

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Automatização e ensaio de sensores inerciais
Bolsista: Mateus Rocha Almeida de Araújo
Orientador(a): Dr. Euler Gonçalves Barbosa
Período a que se refere o relatório: Fevereiro de 2014 a Julho de 2014

Resumo

A análise do comportamento de sensores inerciais vem sendo abordado exaustivamente para aplicação em sistemas inerciais, pois os erros de modelamento de tais sensores implicam diretamente na precisão de navegação de veículos aeronáuticos e espaciais. Os modelos levam em consideração os efeitos de alinhamento, técnicas de tratamento de sinais (analógicos ou digitais), presença de filtros e ruídos eletrônicos. O fator de temperatura é de grande importância visto que os veículos estão sujeitos a grandes variações de temperatura. Assim este trabalho apresenta os resultados obtidos em laboratório onde são analisados parâmetros dos sensores inerciais (acelerômetros), enquanto que são realizados testes em quatro posições a várias temperaturas diferentes. Dentre os vários ensaios realizados foram selecionados três testes, onde pôde se observar a diferença de aceleração, na medida em que a temperatura aumenta. Neste processo procurou-se automatizar todas as medidas das grandezas físicas, através do uso de um sistema de aquisição e processamento de dados em tempo real (CompactRIO) com programação no ambiente LabVIEW. Por meio de equipamentos especiais (Deviding Head), um disco térmico contendo três resistências elétricas e sensores inerciais e seguindo os procedimentos recomendados pela norma IEEE, obteve-se as variações no *bias* e fator de escala do sensor em função da temperatura. Estas variações são implementadas no modelo de erro e as medidas são compensadas por software.

1. Introdução

O modelo de erros de um acelerômetro, segundo a Norma IEEE (IEEE Std 337) representa a resposta do sensor para acelerações aplicadas no seu eixo de entrada e adicionado dos efeitos da temperatura é dada pela equação a seguir.

$$A_{ind} = \frac{E_0}{K_1} = K_0 + a_i + K_2 a_i^2 + K_3 a_i^3 + \delta_o a_p - \delta_p a_o + K_{ip} a_i a_p + K_{io} a_i a_o + k_T T$$

onde:

A_{ind} = aceleração indicada pelo acelerômetro;

E_0 = saída do acelerômetro;

a_i, a_p, a_o = componentes da aceleração aplicada no eixo de entrada positiva, no eixo do pêndulo e no eixo de saída, respectivamente;

K_0 = bias;

K_1 = fator de escala;

K_2 = coeficiente não linear de 2a. ordem;

K_3 = coeficiente não linear de 3a. ordem;

δ_o, δ_p = desalinhamento do eixo de entrada, com respeito ao eixo de referência de entrada pelo eixo de referencia de saída e pelo eixo de referência do pêndulo, respectivamente;

k_T = parâmetro de temperatura

T = Temperatura do sensor

com o fator de escala e bias:

$$K_1 = \frac{E_{90} - E_{270}}{2} [mV/g] \quad \text{e} \quad K_0 = \frac{E_0 + E_{180}}{2K_1} [g]$$

Os testes para levantamento da variação dos parâmetros são realizados com auxílio de um disco térmico com controle de temperatura em malha fechada. Assim uma breve explanação de sistemas dinâmicos operando em malha fechada é apresentada a seguir.

Um circuito de malha fechada é aquele que controla a grandeza tornando a saída como referência, ou seja, a ação de controle é dependente da saída. No controle em malha fechada, informações sobre como a saída de controle está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída para a entrada.

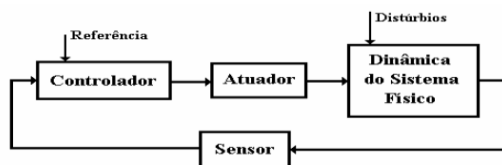


Figura 1.1. Diagrama de um Sistema de Controle.

A inércia térmica caracteriza a resistência oferecida pelos sistemas térmicos à tentativa de alterar seu estado termodinâmico. A equação de Fourier é utilizada para modelar e analisar a condução térmica em peças que suportam sensores inerciais.

2. Material e métodos

Para a realização dos ensaios foram utilizadas três fontes, uma para alimentação do CRIO, uma para alimentação do amplificador de tensão e outra para a alimentação dos sensores, conforme mostra a figura a seguir.



Figura 2.1. Fontes de alimentação do disco térmico, do Crio e do sensor inercial.

A figura abaixo apresenta um amplificador de tensão (até 20 volts), um módulo de aquisição de dados em tempo real da *National Instruments* (modelo NI CRIO-9014) e um disco térmico contendo os sensores inerciais e as resistências elétricas.



Figura 2.2. Amplificador de tensão, Crio e disco térmico.

Um módulo de controle de rotação do disco térmico (Deviding Head) é apresentado na figura abaixo.



Figura 2.3. Conjunto (Deviding Head + Disco Térmico).

3. Resultados

O primeiro ensaio foi realizado a uma tensão constante controlada via LabVIEW, a 5 volts e durante 3600 segundos. A temperatura se estabilizou em torno de 30°C, onde logo após foram feitos as coletas de dados conforme as figuras abaixo:

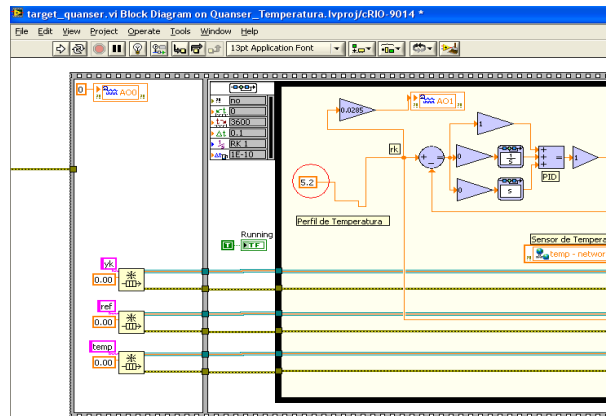


Figura 3.1. Perfil de temperatura controlado via LabVIEW.

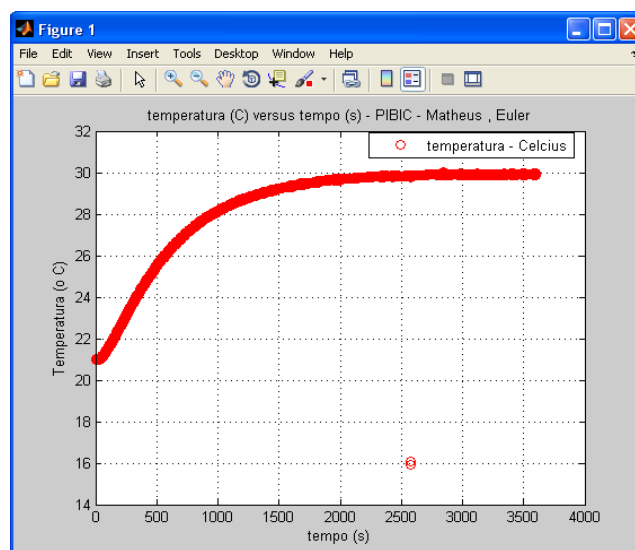


Figura 3.2. Curva de temperatura.

Para este valor de temperatura, os sensores inerciais apresentaram os seguintes dados conforme apresenta a figura a seguir.

```
Command Window

O programa iniciou ...

-----
Sensor mais preciso (sem conector): Acel ISR
-----

1a rodada:
Sequencia 1:
Pela sequencia 1:
Fator de escala = 0.09981 V/g = 1.23197 mA/g
Bias = 23.78787 mg
Bias (2) = 24.27736 mg
delta o = -0.01891 rad = -64.99 arcmin
```

Figura 3.3. Fator de escala

Foi verificado que para a uma temperatura de 30°C, o sensor inercial apresenta um valor de fator de escala igual a **1.23197mA/g**.

O segundo teste foi realizado a uma tensão constante via LabVIEW, a 5.2 volts durante 3600 segundos. Neste teste, a temperatura se estabilizou em torno de 31°C, onde logo após foram feitos as coletas dos dados conforme as figuras abaixo:

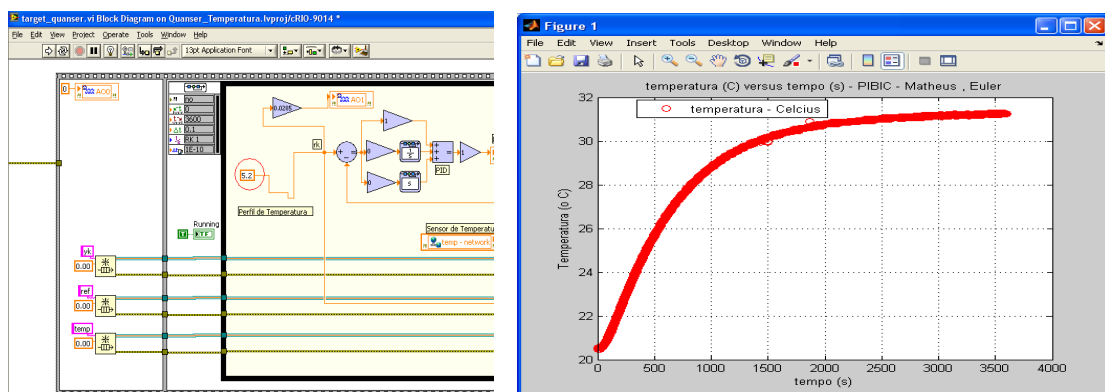


Figura 3.4. Perfil de temperatura controlado via LabVIEW e Curva de temperatura.

Para este valor de temperatura o sensor inercial apresenta os dados mostrados na figura a seguir.

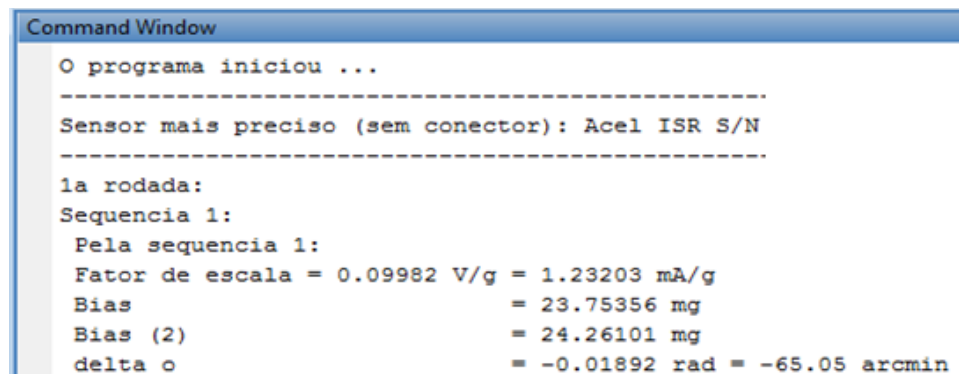


Figura 3.5. Fator de escala

Foi verificado que para uma temperatura em torno de 31°C, o sensor inercial apresenta um valor de fator de escala igual a **1.23203 mA/g**.

O terceiro teste foi realizado a um valor de tensão constante controlado via LabVIEW, a 5.5V durante 1800 segundos. Neste teste, a temperatura se estabilizou em torno de 33.3°C, onde logo após foram feitos as coletas de dados conforme as figuras abaixo:

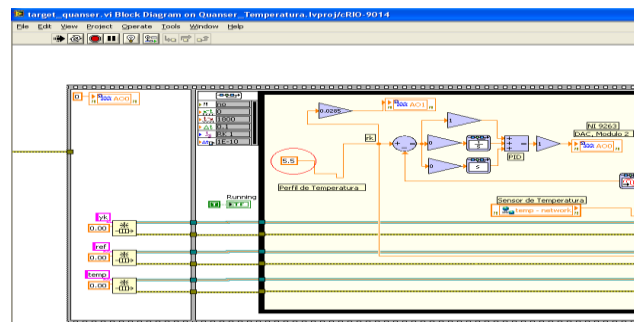


Figura 3.6. Perfil de temperatura controlado via LabVIEW.

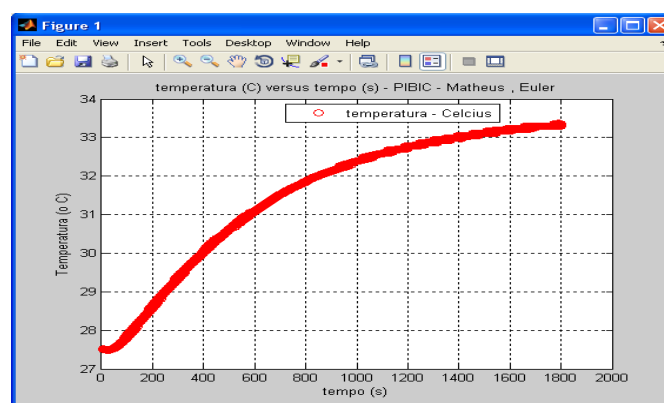


Figura 3.7. Curva de temperatura.

Para este valor de temperatura, o sensor inercial apresenta os seguintes dados:

```
Command Window

O programa iniciou ...

-----
Sensor mais preciso (sem conector):
-----

1a rodada:
Sequencia 1:
Pela sequencia 1:
Fator de escala = 0.09982 V/g = 1.23209 mA/g
Bias = 23.66410 mg
Bias (2) = 24.09666 mg
delta o = -0.01888 rad = -64.89 arcmin
```

Figura 3.8. Fator de escala.

Foi verificado que para uma temperatura em torno de 33.3°C, o sensor inercial apresenta um valor de fator de escala igual a **1.23209mA/g**.

4. Conclusões

Conclui-se que o fator de escala do acelerômetro varia de $6.10^{-6} \text{ mA/g/}^{\circ}\text{C}$ e com bias no valor de 23.66 mg conforme a mudança de temperatura de trabalho do sensor. Este valor poderá ser implementado no modelo de erros do sensor de modo a realizar a compensação da temperatura por software. O sistema utilizado em tempo real é de fundamental importância visto que os sistemas inerciais operam com processamento de dados a uma taxa de aquisição fixa. Para o aperfeiçoamento dos teste, foi verificado que é necessária uma automatização da *Deviding Head* para realizar os teste de quatro posições (90° , 0° , 270° e 180°) do sensor inercial, obtendo-se assim maior confiabilidade do modelo de erros do acelerômetro levando-se em conta a variação de temperatura. O modelo térmico também deverá ser estudado de modo a melhorar o tempo de estabilização da temperatura do disco.

Referências

Lawrence, A. **Modern inertial technology**. New York: Springer-Verlag, 1992. 235p.

Stieler, Bernhard. **Inertial Metrology and Integrated Navigation** – Outline of an Intensive Course to be Held in Brazil, 2005.

Ozisik, N.; *Transferência de Calor: Um Texto Básico*, Ed. Guanabara, 1990, 661 pgs.

IEEE Std 337 – 1972, **IEEE Standart Specification Format Guide and Test Procedure for Linear**, Single-Axis, Pendulous, Analog Torque Balance Accelerometer.

IEEE Std 528-1984, IEEE Standart: Inertial Sensor Terminology.

IEEE Std 836-1991, IEEE Recommended Practice for Precision Centrifuge Testing of Linear Accelerometers.

Barbosa, E. G., **Análise da Dinâmica de Sensores e de Filtros em Sistemas de Controle de Veículos**, SBEIN, Simpósio Brasileiro de Engenharia Inercial, Rio de Janeiro, 2010.