



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DE CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS LINEARES PELO MÉTODO DA FORÇA CENTRÍPETA

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Priscila Ferreira Bianco de Castro (INPE/LIT, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: priscila.ferreira@lit.inpe.br

Dr. Ricardo Sutério (LIT/INPE, Orientador)
E-mail: suterio@lit.inpe.br

COLABORADORES

Angela Akemi Tatekawa Silva (LIT/INPE)

JULHO de 2013

SUMÁRIO

1. RESUMO DO PLANO INICIAL.....	1
2. RESUMO DAS ETAPAS REALIZADAS.....	2
2.1. Diferença entre força Centrípeta e Centrífuga.....	2
2.2. O que é Acelerômetro Linear.....	4
3. DETALHAMENTO DOS PROCESSOS REALIZADOS.....	5
3.1. Método de Calibração.....	8
3.2. Condições Ambientais.....	8
3.3. Equipamentos e Materiais Utilizados.....	8
3.4. Atividades Preliminares.....	9
3.5. Preparação do objeto a ser calibrado.....	9
3.6. Sistema de Calibração.....	9
3.7. Execução da Calibração.....	9
4. CÁLCULO DE INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO.....	9
4.1. Avaliação das Incertezas Padrão Tipo A.....	10
4.2. Avaliação das Incertezas Padrão Tipo B.....	12
4.3. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada.....	13
4.4. Cálculo da Incerteza Padrão Expandida.....	13
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	14
6. CONCLUSÃO.....	15
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16

FIGURAS

Figura 2.1 – direção e sentido dos vetores aceleração centrípeta e velocidade.....	2
Figura 2.2 – direção e sentido dos vetores força centrípeta e velocidade.....	3
Figura 2.3 – direção e sentido dos vetores força centrífuga e velocidade.....	3
Figura 2.4 – direção e sentido dos vetores força centrípeta e força centrífuga.....	4
Figura 2.5 – acelerômetro linear, modelo Shinkoh.....	4
Figura 2.6 – acelerômetro linear, modelo Schaevitz.....	5
Figura 3 – sistema de calibração.....	6
Figura 3.1 – desenho da mesa da máquina de balanceamento.....	7
Figura 3.2 – mesa da máquina de balanceamento.....	8

TABELA

Tabela 4.1 – Fontes de Incerteza.....	9
---------------------------------------	---

1. RESUMO DO PLANO INICIAL

O Laboratório de Integração e Testes (LIT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é composto por laboratórios que fornecem apoio às atividades de montagem, integração e testes de satélites e também equipamentos de indústrias privadas.

O LIT possui o Laboratório de Metrologia Mecânica, o qual é responsável pelas calibrações de sensores e equipamentos mecânicos e pode ser subdividido nas áreas de Força e Torque, Massa, Dimensional e Movimento Rotacional. A Metrologia Mecânica busca constantemente aprimorar seu padrão de excelência quanto às atividades de montagem, integração e testes de satélites, de modo a atender a crescente demanda por serviços especializados decorrentes dos programas espaciais e também das indústrias e para tanto foi proposto este trabalho de iniciação científica na área de Movimento Rotacional.

Os objetivos deste trabalho foram divididos em duas etapas: Primeiramente, realizar o estudo da calibração de acelerômetros lineares pelo método da força centrípeta, a qual atua em um corpo obrigando-o a descrever uma trajetória circular, isto é, atua sobre o corpo atraindo-o na direção do centro, elaborar o procedimento de operação do sistema de calibração e o procedimento de calibração de acelerômetros lineares, desenvolver e validar um procedimento de cálculo para determinar as constantes de calibração e as incertezas de medição em toda a faixa de calibração. Segundo, realizar experimentos práticos para validar os procedimentos e cálculos desenvolvidos.

Todo o plano de trabalho desenvolvido foi realizado e finalizado, resumindo-se a seguir: (1) revisão bibliográfica, com intuito de adquirir embasamento teórico dos tópicos de metrologia, preparação e execução de calibração de acelerômetros lineares, (2) realização do trabalho de pesquisa, para avaliação e desenvolvimento da técnica de medição, análise e apresentação de resultados, (3) elaboração da documentação necessária para operação e configuração da técnica de medição e cálculo de incertezas, e (4) realização dos experimentos práticos para validação da técnica de calibração.

2. RESUMO DAS ETAPAS REALIZADAS

Na primeira fase do projeto foram realizados estudos sobre força centrípeta, e acelerômetros lineares. A bolsista teve participação na preparação e execução de calibração de acelerômetros lineares e na elaboração de relatórios técnicos de calibração para sedimentar os fundamentos teóricos dos ensaios na área de Movimento Rotacional.

Foi realizado o trabalho de pesquisa através da elaboração do procedimento de operação do sistema e do procedimento de calibração de acelerômetros lineares pelo método da força centrípeta.

2.1. Diferença entre força centrípeta e força centrífuga

Quando um corpo de massa m efetua um MCU (Movimento Circular Uniforme), está submetido a uma aceleração que é responsável pela mudança da direção do seu movimento. Esta aceleração é chamada de aceleração centrípeta e é perpendicular ao vetor velocidade \vec{v} .

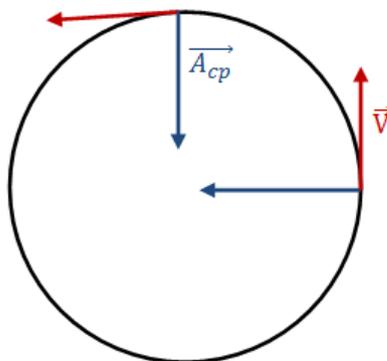


Figura 2.1 – direção e sentido dos vetores aceleração centrípeta e velocidade.

Se existe aceleração há uma força resultante, na mesma direção e sentido desta aceleração, perpendicular à velocidade e direcionada ao centro da circunferência. Esta força resultante é chamada de força centrípeta. Sem a presença desta força, nenhum corpo poderia realizar o movimento circular.

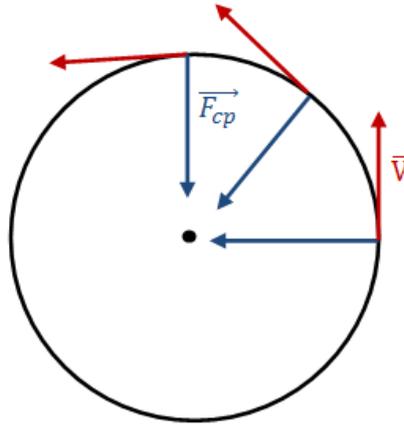


Figura 2.2 – direção e sentido dos vetores força centrípeta e velocidade.

A força centrífuga é uma força inercial ou fictícia, que atua nos corpos em rotação tendendo a lançá-los para fora do sistema.

Um exemplo seria quando uma pessoa entra em uma curva com o carro, essa pessoa acompanha o movimento do carro, ou seja, sente-se atirado para fora da curva. Esta seria considerada a força centrífuga, porém a força centrífuga só é válida para a pessoa que está em movimento no carro, ou seja não-inercial.

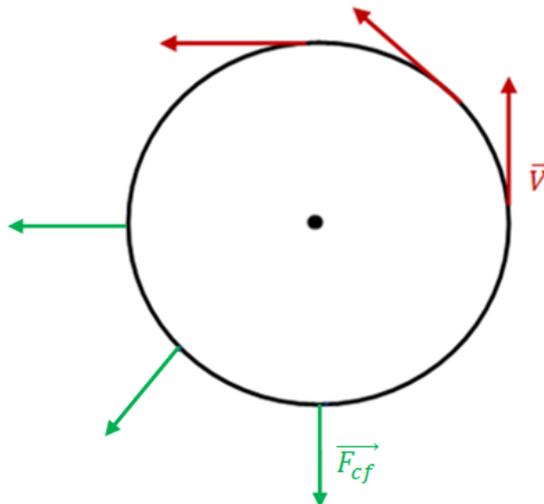


Figura 2.3 – direção e sentido dos vetores força centrífuga e velocidade.

A figura 2.4 mostra uma comparação entre a força centrífuga e a centrípeta.

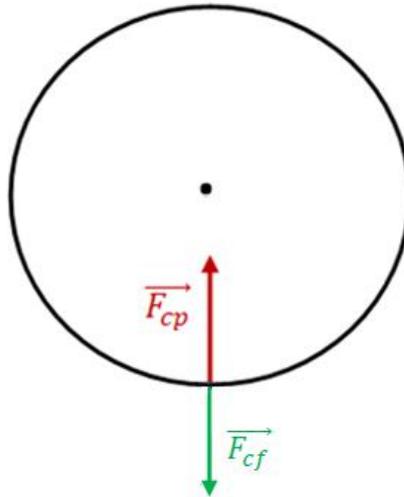


Figura 2.4 – direção e sentido dos vetores força centrípeta e força centrífuga.

2.2. O que é Acelerômetro Linear?

O acelerômetro linear é um transdutor que converte movimento mecânico (aceleração) em uma grandeza elétrica. Na calibração aplica-se uma determinada aceleração e se tem como resposta tensão e/ou corrente.

No Laboratório de Metrologia Mecânica do INPE/LIT foram calibrados 3 modelos de acelerômetros lineares, Systron Donner, Schaevitz e Shinkoh. As figuras 2.5 e 2.6 apresentam alguns modelos.

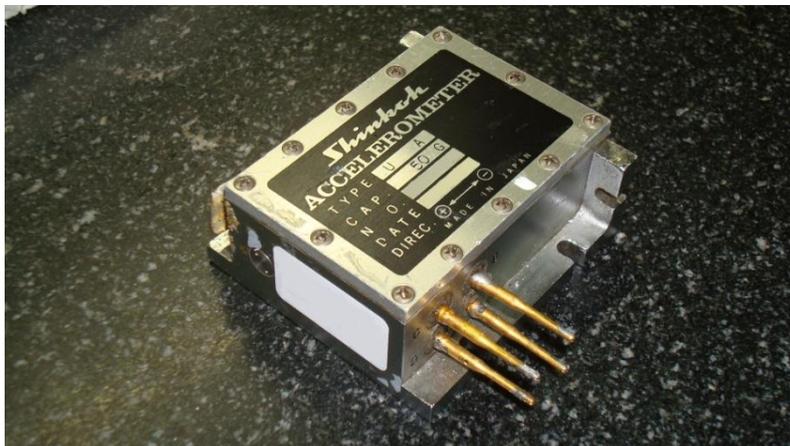


Figura 2.5 – acelerômetro linear, modelo Shinkoh.

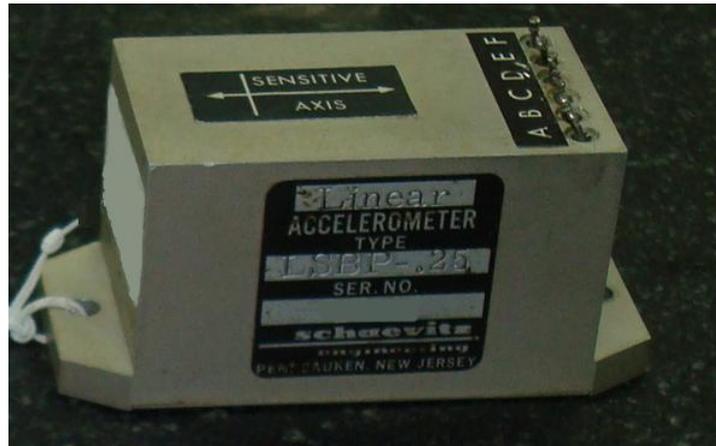


Figura 2.6 – acelerômetro linear, modelo Schaevitz.

3. DETALHAMENTO DOS PROCESSOS REALIZADOS

Na primeira fase do projeto, com os estudos bibliográficos realizados, foi possível iniciar a elaboração do procedimento de operação do sistema e o procedimento de calibração de acelerômetros lineares.

O sistema de calibração Figura 3 consiste em uma máquina de balanceamento, frequencímetro, multímetros digitais e microcomputador. A mesa da máquina de balanceamento é provida de um sistema de anéis rotativos cuja função é a de efetuar a interconexão elétrica entre o acelerômetro fixado na mesa (parte rotativa) e os equipamentos de medida posicionados próximos à máquina de balanceamento.

A calibração é realizada em uma mesa rotativa com eixo vertical, figuras 3.1 e 3.2, sobre a qual é fixado um adaptador de braços simétricos, tendo de um lado uma placa para fixação do objeto sob calibração e de outro um fuso para colocação de massas para balanceamento do braço, caso o acelerômetro possua uma massa maior que 0,2 Kg.

Através deste equipamento aplica-se uma aceleração constante conhecida ao objeto sob calibração. A aceleração é dada por:

$$a = \omega^2 r = (2\pi f)^2 r = 4\pi^2 f^2 r$$

onde,

ω é a velocidade angular;

r é a distância do eixo de rotação ao centro de gravidade (CG) do elemento de massa do acelerômetro em metros;

f é a frequência², em hertz.

Para os acelerômetros lineares a saída elétrica (tensão e/ou corrente), é medida através de um multímetro. A sensibilidade, S , do acelerômetro, dada pela razão entre a saída elétrica e a entrada mecânica aplicada ao longo de um eixo específico, pode então ser calculada através da seguinte fórmula:

$$S = \frac{V}{a} = \frac{V}{4\pi^2 f^2 r}$$

onde,

V é a saída do acelerômetro, em volts;

a é a aceleração aplicada no acelerômetro.



Figura 3 – Sistema de calibração.

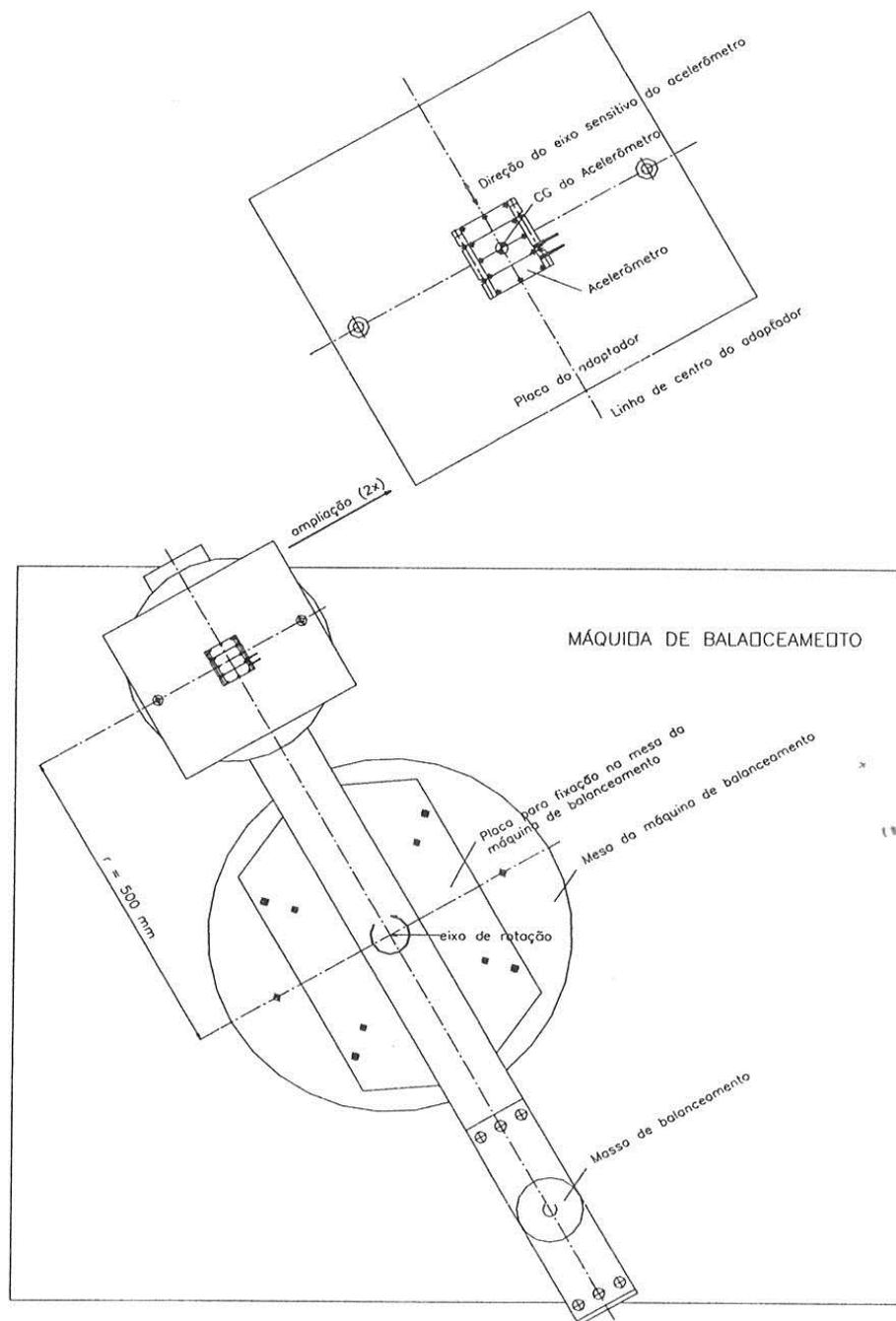


Figura 3.1 – desenho da mesa da máquina de balanceamento

Obs: O eixo sensível do acelerômetro deve coincidir com a linha de centro do adaptador



Figura 3.2 - mesa da máquina de balanceamento

O procedimento define os equipamentos, os métodos e a sequência de operações necessárias para a calibração de Acelerômetros Lineares, além de abordar alguns dos seguintes tópicos:

3.1. Método de Calibração:

Descreve os equipamentos utilizados, como é obtido o valor da aceleração e da sensibilidade do acelerômetro.

3.2. Condições Ambientais:

A calibração deve ser realizada em laboratório com temperatura e umidade controladas.

3.3. Equipamentos e Materiais Utilizados:

Cita todos os equipamentos e Materiais necessários para a realização da calibração.

3.4. Atividades Preliminares:

Antes do início da calibração devem ser realizados alguns procedimentos tais como: estabilização térmica, limpeza adequada dos equipamentos, montagem mecânica do objeto.

3.5. Preparação do objeto a ser calibrado:

Descreve como devem ser ligados os equipamentos que serão utilizados na calibração, as conexões necessárias e ajuste da fonte de alimentação.

3.6. Sistema de Calibração:

Descreve os equipamentos que compõem o sistema e a composição elétrica da mesa da máquina de balanceamento.

3.7. Execução da Calibração:

Descreve passo a passo o procedimento para a realização da calibração, como ligar a máquina de balanceamento, o que deve ser realizado ao decorrer da calibração, o número de leituras para cada ponto calibrado.

4. CÁLCULO DE INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO

Para calcular o valor da incerteza da calibração são consideradas todas as fontes contribuintes tais como, o desvio padrão, especificação técnica e certificado de calibração dos equipamentos utilizados na realização da calibração.

Na tabela a seguir estão listadas as fontes de incerteza consideradas na calibração do acelerômetro linear, modelo shinkoh.

Tabela 4.1- Fontes de Incerteza

i	Medidas	Componente de Incerteza	Fonte de Incerteza	Tipo	Distribuição de Probabilidade
1	Medidas de Tensão na Entrada	$u(x_1)$	Desvio Padrão da Tensão de entrada	A	Normal
2		$u(x_2)$	Especificação Técnica do Multímetro na Tensão de entrada	B	Retangular
3	Medidas de Tensão na Saída	$u(x_3)$	Desvio Padrão Tensão de saída	A	Normal
4		$u(x_4)$	Especificação Técnica do Multímetro na Tensão de saída	B	Retangular
5	Medidas de Frequência na Entrada	$u(x_5)$	Especificação Técnica do Multímetro para medição da frequência	B	Retangular
6		$u(x_6)$	Desvio Padrão das medidas de Frequência	A	Normal
7	Medida do raio do sistema	$u(x_7)$	Distância do centro ao acelerômetro	B	Retangular

4.1. Avaliação das Incertezas Padrão Tipo A

(a) Calcular a estimativa ou média aritmética dos valores individuais observados nos multímetros, x_1, x_3 :

$$x_m = \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_n)}{n} \quad [V, A]$$

onde,

n = número de medidas

m = 1 e 3

- (b) Calcular o desvio padrão experimental da média, $s(x_m)$ e a incerteza padrão associada à estimativa de entrada, $u(x_m)$ (Avaliação Tipo A) :

$$s(x_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - x_m)^2}{n-1}} \quad [\text{V, A}]$$

$$u(x_m) = \frac{\frac{s(x_m)}{\sqrt{n}} \times 100}{x_m} \quad [\%]$$

onde $m = 1$ e 3

- (c) Calcular a estimativa ou média aritmética dos valores individuais observados no frequencímetro, x_6 :

$$x_6 = \frac{(L_1 + L_2 + \dots + L_n)}{n} \quad [\text{Hz}]$$

- (d) Calcular o desvio padrão experimental da média, $s(x_6)$ e a incerteza padrão associada à estimativa de entrada, $u(x_6)$ (Avaliação Tipo A):

$$s(x_6) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - x_6)^2}{n-1}} \quad [\text{Hz}]$$

$$u(x_6) = \frac{\frac{s(x_6)}{\sqrt{n}} \times 100}{x_6} \quad [\%]$$

4.2. Avaliação das Incertezas Padrão Tipo B

- (a) Calcular a incerteza padrão associada à especificação técnica do multímetro na tensão de saída, tensão de entrada, $u(x_2)$ e $u(x_4)$:

$$u(x_m) = \frac{U(x_m)}{\sqrt{3}} \quad [\text{V}]$$

$$u(x_m) = \frac{\frac{U(x_m)}{\sqrt{3}} \times 100}{x_m} \quad (\%)$$

onde $m = 2$ e 4

- (b) Calcular a incerteza padrão associada à associada à especificação técnica do frequencímetro na frequência de entrada, $u(x_5)$:

$$u(x_5) = \frac{U(x_5)}{\sqrt{3}} \quad [\text{Hz}]$$

$$u(x_5) = \frac{\frac{U(x_5)}{\sqrt{3}} \times 100}{x_5} \quad [\%]$$

- (c) Calcular a incerteza padrão associada ao erro de posicionamento do acelerômetro em relação à distância ao centro da máquina, $u(x_7)$:

$$u(x_7) = \frac{U(x_7)}{\sqrt{3}} \quad [\%]$$

onde $U(x_7) = 0,1\%$. Considera-se um erro máximo de 0,5 mm (raio = 500 mm) e uma distribuição retangular.

4.3. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada

A incerteza padrão combinada, u_C , é a raiz quadrada positiva da variância combinada u_C^2 , que é dada por:

$$u_C^2(S) = u^2(x_1) + u^2(x_2) + u^2(x_3) + \dots + u^2(x_{13})$$

4.4. Cálculo da Incerteza Padrão Expandida

(a) Calcular o grau de liberdade efetivo, v_{eff} :

$$v_{eff} = \frac{u_C^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

onde v_i são os graus de liberdade.

(b) Obter o fator de abrangência, k , para um nível de confiança de 95,45%, através do *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*;

(c) Calcular a Incerteza Expandida de Medição, U :

$$U = u_C * k$$

(d) Arredondar o valor numérico do valor indicado (para cada ponto calibrado) para o último algarismo significativo do valor da incerteza expandida atribuída a este resultado.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Foram realizadas calibrações para validação do sistema e os resultados da calibração de um acelerômetro, modelo shinkoh, encontram a seguir.

Posição / Direção do Acelerômetro	Aceleração Aplicada		Tensão de Alimentação V_{in+} [V]	Tensão Medida na Saída V_{out} [mV]	Sensibilidade Medida $S = V_{out} / Acc$ [mV/g]	Incerteza da Calibração U [%]	K
	Acc [g]	[m/s^2]					
-	14,98	146,9	1,207	-0,5259	-35,10	0,96	2,0
	24,94	244,6	1,206	-0,9946	-39,87	0,55	2,0
	45,09	442,2	1,205	-1,9317	-42,84	0,35	2,0
	14,94	146,5	1,994	-0,8726	-58,42	0,61	2,0
	24,95	244,6	1,992	-1,6449	-65,93	0,38	2,0
	45,13	442,5	1,990	-3,2008	-70,93	0,28	2,0
	15,00	147,1	3,626	-1,6153	-107,66	0,38	2,0
	24,93	244,5	3,625	-3,0077	-120,64	0,29	2,0
	44,92	440,6	3,624	-5,8113	-129,36	0,25	2,0
+	15,03	147,4	1,239	0,8912	59,28	0,60	2,0
	24,95	244,7	1,238	1,3589	54,46	0,43	2,0
	45,08	442,1	1,238	2,3057	51,14	0,32	2,0
	15,00	147,1	2,025	1,4512	96,73	0,41	2,0
	24,93	244,5	2,023	2,2161	88,89	0,32	2,0
	45,06	441,8	2,022	3,7583	83,41	0,27	2,0
	15,00	147,1	3,654	2,5987	173,23	0,30	2,0
	24,93	244,5	3,654	3,9813	159,71	0,26	2,0
	45,09	442,2	3,653	6,7741	150,22	0,24	2,0

6. CONCLUSÃO

Com a realização desse projeto de iniciação científica o Laboratório de Metrologia Mecânica do INPE/LIT está capacitado para fazer a calibração dos acelerômetros lineares.

Todas as etapas propostas no plano de trabalho foram realizadas de acordo com o cronograma. O procedimento de operação do sistema de calibração e o procedimento de calibração de acelerômetros lineares elaborados, assim como o procedimento de cálculo para determinar as constantes de calibração e as incertezas de medição em toda a faixa de calibração, foram validados com a realização de calibrações.

Com isso é possível incrementar a confiabilidade operacional e metrológica dos dados adquiridos na calibração, melhorar a produtividade e aumentar a confiabilidade dos serviços prestados pelo Laboratório de Metrologia Mecânica do INPE/LIT.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, A. N. **Avaliação metrológica de um sistema de calibração de acelerômetros por choque mecânico**. 2010. 104 p. Dissertação de Mestrado (em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos. 2010.

EISBERG, R. M; LERNER, L. S. **Física: fundamentos e aplicações**. Trad. Ivan José Albuquerque; Rev. Tec. Paulo Roberto Motejunas, Olivério Delfin Dias Soares. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982.

ISO. **ISO 16063-1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 1: Basic concepts**. Switzerland: International Organization for Standardization, Oct. 1998.

ISO. **ISO 5347, Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups – Part 7: Primary calibration by centrifuge**. Switzerland: International Organization for Standardization, Dec. 1993.

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri, SP: Manole, 2008.

LINK, W. **Tópicos avançados da metrologia mecânica: confiabilidade metrológica e suas aplicações na metrologia**. [s.l.]: [s.n.], 2000.

_____. **Metrologia mecânica: expressão da incerteza de medição**. [s.l.]: [s.n.], 1997.
SUTÉRIO, R. **Cálculo de incerteza de medições**. São José dos Campos: LIT/INPE, 02-03 jun, 2011. (Apostila).90 p.