

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: Agosto de 2014 a Julho de 2015.

Resumo

Os ensaios de sensores de característica pendular (acelerômetro) agora possuem uma automatização bem definida utilizando um dispositivo eletromecânico para variação de temperatura. O acionamento de uma cabeça divisora foi projetado e idealizado pela Divisão ASD e os componentes foram adquiridos e aguardam apenas a integração com o eixo longitudinal. A Divisão de Mecânica (AME) realizou a usinagem das peças que compõem o sistema de acionamento com polias, correia dentada e motores de passo (step-motors) e uma placa eletrônica que aciona as resistências para aquecimento foi instalada. A análise dos parâmetros referentes a temperatura, como os “in-run”, short-term e long-term podem ser acessados para caracterizar o acelerômetro, assim como definir funções para realizar o *matching* entre os dados reais e teóricos. O programa que integra o sistema permite a automatização de posição, temperatura do sensor e temperatura ambiente assim como o acionamento via motores de passo. O sistema de controle automático opera em tempo real e permite obter estimativas de modelos analíticos de forma a caracterizar os acelerômetros com mais precisão e correção em temperatura com algoritmos rodando online durante o voo do veículo a que o sensor está implementado. 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. Alguns refinamentos referentes ao calculo dos ganhos do controlador de temperatura podem ser obtidos com a aplicação de ferramentas de projetos de sistemas de controle com abordagem clássica.

1. Introdução

As variações de fenômenos físicos, como temperatura, umidade relativa, ruído, campo magnéticos, vibrações, alimentação elétrica implicam diretamente no comportamento elétrico e mecânico de sensores inerciais. Especificamente sobre a temperatura, 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 é dada pela equação a seguir, sendo adicionado dos efeitos da temperatura.

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

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.

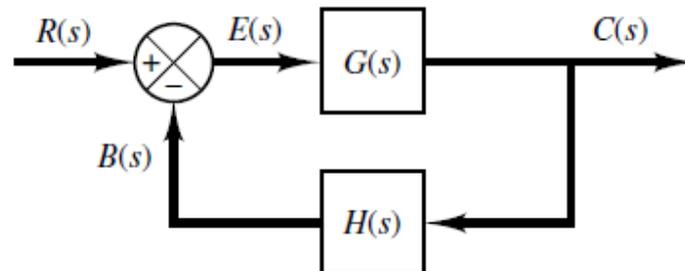


Figura 1. Diagrama de um Sistema de Controle.

O projeto do controlador para a identificação de um modelo térmico seguirá a Equação de Fourier para a condução de calor, considerando um modelo simplificado.

$$q'' = \frac{q}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x}.$$

A inércia térmica caracteriza a resistência oferecida pelos sistemas térmicos à tentativa de alterar seu estado termodinâmico.

2. Material e métodos

O acionamento da cabeça divisora foi idealizado pelo projeto apresentado nas figuras que seguem. O volante do eixo foi retirado de forma que pudesse ser instalados a correia, o motor de passo e a caixa que foi anexada ao lado do corpo da Deviding Head.

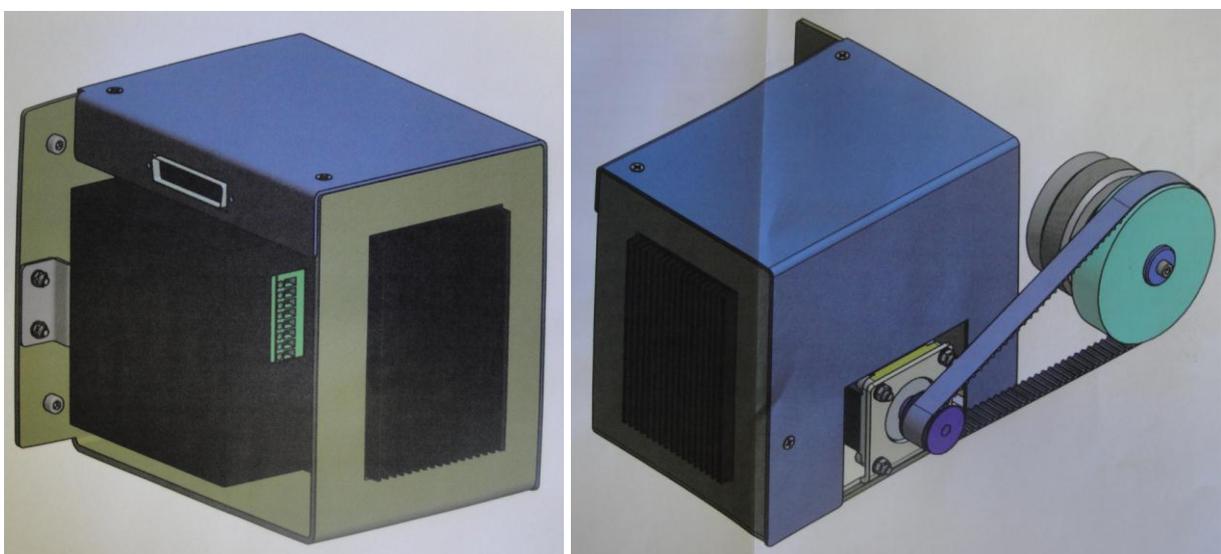


Figura 2. (esq) Acionamento Dividing Head, vista lateral e (dir.) Vista frontal.

A Divisão de Mecânica fabricou todas as peças mecânicas e as engrenagens dentadas adquiridas no comércio especializado. As cotas principais e detalhes da integração são apresentadas nas figuras abaixo.

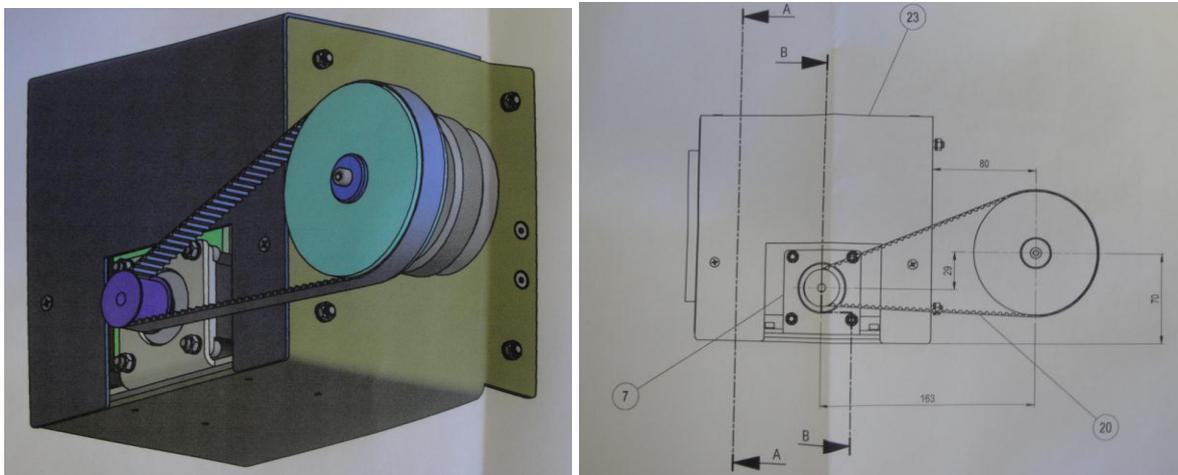


Figura 3. (esq) Acionamento Dividing Head, vista lateral e (dir.) cotas principais.

Foi necessário retirar o volante do equipamento de modo a acessar o eixo da Deviding Head e assim projetar as engrenagens. A Figura 4 abaixo apresenta o volante e as peças de fixação por pressão.



Figura 4. Detalhe do volante da Dividing Head.

O disco térmico, conforme mostra a figura 5 a seguir, contém os sensores inerciais, as resistências elétricas e o sensor de temperatura ao centro. Uma pasta térmica especial é utilizada para otimizar a condução de calor do sensor para o disco térmico.

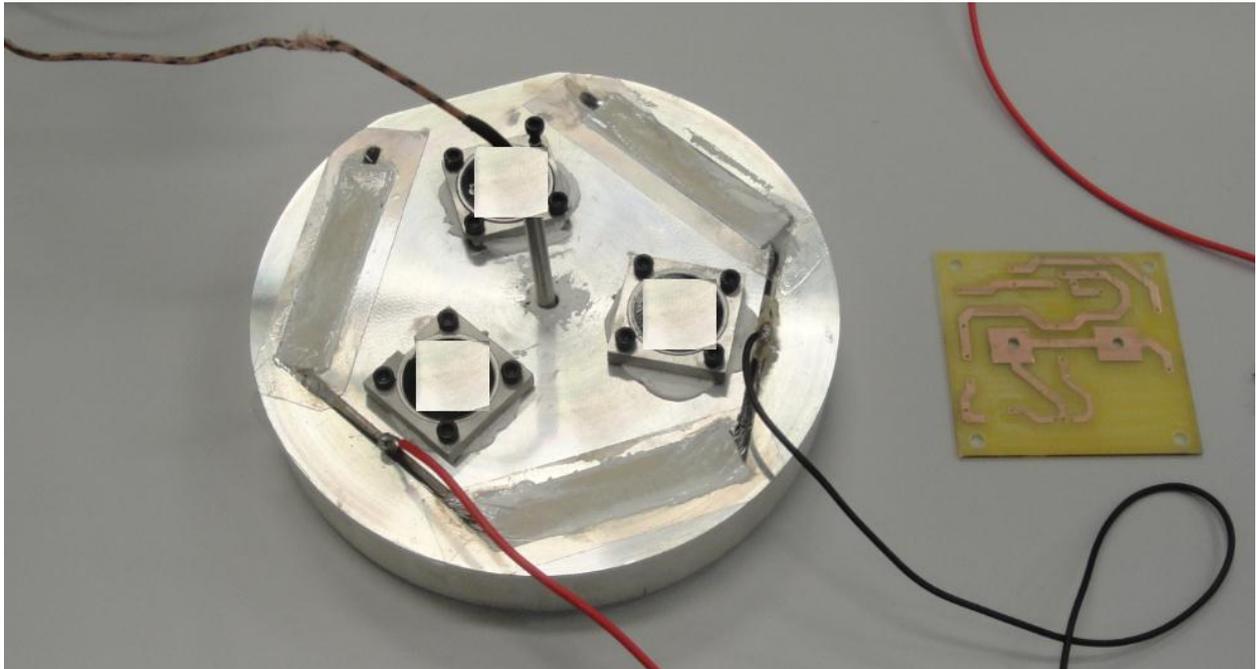


Figura 5. Acionamento do eixo da mesa rotativa com polias e motores de passo.

Uma nova placa eletrônica foi projetada para controlar a temperatura do disco térmico e instalada no sistema para obtenção de um melhor desempenho para obtenção de temperaturas em um curto período de tempo. Todo o sistema de medição e acionamento é realizado por um módulo de aquisição de dados em tempo real da *National Instruments* (modelo NI CRIO-9014), mostrado na Figura 3.



Figura 6. Novo amplificador de tensão, CRIO e disco térmico.

Na 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 7 a seguir.



Figura 7. Fontes de alimentação do disco térmico, do Crio e do sensor inercial.

Um módulo de controle de rotação do disco térmico (*Dividing Head*) é apresentado na figura 8 abaixo.



Figura 8. Conjunto (*Dividing Head* + Disco Térmico).

O programa de controle de todo o sistema bem como gravação de dados é mostrado na figura 9 a seguir. É baseado no ambiente Labview utilizando o modulo de Sistemas de Controle.

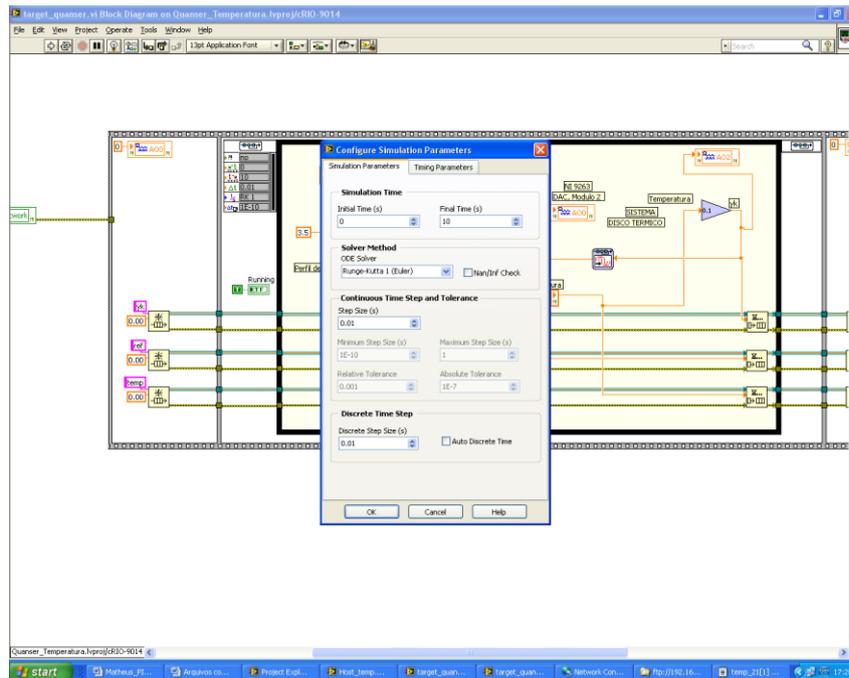


Figura 9. Programa principal para comando do sistema.

3. Resultados

Vários ensaios de uma hora foram realizados de modo a acessar os parâmetros de fator de escala, bias e dispersão do bias. A figura a seguir apresenta o arquivo de saída com as informações de tempo, saída do sensor acelerométrico e temperatura interna do sensor.

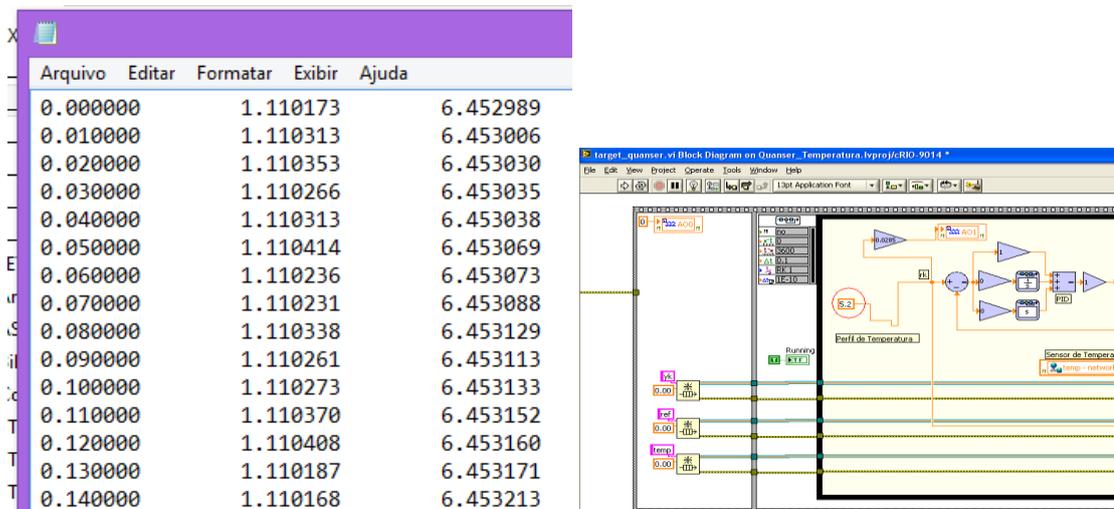


Figura 10. Dados temporais de tempo, aceleração e temperatura, 100 Hz de amostragem.

A temperatura externa do ensaio são capturadas ao intervalo de de tempo fixos e gravados em arquivo para posterior análise, na forma de arquivo gerado e gráficos temporais (Figuras 11 e 12).

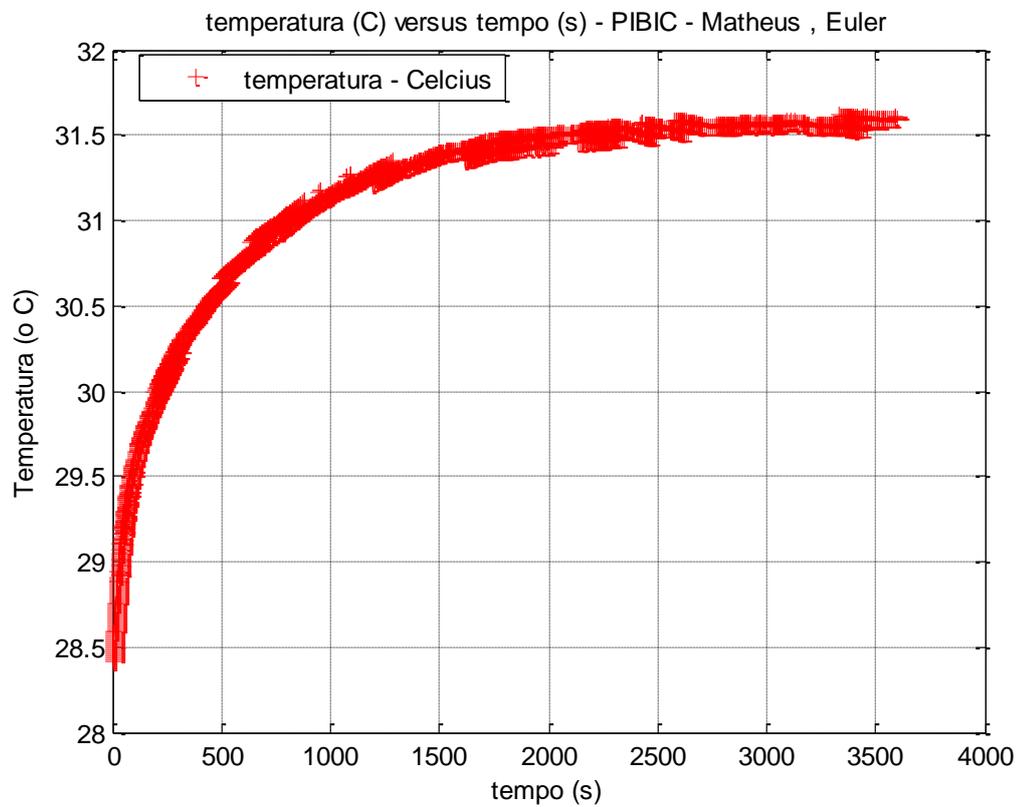


Figura 11. História temporal da temperatura externa, 1 Hz de amostragem.

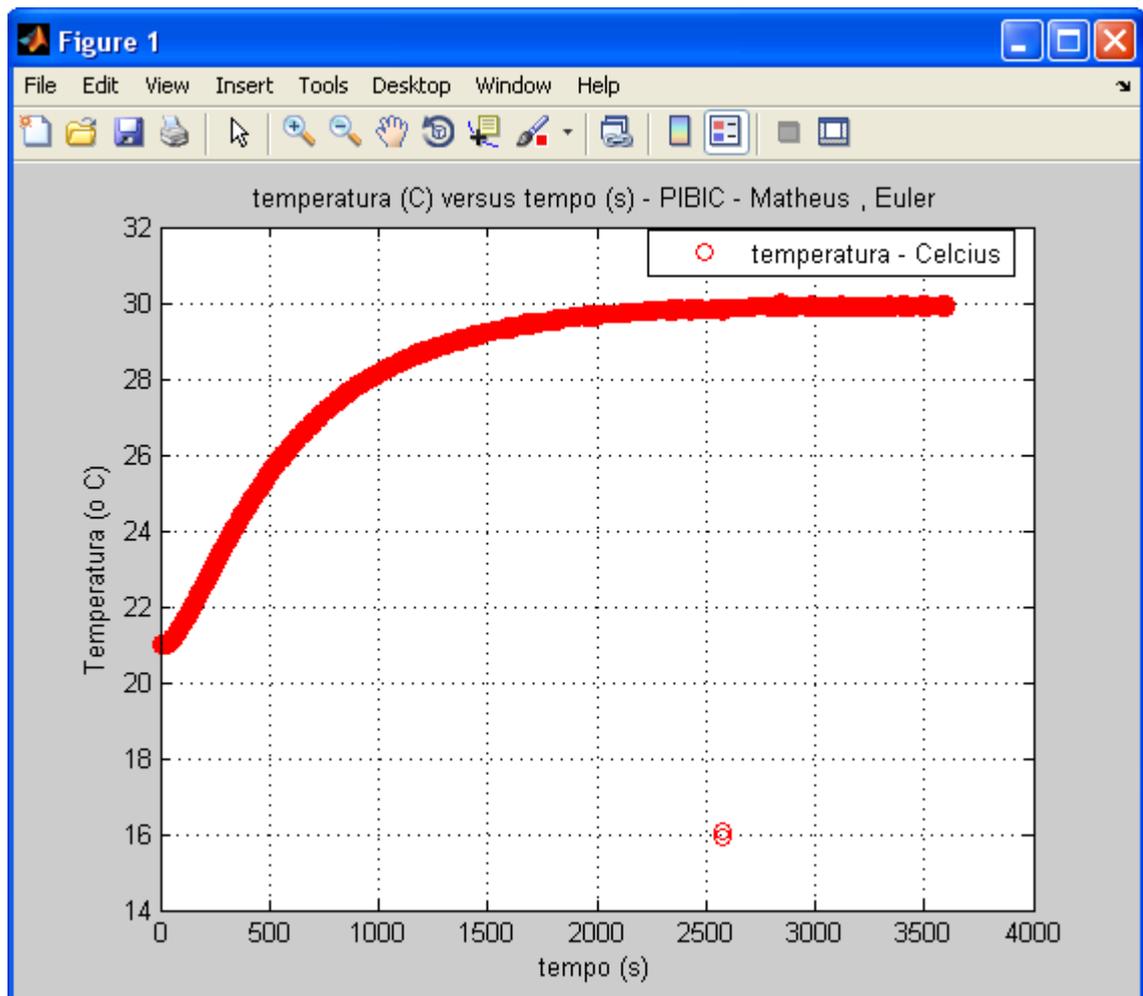


Figura 12. Curva de temperatura obtida de testes com o disco térmico.

4. Conclusões

A automatização da Cabeça Divisora (Deviding Head) para ensaios de sensores é de grande importância para obtenção de modelos matemáticos confiáveis e assim o presente trabalho permitiu idealizar e projetar um sistema que opera para leitura e acionamento de modo a obter dados para estimativa dos parâmetros de temperatura.

As estimativas iniciais obtidas dos ensaios são coerentes e assim o fator de escala do acelerômetro varia de 6.10^{-6} mA/g/°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.

A automatização completa dos ensaios depende agora apenas da leitura automática do indicador de posição angular, visto que utiliza um protocolo especial e está sendo analisado para implementação final.

O Sistema de Controle de temperatura opera baseado na teoria de controle clássico pois o controlador implementado roda em um sistema específico de tempo-real, com a estrutura PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

Conclui-se que com a integração do hardware de controle e das placas eletrônicas obtém-se ensaios mais rápidos e confiáveis, de modo a conhecer os parâmetros do modelo de erros de temperatura e suas respectivas dispersões.

Referências

Ogata, K., Engenharia de Controle Moderno, Pearson Education Do Brasil, 5ª Edição.

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 Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Linear**, Single-Axis, Pendulous, Analog Torque Balance Accelerometer.

IEEE Std 528-1984, IEEE Standard: 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.