sistema ($\lambda_1 = -200$ rad/s e $\lambda_2 = -150$ rad/s).

Para verificar o comportamento de cada sistema foi aplicada uma onda quadrada como sinal de referência em todos os testes.

A Tabela 5.6.1 contém os autovalores utilizados em cada experimentos dos três observadores.

Tabela 5.6.1: Autovalores usados nos observadores

Sem acelerômetro		Com acelerômetro		Com acelerômetro e estimador de desvio de zero		
λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_1	λ_2	λ_3
-2 rad/s	-1,5 rad/s	-2 rad/s	-1,5 rad/s	-2 rad/s	-1,5 rad/s	-10 rad/s
-20 rad/s	-15 rad/s	-20 rad/s	-15 rad/s	-20 rad/s	-15 rad/s	-10 rad/s
-200 rad/s	-150 rad/s	-200 rad/s	-150 rad/s	-200 rad/s	-150 rad/s	-10 rad/s

Os dois sistemas de controle ilustrados na Figura 5.4 foram montado na ferramenta Simulink do Matlab como mostram as Figura 5.5 e 5.6 para implementar o controle no servomecanismo IP-01 da *Quanser*.

enquanto que os resultados conseguidos selecionando as outras sensibilidades são apresentadas no Apêndice B. Os resultados foram similares para todas as sensibilidade.

Realizando-se os experimentos pôde-se perceber que os sistemas de controle que utilizaram o acelerômetro possuem um erro de observação menor do que o sistema sem acelerômetro. Isso ocorre principalmente quando os autovalores do observador são próximos dos autovalores do sistema com pode-se observar nas figuras a seguir.

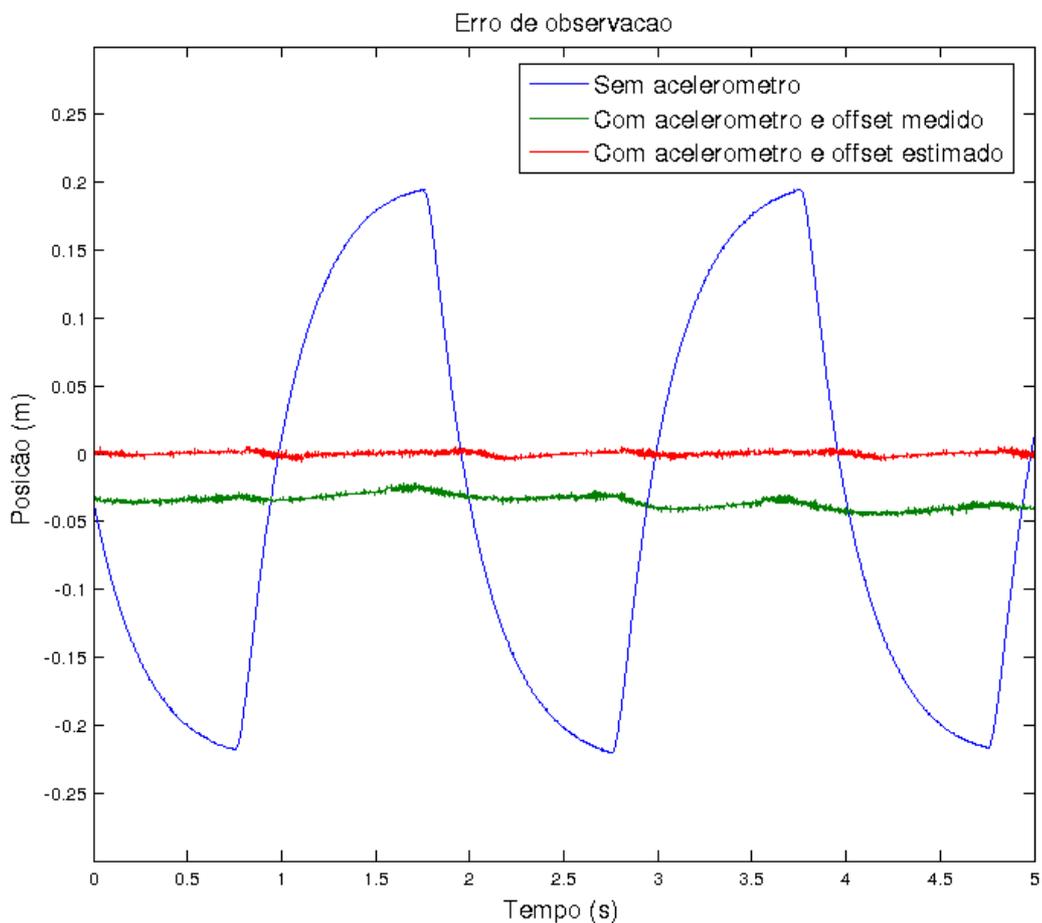


Figura 5.7: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s

Observando o gráfico da Figura 5.7 pode-se perceber que com os autovalores do observador em -2 rad/s e -1,5 rad/s, o erro de observação para o sistema sem o acelerômetro chega a mais de 20 cm. Por sua vez, os sistemas que usam o

acelerômetro para realizar o controle ficam com um erro de observação bem menor. Pode-se perceber também que o sistema que tem V_0 estimado tem um erro de observação que se aproxima mais do zero que o com V_0 medido.

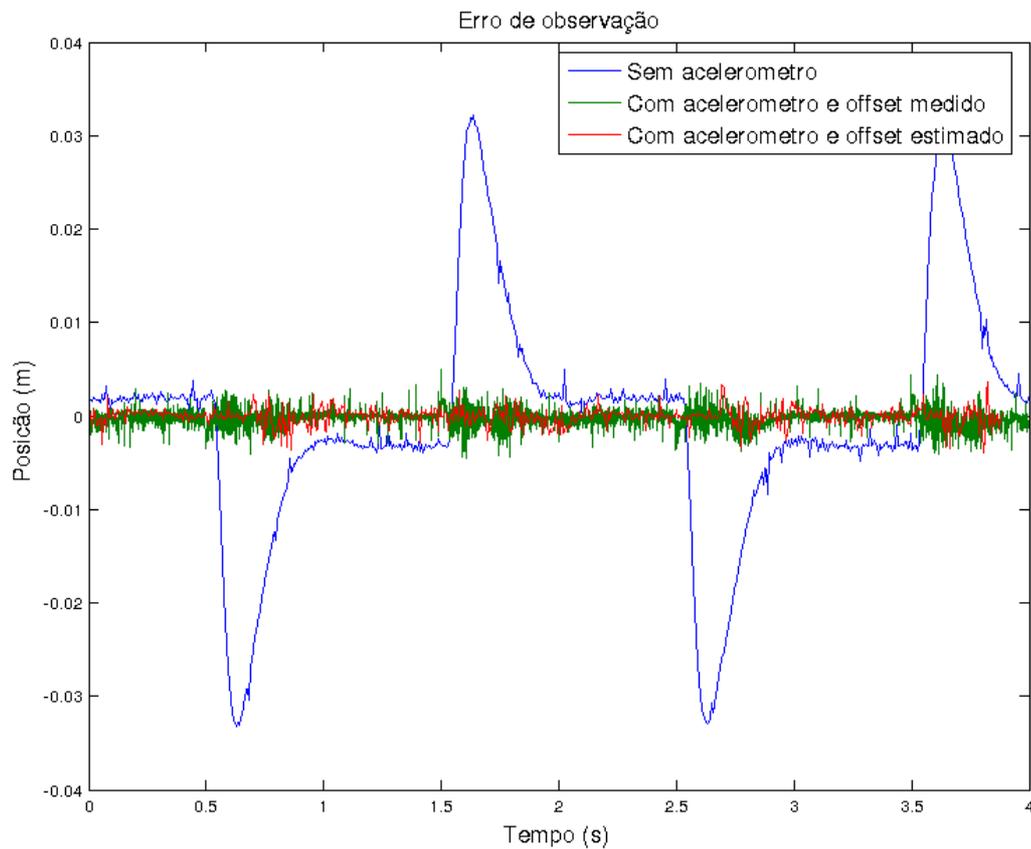


Figura 5.8: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s

Com os autovalores do observador dez vezes maior o erro de observação do sistema sem o acelerômetro cai para 3 cm, como pode ser visto na Figura 5.8. Os sistemas que tem o acelerômetro continuam tendo um erro bem menor mas dessa vez ficaram bem próximos.

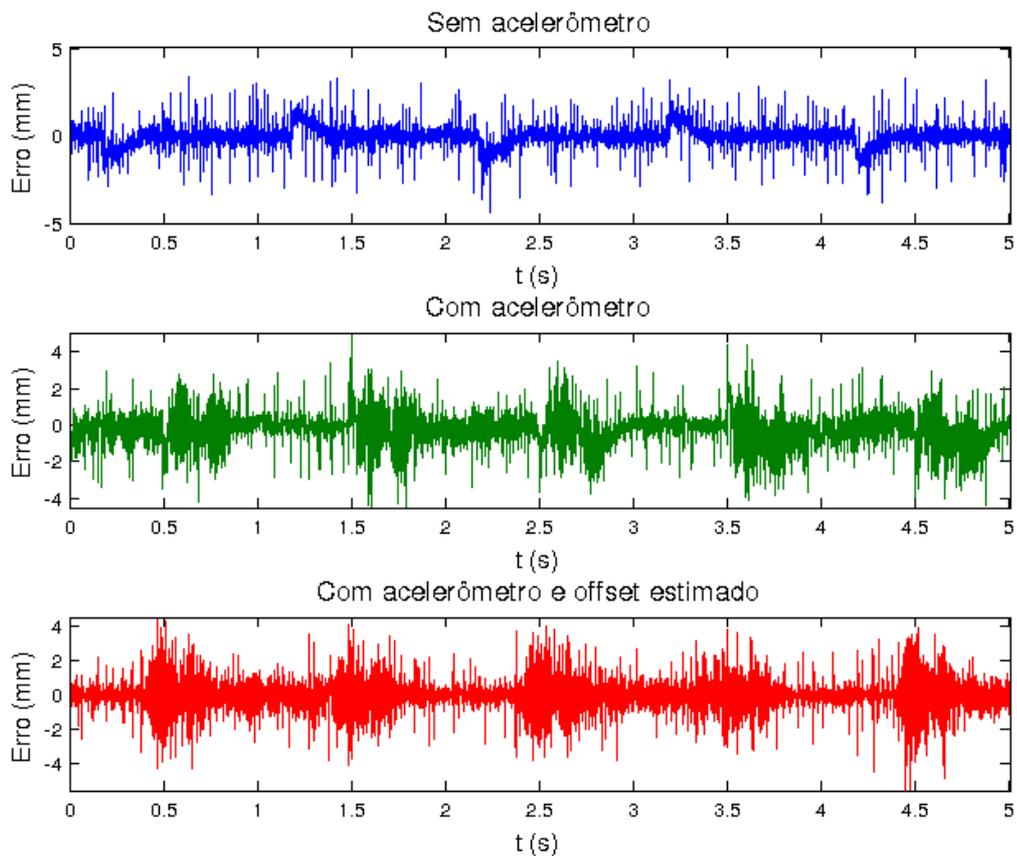


Figura 5.9: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s

Quando os autovalores do observador são ajustados para -200 rad/s e -150 rad/s o sistema sem o acelerômetro passa a ter um desempenho melhor que os outros dois se levarmos em consideração apenas os erros de observação (Figura 5.9). O sistema sem acelerômetro obteve um erro de observação menor que 2 mm enquanto os que usaram o acelerômetro obtiveram erros de observação de até 4 mm.

Observando o gráfico da posição (Figura 5.10) percebe-se que para autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s o sistema de controle sem o acelerômetro não consegue chegar a posição desejada enquanto que os que utilizam o acelerômetro se aproximam bastante dessa posição embora não se possa definir com segurança qual se aproxima mais.

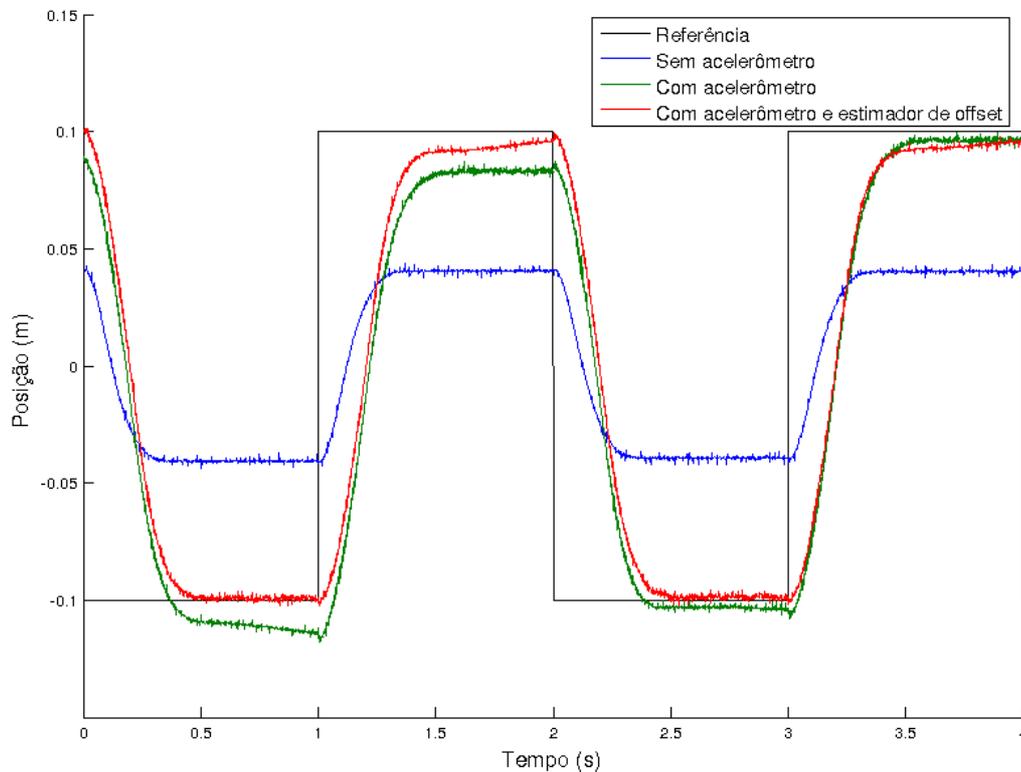


Figura 5.10:Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s

No experimento com os autovalores do observador definidos como -20 rad/s e -15 rad/s o controlado sem o acelerômetro melhora consideravelmente como pode-se ver na Figura 5.11 mas continua com uma posição final mais afastada da desejada se comparado com os que fazem uso do acelerômetro. Dessa vez foi possível perceber que o sistema com desvio de zero estimado possui um desempenho um pouco melhor do que os sistema com desvio de zero medido pois ele consegue fazer com que a posição do carrinho se aproxime mais da posição desejada. Porém, com o aumento dos autovalores o sistema sofre mais influencia do ruído fazendo com que o carrinho as vezes ficasse “tremendo” na posição de repouso. Esse fato pode ser visto durante os experimentos mas não foi percebido nas medidas.

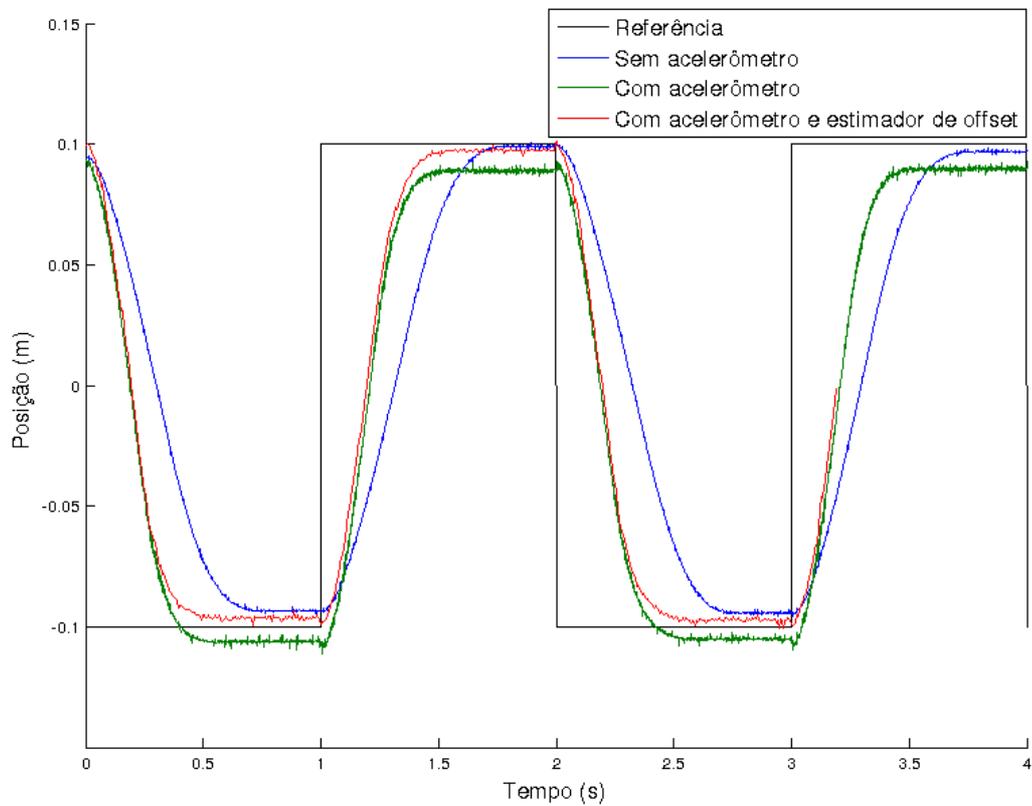


Figura 5.11: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s

Para autovalores iguais a -200 rad/s e 150 rad/s os três sistemas se comportam de maneira muito parecida não sendo possível definir qual possui o melhor desempenho como pode-se confirmar na Figura 5.12.

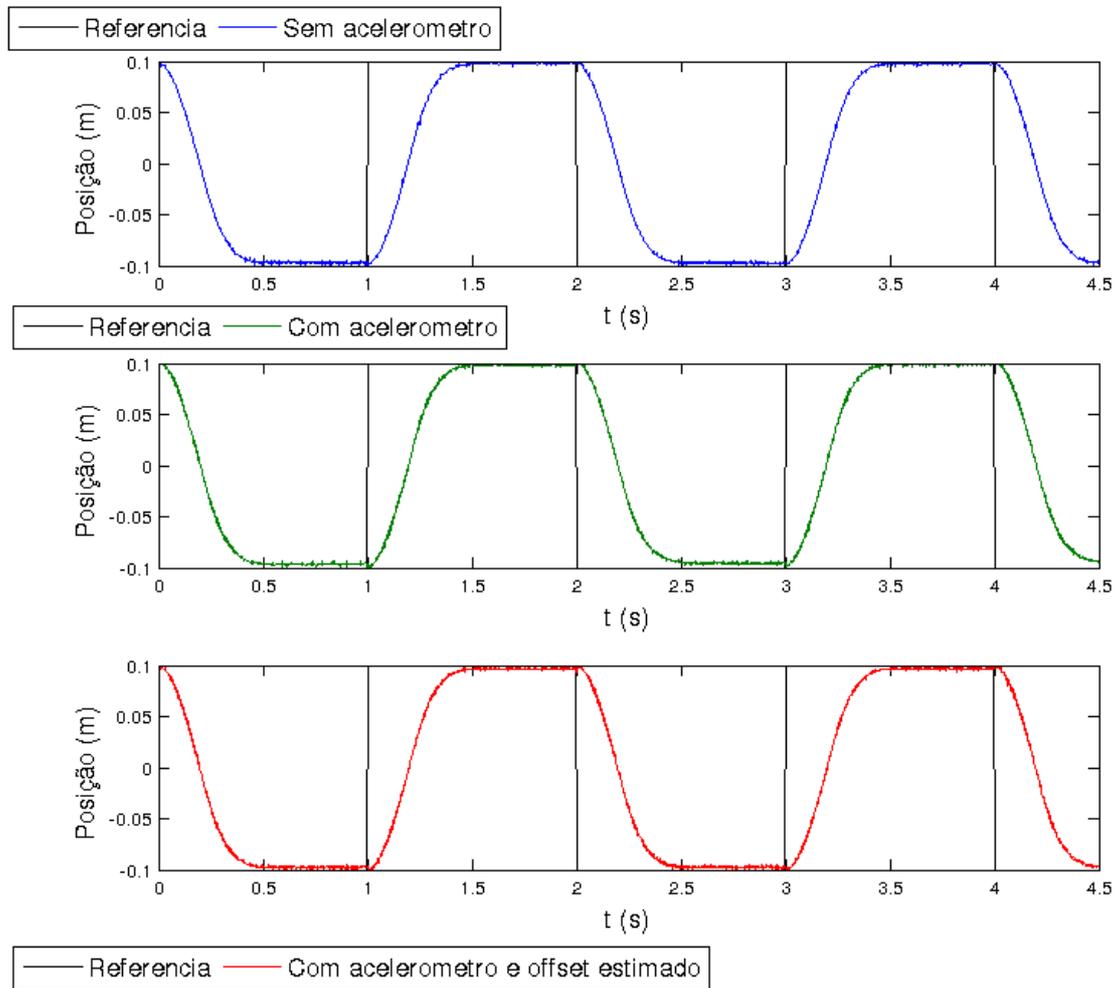


Figura 5.12 Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s

Com os autovalores dos observadores iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s e -20 rad/s e -15 rad/s, os sinais de controle parecem livres de ruído, como pode-se observar nas Figuras 5.13 e 5.14 mas o uso de autovalores iguais a -200 rad/s e 150 rad/s resultou na maior amplificação do ruído de medição, como é observado nos sinais de controle apresentados na Figura 5.15

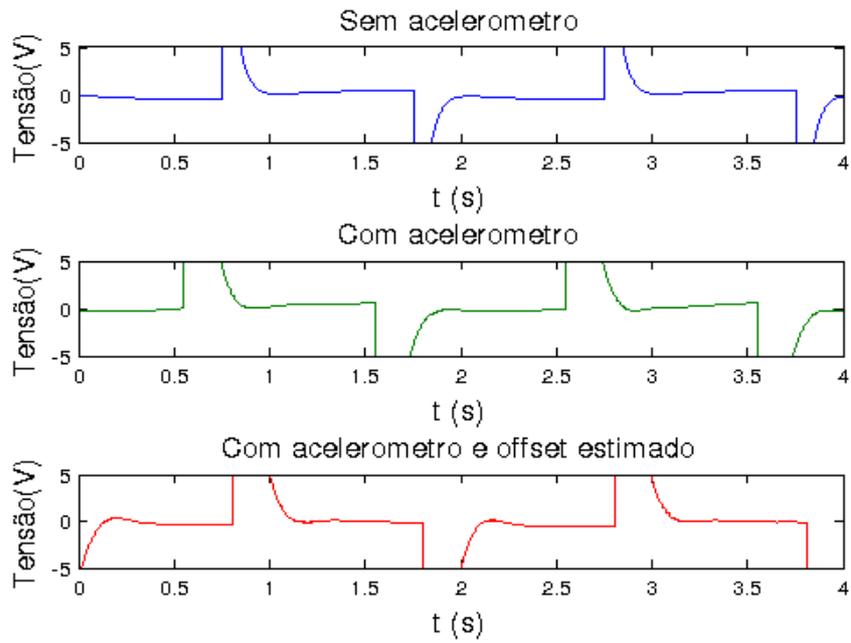


Figura 5.13: Sinais de controle para autovalores iguais a -2 rad/s e $1,5 \text{ rad/s}$

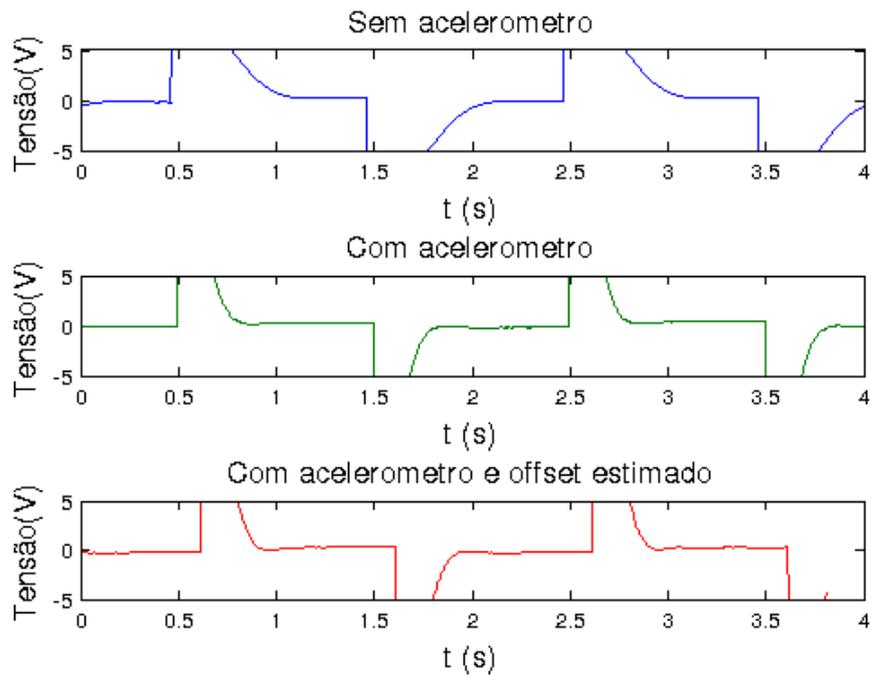


Figura 5.14: Sinais de controle para autovalores iguais a -20 rad/s e 15 rad/s

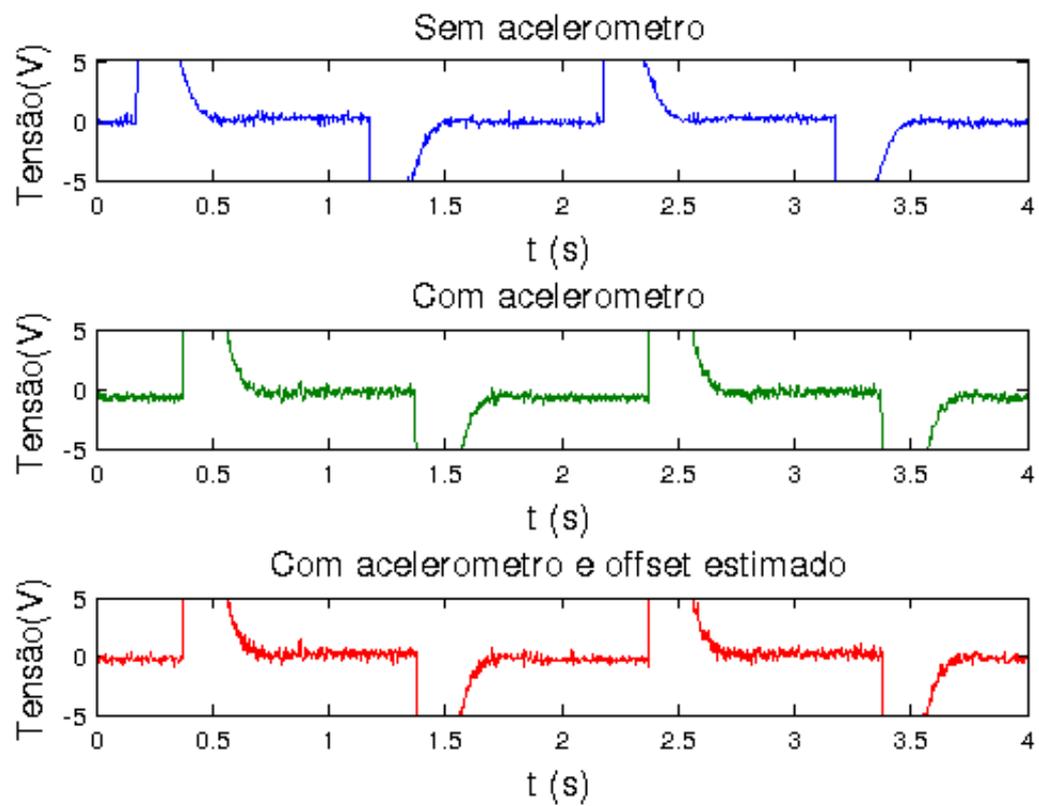


Figura 5.15: Sinais de controle para autovalores iguais a -200 rad/s e 150 rad/s

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fim de verificar o funcionamento de um acelerômetro MEMS e suas características, este projeto realizou experimentos simples que se mostraram eficientes para conseguir fazer a caracterização do acelerômetro estudado exceto para o caso da histerese onde o experimento foi ineficiente devido aos instrumentos utilizados. Os métodos propostos foram capazes de fornecer as principais características que influenciam na medida do acelerômetro.

O experimento descrito na seção 4.4 se mostrou o mais completo por obter a calibração e os desvios de ortogonalidade dos eixos de uma só vez.

Foi possível observar também a utilidade do acelerômetro em um sistema de controle de posição. Quando utilizado o acelerômetro o sistema convergiu mais rapidamente para a estabilidade mostrando assim a utilidade do dispositivo.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Alguns trabalhos futuros podem ser feitos para complementar a caracterização do acelerômetro, como por exemplo:

- Verificar a influência da temperatura;
A medida do acelerômetro pode ser alterada por causa da temperatura (Korvink e Paul, 2006). Quando utilizados em ambientes extremos é interessante saber o quanto a temperatura pode influenciar na medida.
- Medir a sensibilidade cruzada entre os eixos;
Idealmente cada eixo do acelerômetro deve ser sensível apenas a aceleração correspondente a esse eixo mas na prática acelerações em outras direções podem ser percebidas e prejudicar a medida. Esse efeito é chamado de sensibilidade cruzada (Junior, 2010).
- Verificar a influência da variação da tensão de alimentação;

Nesse projeto acelerômetro foi alimentado através de um regulador de tensão mas caso o acelerômetro fosse montado sem esse recurso a variação da tensão de alimentação poderia alterar os valores das medidas (Freescale, 2008) e seria um caso a ser analisando.

- Verificar a resposta de frequência;
A resposta de frequência é uma importante característica do acelerômetro e não pode ser medida nos experimentos devido ao equipamento usado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAR, C. e SHKEL, A.M. (2003). “Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. Journal of Micromechanics and Microengineering”, Institute of Physics Pub., v.13, pp. 634-645.

ANG, W., KHOSLA, P. e RIVIERE, C. (2007). “Nonlinear regression model of a low-g MEMS accelerometer”. IEEE Sensors Journal. 7, pp 81-88.

APKARIAN, J. (1995). “A Comprehensive and Modular Laboratory for Control Systems Design and Implementation”, Quanser Consulting. Disponível em : <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/Quanser/Manual-1995/Manual-Quanser-1995-part e2.zip>

BEEBY, S., ENSELL, G., KRAFT, M. e WHITE, N. (2004). “MEMS mechanical sensors”. Artech House, Inc.

BISSELL, C. C. e CHAPMAN, D. A. (1992). “Digital signal transmission”. Cambridge University Press. p. 64.

CLIFFORD, M. e GOMEZ, L. (2005). “Measuring tilt with low-g accelerometers”, Application Notes, Freescale Semiconductor, Inc.

FIGUEIREDO, L. J., GAFANIZ, A. R., LOPES, G. S. e PEREIRA, R. (2007). “Aplicações de acelerómetros”. IAS - Instrumentação de Aquisição de Sinais, Lisboa, Portugal, Dezembro.

FREESCALE Semiconductor (2008). Inc. “ $\pm 1.5g$ - 6g Three axis low-g micromachined accelerometer” , Document Number: MMA7260QT Rev 5.

JUNIOR, O. T. (2010). “Método de auto-calibração para tríades de sensores utilizadas em aplicações de estimação de atitude”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

KAAJAKARI , V. (2009). “Practical MEMS: analysis and design of microsystems, MEMS sensors, electronics, actuators, rf mems, optical MEMS, and microfluidic systems”, Small Gear Publishing.

KORVINK , J. G. e PAUL, O. (2006). “MEMS : a practical guide to design, analysis, and applications”, William Andrew Publishing.

LAWRENCE, A. (1998). “Modern inertial technology: navigation, guidance, and control”, 2ª Ed, Springer.

NEMIROVSKY, Y., NEMIROVSKY, A., MURALT, P. e SETTER N. (1996). “Design of novel thin-film piezoelectric accelerometer”. Sensors and Actuators A: Physical, v. 56, n. 3, pp. 239–249, Setembro.

OGATA, K. (1998). “Engenharia de controle moderno”, 3ª Ed, Livros Técnicos e Científicos S.A.

RENK E. L., RIZZO, M., COLLINS, W., LEE, F. e BERNSTEIN, D.S. (2005). “Calibrating a triaxial accelerometer-magnetometer - using robotic actuation for sensor reorientation during data collection”. IEEE Control Systems Magazine, v. 25, n. 6, pp. 86–95.

RIPPER, G. P. (2005). “Padronização primária em metrologia de vibrações” Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

RIPPER, G. P., DIAS, R. S. e GARCIA, G. A. (2008). “Calibração de transdutores de vibração”, Congresso nacional de engenharia mecânica, 5., ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, Bahia.

RIPPER, G. P., FERREIRA, C. D., TEIXEIRA, D. B., MICHELI, G. B. e DIAS, R. S. (2010). “Calibração dinâmica de acelerômetros em baixas frequências no Inmetro”, VI SBEIN, Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, Rio de Janeiro.

RODRIGUES, J., CAMPOS, A. N., MATEUS, C. F. R. e SUTÉRIO, R. (2010). “Identificação das principais componentes de incertezas de calibração de acelerômetro piezoelétrico pelo método da comparação: Uma revisão atual”, VI SBEIN, Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, Rio de Janeiro.

ROYLANCE, L. M. e ANGELL, J. B. (1979). “A batch-fabricated silicon accelerometer”, IEEE Transactions on Electron Devices, v. 26, n. 12, pp. 1911-1917, Dezembro.

SILVA, A. L. M., CUTIN, M. S. e MACHADO, S. G. (2001). “Sistema de levitação eletromagnético controlado por computador”, Projeto de graduação em engenharia eletrônica - UERJ, Rio de Janeiro.

Disponível em: <http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/PG/2001/PG-Levitacao-2001.pdf>

STRANG, G. (2003). Introduction to Linear Algebra, 3rd Ed., Wellesley-Cambridge Press.

TAKAHASHI, N. S., SANTANA, T. A. S.; JUNIOR, F. G. e TOSIN; M. C. (2010). “Algoritmo de auto-calibração de acelerômetros e magnetômetros para determinação de atitude”, VI SBEIN, Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, Rio de Janeiro.

TRETTNER, S. (1985). "Estimating the frequency of a noisy sinusoid by linear regression", IEEE Transactions on Information Theory, v. 31, n. 6, pp. 832-835, Novembro.

TUCK, K. (2007a). "Implementing auto-zero calibration technique for accelerometers", Application Notes, Freescale Semiconductor, Inc.

TUCK, K. (2007b). "Tilt Sensing Using Linear Accelerometers", Application Notes, Freescale Semiconductor, Inc.

XIAOXIONG, J., YU, L., BAOKU, S. e MING, L. (2008). "Experimental investigation on calibrating high precision accelerometer on two-axis table". Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, China.

ZHENG, J. e FU, M. (2010). "A Reset State Estimator Using an Accelerometer for Enhanced Motion Control with Sensor Quantization" Control Systems Technology, IEEE Transactions on, v. 18 , n. 1, pp. 79 – 90.

ZHOU, W., LI, B., HE, X., SU, W. e ZHANG, F. (2009). "Calibration study of force-balanced micro accelerometer based on least squared method and genetic algorithm". Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1357–1361.

APÊNDICE A – RESULTADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO DE ANÁLISE DO RUÍDO

No texto principal, apenas os resultados referentes às sensibilidades de 800 mV/g e 200 mV/g foram apresentados por serem os valores extremos de configuração da sensibilidade do acelerômetro e assim os mais importantes para a análise do ruído. Os demais resultados relativos às sensibilidades de 600 mV/g e 300 mV/g são apresentados respectivamente nas Tabelas A.1 e A.2.

Tabela A.1: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 600 mV/g

Eixo	Posição Vertical			Posição Horizontal		
	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)
x	4,9	37,8	965,7	6,7	39,1	1561,1
y	4,8	45,2	1032,3	4,5	33,0	1622,2
z	5,4	40,3	1054,2	4,6	37,8	1683,5

Tabela A.2: Ruído RMS e Valor Médio do Sinal - Sensibilidade 300 mV/g

Eixo	Posição Vertical			Posição Horizontal		
	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)	r_{rms} (mV)	r_{pp} (mV)	V_s (mV)
x	3,1	24,4	1284,4	3,2	23,2	1.5815
y	3,3	25,6	1320,6	2,9	24,4	1618,0
z	3,2	24,4	1335,4	3,1	23,2	1649,9

APÊNDICE B – RESULTADOS ADICIONAIS DO EXPERIMENTO DE CONTROLE DE POSIÇÃO

Além dos resultados apresentados no texto principal do trabalho, onde a sensibilidade foi ajustada para 800 mV/g, foram obtidos também resultados para as outras sensibilidades do acelerômetro. Esse resultados foram similares aos já apresentados e são exibidos nos gráficos a seguir.

B.1. Sensibilidade em 600 mV/g

Gráficos do erro de observação com sensibilidade ajustada para 600 mV/g

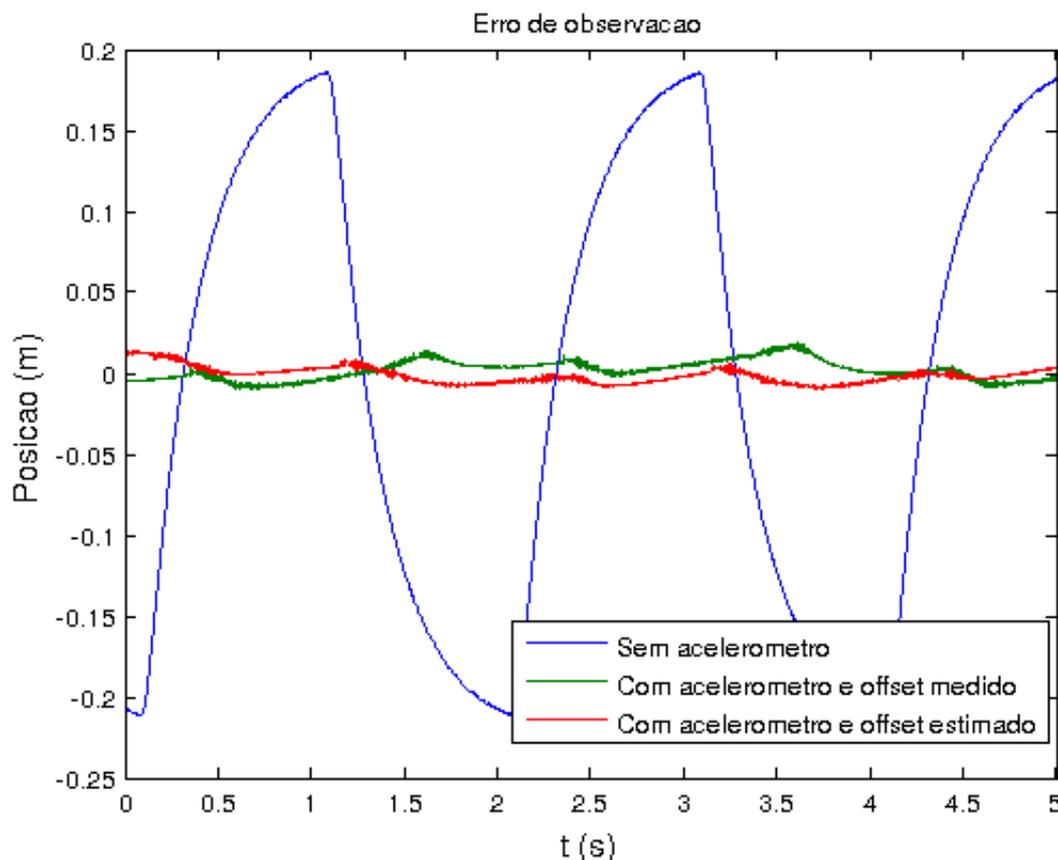


Figura B.1: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 600mV/g

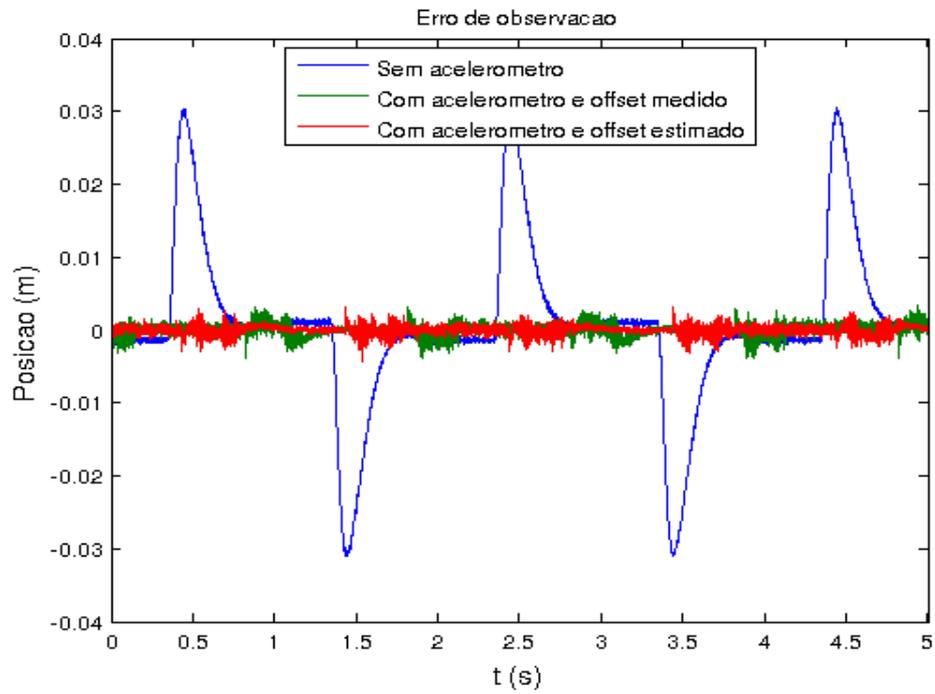
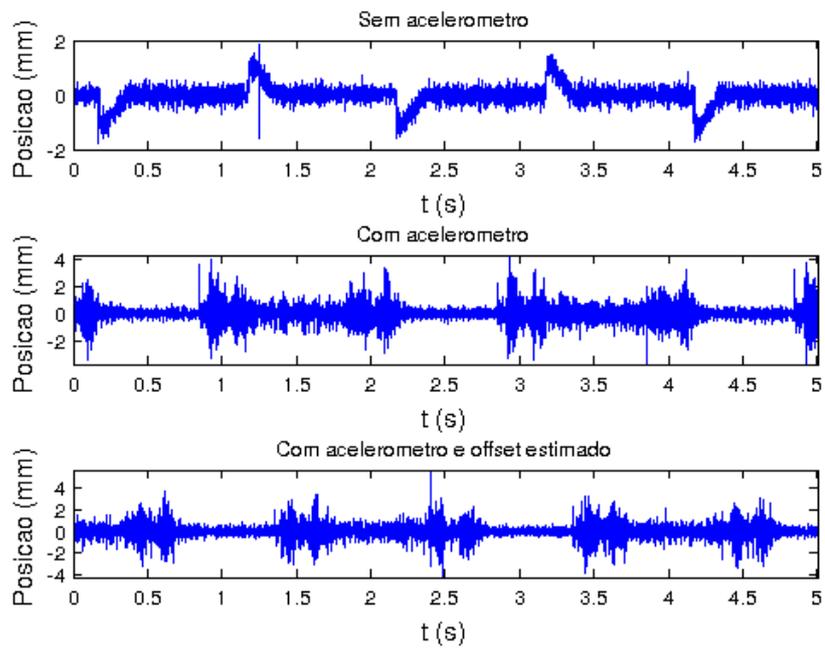


Figura B.2: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 600mV/g



**Figura B.3: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s
- Sensibilidade 600 mV/g**

Gráficos de posição com sensibilidade ajustada para 600 mV/g

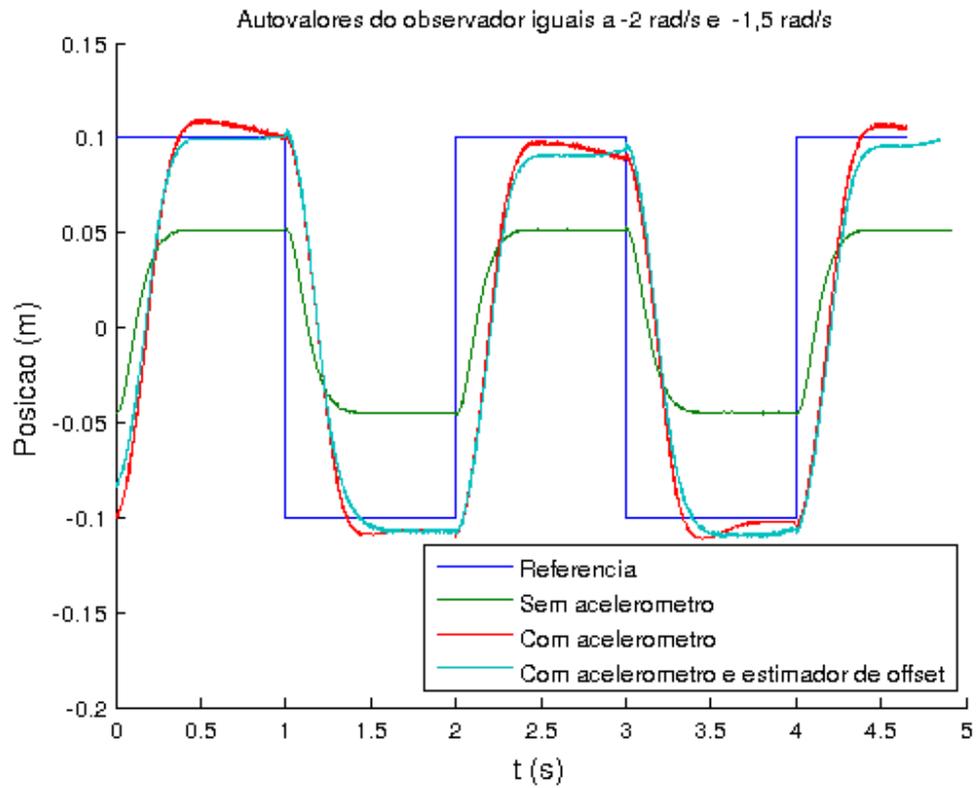


Figura B.4: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 600mV/g

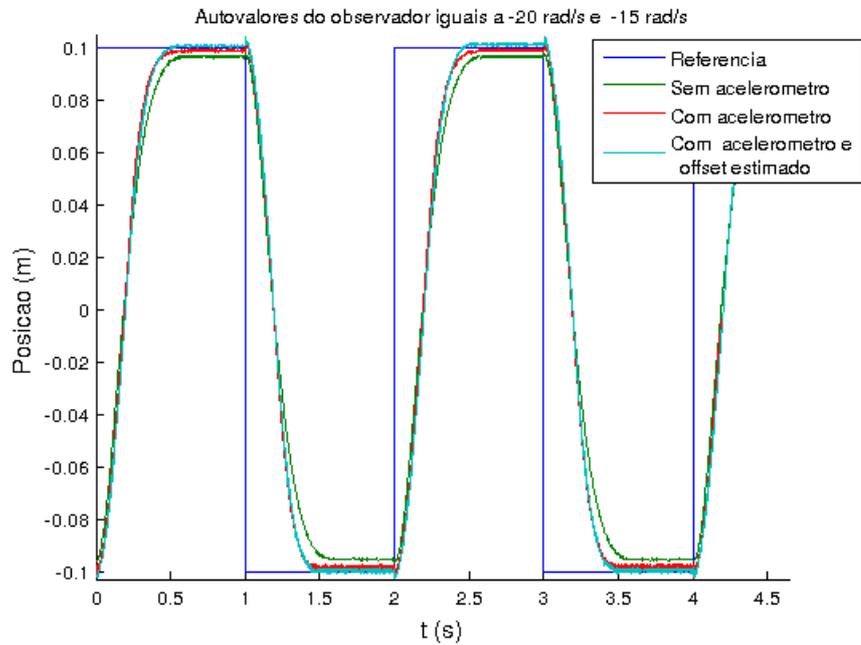


Figura B.5: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 600mV/g

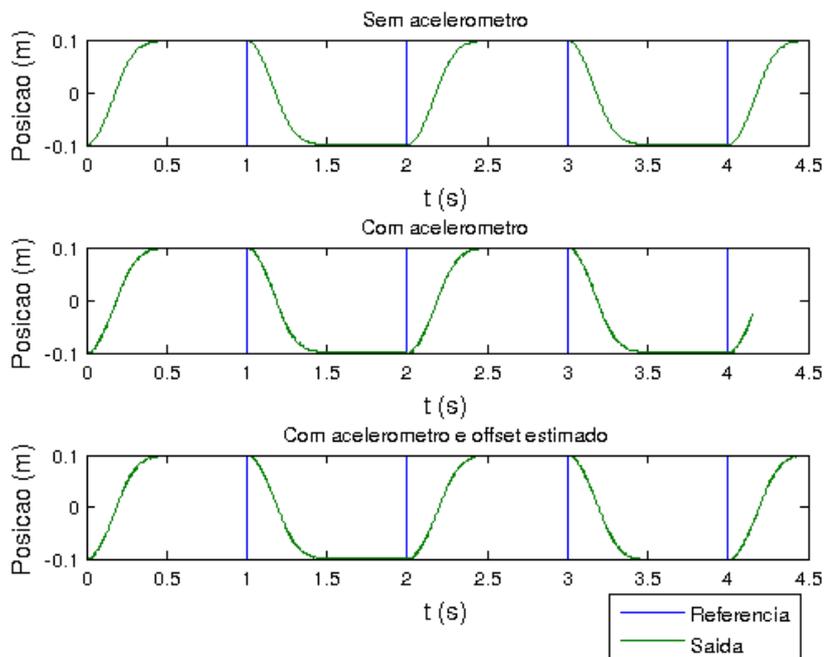


Figura B.6: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 600mV/g

B.2. Sensibilidade em 300 mV/g

Gráficos do erro de observação com sensibilidade ajustada para 300 mV/g

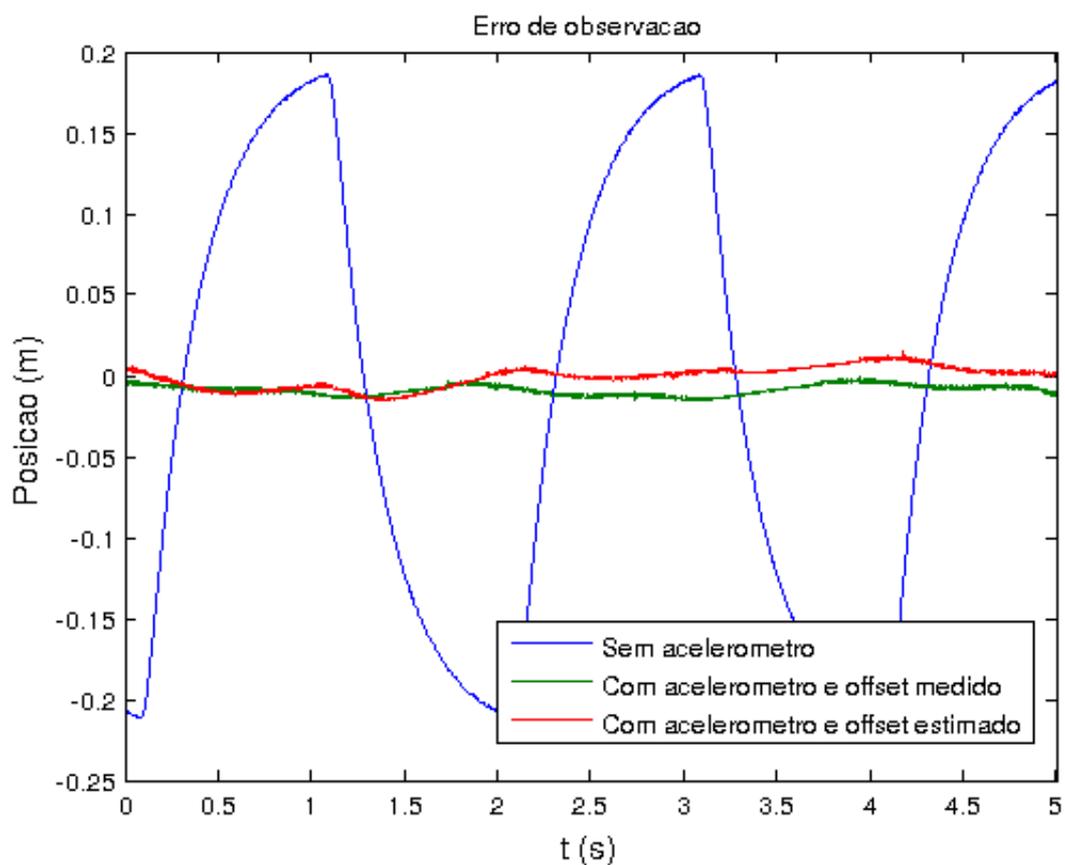


Figura B.7: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

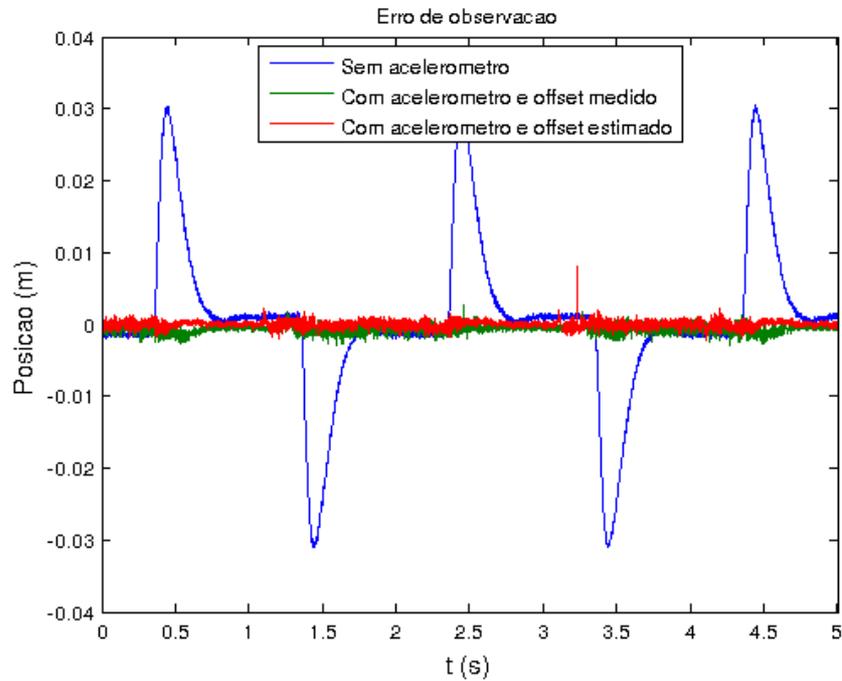


Figura B.8: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

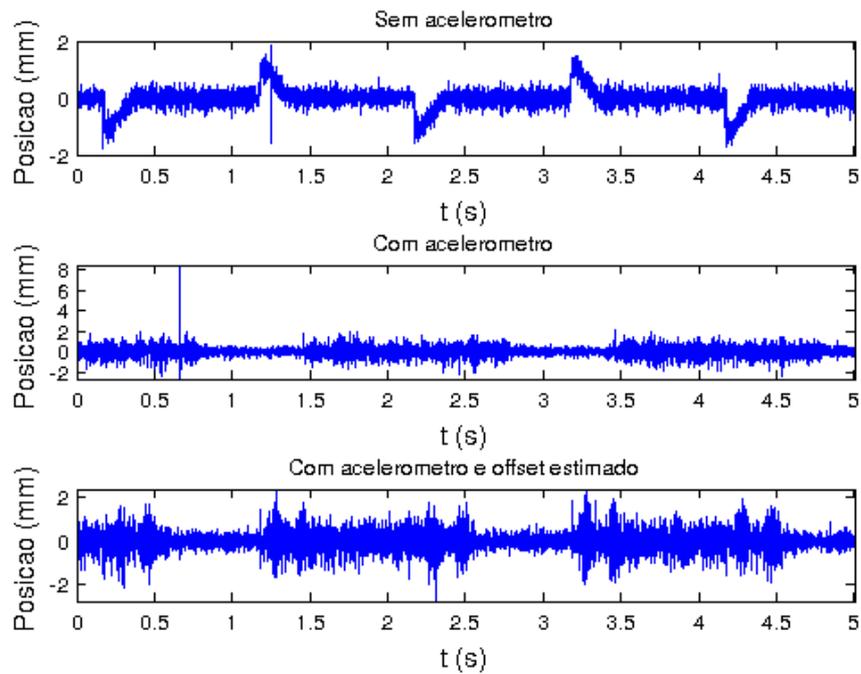


Figura B.9: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

Gráficos de posição com sensibilidade ajustada para 300 mV/g

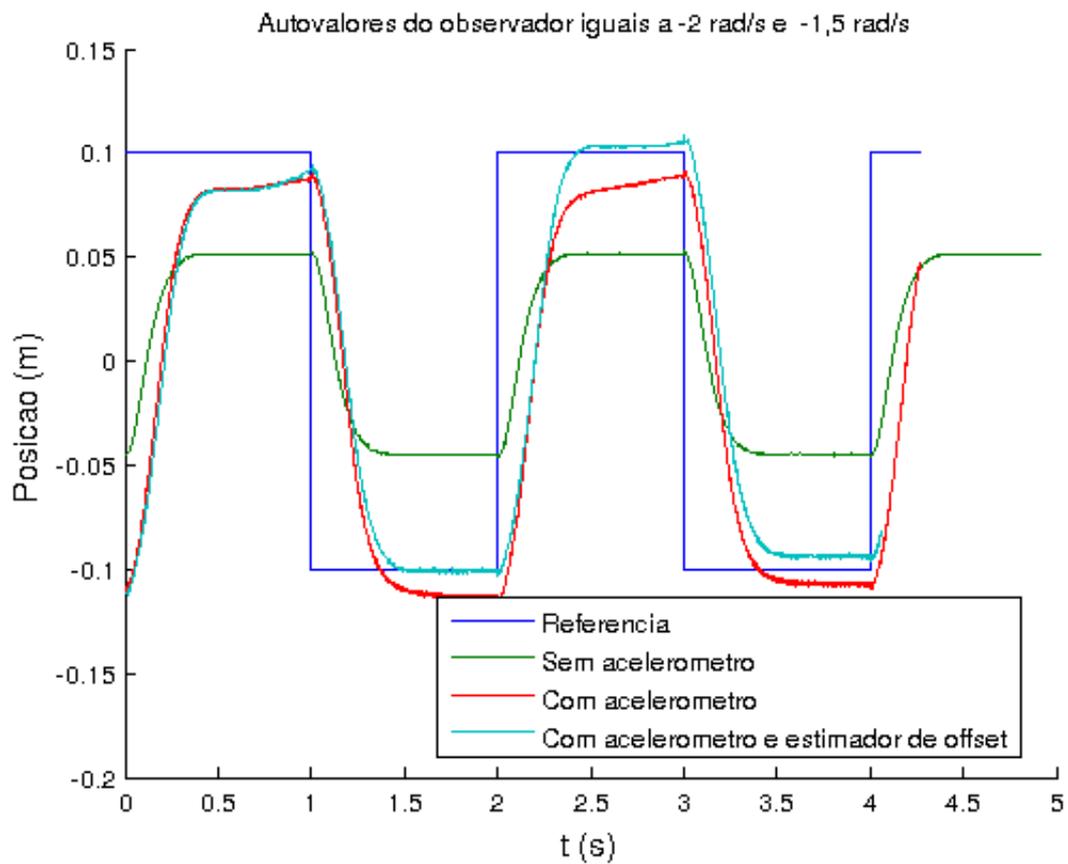


Figura B.10: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

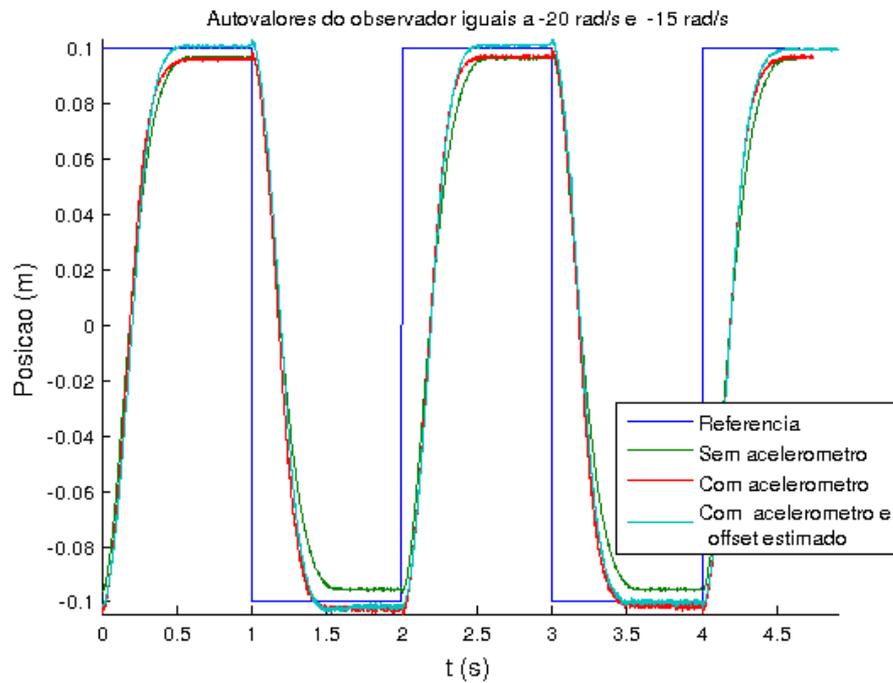


Figura B.11: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

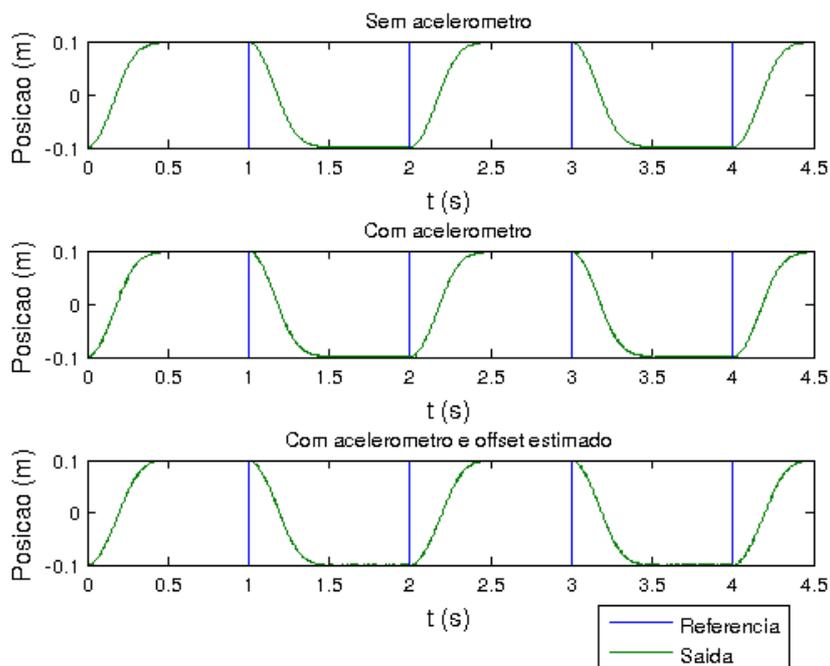


Figura B.12: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 300mV/g

B.3. Sensibilidade em 200 mV/g

Gráficos do erro de observação com sensibilidade ajustada para 200 mV/g

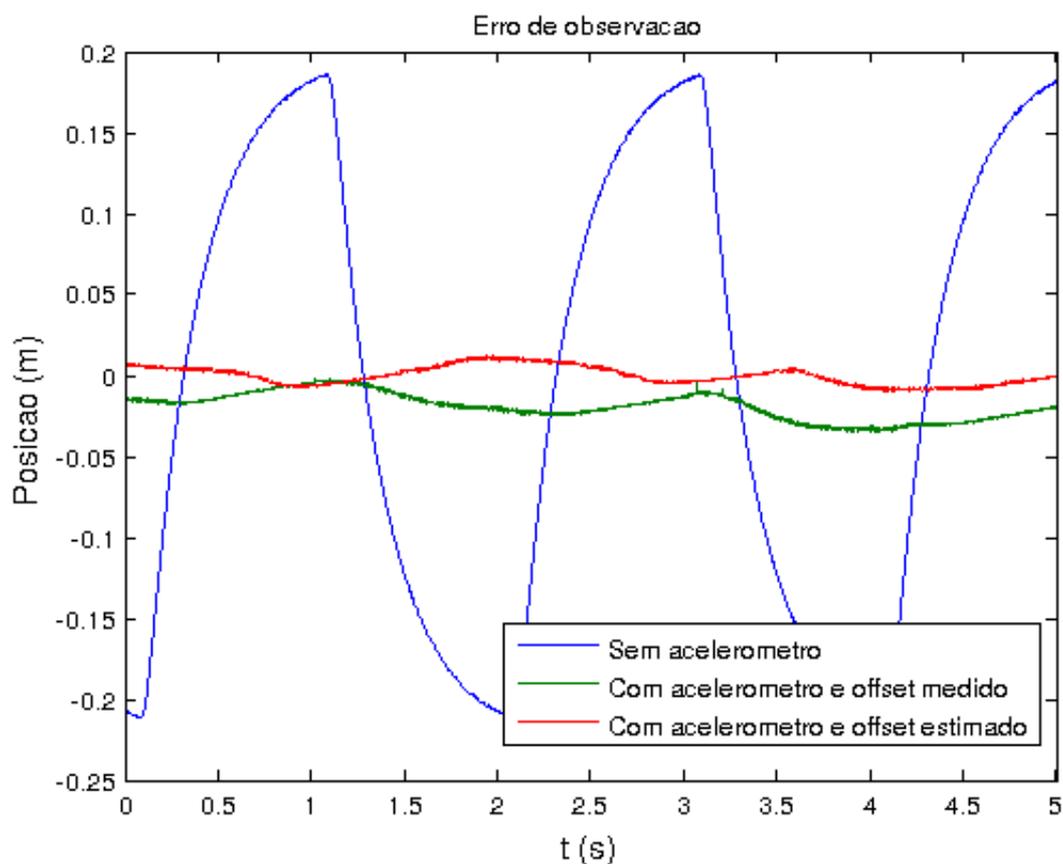


Figura B.13: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

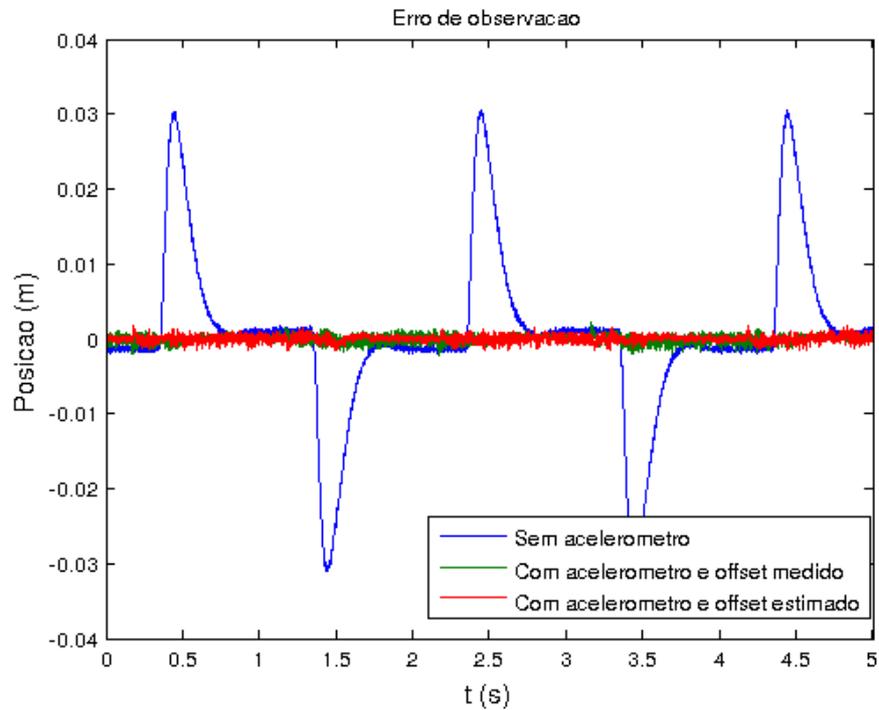


Figura B.14: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

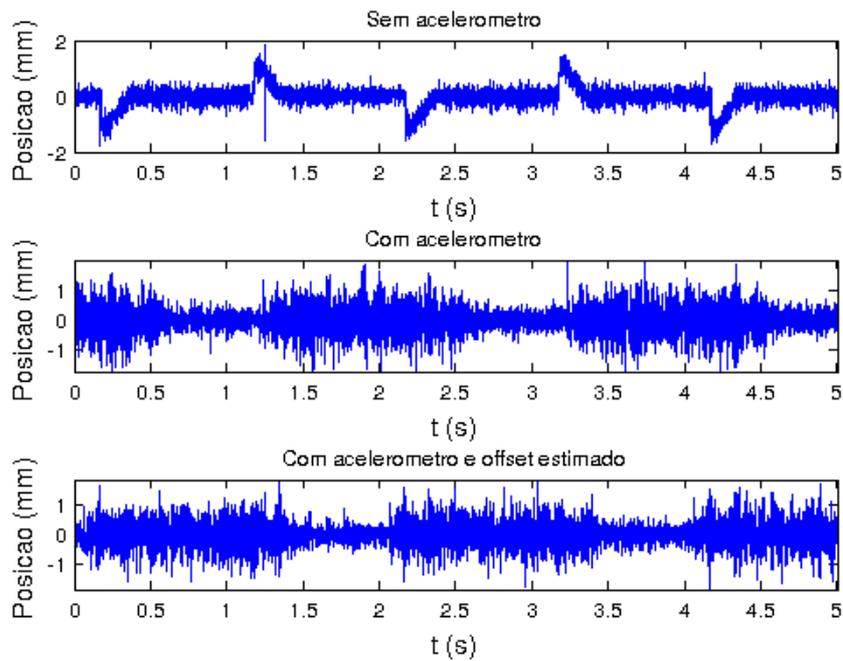


Figura B.15: Erros de observação – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

Gráficos de posição com sensibilidade ajustada para 200 mV/g

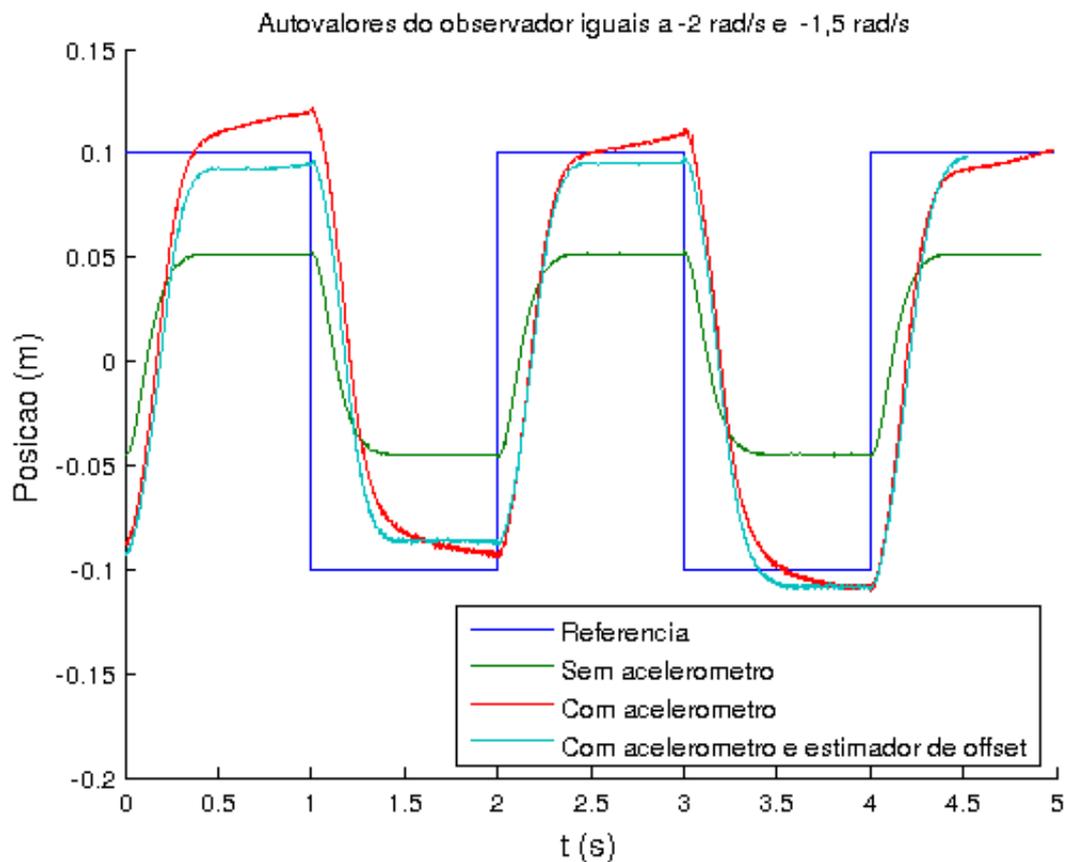


Figura B.16: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -2 rad/s e -1,5 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

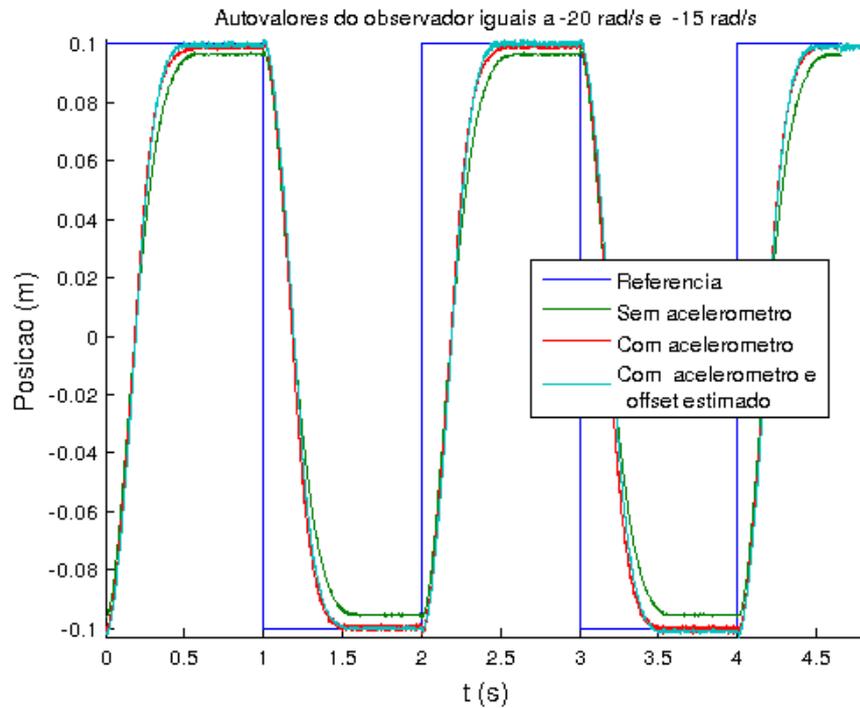


Figura B.17: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -20 rad/s e -15 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

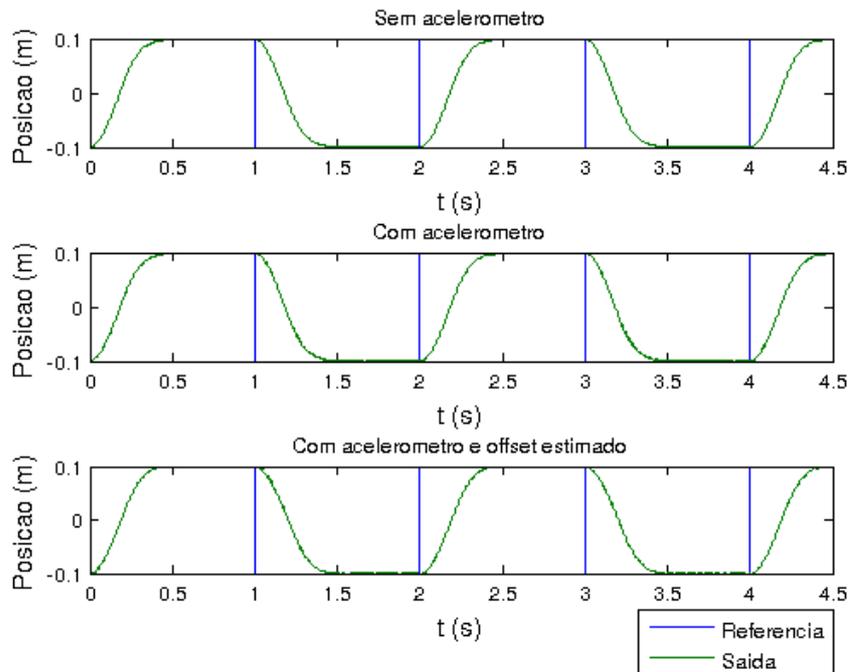


Figura B.18: Gráfico de posição – Autovalores do observador iguais a -200 rad/s e -150 rad/s - Sensibilidade 200mV/g

APÊNDICE C – PROGRAMA PARA O CÁLCULO DO RÚIDO RMS E DO VALOR MÉDIO DO SINAL

```
% Calculo do ruido rms e do valor medio do sinal
clc;
clear all;
x;          % Le dados coletados do eixo x do acelerômetro (PLOT_DATA)
close
x_medio = mean(PLOT_DATA)          % Calculo do valor medio do sinal x
ruido = PLOT_DATA-mean(PLOT_DATA); % Calculo do ruido_x
ruido_pp_x= max(PLOT_DATA)-min(PLOT_DATA)%Calculo do ruido pico a pico
rms_x=std(ruido)                   % Calculo do ruido_x rms

clear all;
y;          % Le dados coletados do eixo y do acelerômetro (PLOT_DATA)
close
y_medio = mean(PLOT_DATA)          % Calculo do valor medio do sinal y
ruido = PLOT_DATA-mean(PLOT_DATA); % Calculo do ruido_y
ruido_pp_y= max(PLOT_DATA)-min(PLOT_DATA) %Calculo do ruido pico a pico
rms_y=std(ruido)                   % Calculo do ruido_y rms

clear all;
z;          % Le dados coletados do eixo z do acelerômetro (PLOT_DATA)
close
z_medio = mean(PLOT_DATA)          % Calculo do valor medio do sinal z
ruido = PLOT_DATA-mean(PLOT_DATA); % Calculo do ruido_z
ruido_pp_z= max(PLOT_DATA)-min(PLOT_DATA)%Calculo do ruido pico a pico
rms_z=std(ruido)                   % Calculo do ruido_z rms
```

APÊNDICE D – PROGRAMA PARA O CÁLCULO DA ORTOGONALIDADE

```
clear all;
clc;
g=9.788;      % aceleracao da gravidade local
ref_e_saida; % Le dados dos sinais de referencia e saída e armazena na
              % matix (PLOT_DATA)
close        % Fecha o grafico da ref e saida

p= PLOT_DATA(length(PLOT_DATA),2)*pi/180; % Posicao medida pelo
potenciômetro em graus

acelx; % Le dados coletados do eixo x do acelerômetro e armazena na
      % matix (PLOT_DATA)
x=PLOT_DATA(length(PLOT_DATA)); % Grava os dados lidos anteriormente na
      % variável x

%Resolvendo o sistema de eq. Ax=b+e
A=[ones(size(p)) sin(p) cos(p)];
X=A\x;
x_offset=X(1)
alfax=atan2(-X(2),X(3)); % Calculo do ângulo alfa x
sensibilidade_x2=X(3)/cos(tetax) % Calculo da sensibilidade

acely; % Le dados coletados do eixo y do acelerômetro e armazena na
      % matix (PLOT_DATA)
y=PLOT_DATA(length(PLOT_DATA)); % Grava os dados lidos anteriormente na
      % variável y

close
%Resolvendo o sistema de eq. Ax=b
Y=A\y;
y_offset=Y(1)
```

```
alfay=atan2(-Y(2),Y(3)); % Calculo do ângulo alfa y  
sensibilidade_y=Y(3)/cos(tetay) % Calculo da sensibilidade  
beta=(tetax-tetay)*180/pi %Angulo entre os eixos x e y
```

APÊNDICE E – PROGRAMA PARA O CÁLCULO DOS GANHOS DO CONTROLADOR SEM ACELERÔMETRO

```
% Calculo do observador
clc
clear all

% Parâmetros do carrinho
Ra=2.6;           % Resistencia de armadura do motor
r=0.00635;       % Raio da engrenagem do motor
kg=3.7;          % Relacao das engrenagens
km=0.00767;      % Constante da forza contra-eletromotriz
kt=0.00767;      % Constante de torque do motor
Jm=3.9*10^-7;    % Momento de inercia do rotor
m=0.455;         % Massa do carrinho
n=0.9 ;          % Eficiencia do motor
M=m+(Jm/r^2);    % Massa incluindo momento de inercia do motor

% Matrizes da planta
Ac=[0 1;0 -(kg^2*kt*km*n)/(Ra*r^2*M)]

Bc=[0;(kt*kg*n)/(Ra*r*M)]

Cc=[1 0];

Dc=0;

P=[-20 -15];     % Polos do desejados
K=acker(Ac,Bc,P) % ganho de realimentacao

Kc=((Cc*(Bc*K-Ac)^-1)*Bc)^-1 % ganho dc unitario

P2 = 2*P;        % Polos do observador
L_linha = acker(Ac',Cc',P2);
L=L_linha'      % ganho do observado
```

APÊNDICE F – PROGRAMA PARA O CALCULO DOS GANHOS DO CONTROLADOR COM ACELERÔMETRO

```

% Calculo do observador usando acelerometro
clc
clear all

%calculo dos ganhos

Ra=2.6;           % Resistencia de armadura do motor
r=0.00635;       % Raio da engrenagem do motor
kg=3.7;          % Relacao das engrenagens
km=0.00767;      % Constante da forza contra-eletromotriz
kt=0.00767;      % Constante de torque do motor
Jm=3.9*10^-7;    % Momento de inercia do rotor
m=0.455;         % Massa do carrinho
n=0.9 ;          % Eficiencia do motor
M=m+(Jm/r^2);    % Massa incluindo momento de inercia do motor
fe=0.825;        % Sensibilidade [v/g]
a=9.788;         % Aceleracao da gravidade local [m/s^2]

% Matrizes da planta
Ac=[0 1;0 -(kg^2*kt*km*n)/(Ra*r^2*M)]

Bc=[0;(kt*kg*n)/(Ra*r*M)]

Cc=[1 0];

Dc=0;

% matrizes do observador
A=[0 1;0 0];

B=[0;1];

C=[1 0];

D=0;

P=[-20 -15];     % Polos de malha fechada do sistema
K=acker(Ac,Bc,P) % Ganho do controlador
Kc=((Cc*(Bc*K-Ac)^-1)*Bc)^-1 % Ganho de regulacao

P2 = 10*P;        % Polos do observador
L_linha = acker(A',C',P2);
L=L_linha'        % Ganho do observador

```

APÊNDICE G – PROGRAMA PARA O CALCULO DOS GANHOS DO CONTROLADOR COM ACELERÔMETRO E ESTIMADOR DE *OFFSET*

```

% observador usando acelerometro com estimacao de offset
clc
clear all

%calculo dos ganhos

Ra=2.6;           % Resistencia de armadura do motor
r=0.00635;       % Raio da engrenagem do motor
kg=3.7;          % Relacao das engrenagens
km=0.00767;      % Constante da forza contra-eletromotriz
kt=0.00767;      % Constante de torque do motor
Jm=3.9*10^-7;    % Momento de inercia do rotor
m=0.455;         % Massa do carrinho
n=0.9 ;          % Eficiencia do motor
M=m+(Jm/r^2);    % Massa incluindo momento de inercia do motor
fe=0.825;        % Sensibilidade [v/g]
a=9.788;         % Aceleracao da gravidade local [m/s^2]

% Matrizes da planta
Ac=[0 1;0 -(kg^2*kt*km*n)/(Ra*r^2*M)]

Bc=[0;(kt*kg*n)/(Ra*r*M)]

Cc=[1 0];

Dc=0;

% Matrizes do observador

A=[0 1 0;0 0 1;0 0 0];
B=[0;1;0];
C=[1 0 0];
D=0;

P=[-20 -15];     % Polos de malha fechada do sistema
K=acker(Ac,Bc,P) % Ganho do controlador
K=[K 0]

Kc=((Cc*(Bc*K-Ac)^-1)*Bc)^-1 % Ganho de regulacao

P2 = 0.1*[-20 -15 -10]; % Polos do observador

L_linha = acker(A',C',P2); % Ganho do observador
L=L_linha'

```