



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



IMPLANTAÇÃO DE MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MICROFONES ACÚSTICOS

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

Leandro Lessa Cândido Nascimento (UNIP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: leandro.lessa@lit.inpe.br

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

COLABORADORES

Eng° Alberto de Paula Silva (LIT/INPE)

Eng° Rodrigo dos Santos Nascimento (LIT/INPE)

Julho de 2012

RESUMO

Este projeto foi iniciado em agosto de 2010 tendo como objetivo implantar um método de calibração de microfones no Laboratório de Integração e Testes (LIT). O LIT tem como sua principal atividade a integração e testes de satélites artificiais. Os satélites são testados em condições bem parecidas de vibração, pressão e temperatura, com as condições de lançamento e de órbita em que vão atuar. Um desses testes é o teste acústico, realizado em uma câmara para medir o nível de ruídos causado pela vibração sonora. Desta forma surgiu a necessidade de implantar um sistema para calibrar os diversos microfones que são utilizados nos referidos testes.

Um sistema de calibração de microfones foi especificado e adquirido. Basicamente, consiste de um microcomputador, uma câmara que contém um pré-amplificador, um atuador eletrostático e também um *pistonfone*, utilizado para fazer a comparação da sensibilidade de um microfone padrão e um microfone de trabalho. Os dados adquiridos nas medições são enviados para um software, onde os resultados são tratados e armazenados, com possibilidade de se gerar o certificado da calibração pré-configurado.

Todas as etapas do trabalho foram concluídas e são descritas a seguir: (1) inicialmente foi elaborada toda a especificação técnica e aquisição do Sistema de Calibração, (2) foi realizado o estudo dos fenômenos elétricos e mecânicos envolvidos, características do microfone padrão de Laboratório, o estudo de documentos referentes ao assunto, instalação, configuração do sistema no Laboratório respeitando as condições especificadas pelo fabricante e pela norma que regula a atividade, além de treinamentos específicos para se conhecer toda a estrutura e a organização do Laboratório, (3) treinamento da técnica de calibração de microfones e calibradores acústicos e realização do trabalho de pesquisa, desenvolvimento da técnica de calibração, análise e apresentação de resultados, (4) elaboração de toda a documentação necessária para operação e configuração da técnica de medição, procedimento e cálculo de incertezas de calibração.

SÚMARIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. MICROFONES	5
2.1. Estrutura do microfone	5
2.2. Especificação do microfone	5
2.3. Sensibilidade do microfone.....	7
2.4. Nível de sensibilidade do microfone	7
3. CALIBRAÇÃO	8
3.1. Sistema de calibração.....	8
3.2. Objetos utilizados	8
3.2.1. <i>Pistonfone</i>	8
3.2.2. Atuador eletrostático.....	9
3.3. Procedimento de calibração de microfones	9
3.4. Certificados	11
3.5. Cálculo de incerteza.....	11
3.5.1. Contribuições de incerteza do microfone Padrão	11
3.5.2. Contribuição de incerteza do <i>Pistonfone</i>	12
3.5.3. Contribuição de incerteza do microfone sob calibração.....	12
4. CONCLUSÃO	13

1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Integração e Testes (LIT) tem como principal função a integração e testes de satélites artificiais. Na realização de teste em satélites devem ser observadas todas as condições que o satélite suporta durante o seu lançamento e onde atua. O LIT realiza vários testes em satélites entre eles o teste acústico. O teste acústico é realizado para saber como o satélite se comporta ao receber vibrações causadas por ruídos sonoros no momento de seu lançamento ao espaço.

O teste é realizado em uma câmara reverberante em área limpa de classe 100.000 localizada na área de teste do LIT. Na câmara é inserido o satélite e utilizado o nitrogênio para gerar som através de um dispositivo mecânico semelhante a uma corneta localizada na parte superior da câmara. Dentro da câmara, ao redor do satélite, são instalados microfones que medem o nível de intensidade sonora e acelerômetros no satélite com o objetivo de avaliar o seu comportamento dinâmico em função da frequência.

Para fornecer suporte aos diversos testes realizados, o LIT é dotado de diversos laboratórios, o Laboratório de Metrologia Física é o responsável pela calibração de sensores nas áreas de umidade, temperatura, pressão (especificamente vácuo e barômetria), vibração e recentemente acústica.

Para atender a necessidade da nova área implantada, iniciou-se um projeto com o objetivo de implantar no Laboratório de Metrologia Física a área de Acústica responsável pela calibração dos sensores e medidores utilizados em testes acústicos. O projeto se desenvolveu desde a especificação técnica do sistema de calibração, implantação física, documentação e treinamento para qualificação humana.

O sistema escolhido é um equipamento completo tipo “turnkey”, capaz de determinar a sensibilidade e traçar a curva de resposta dos sensores / medidores, além de emitir o certificado de calibração de forma automatizada.

2. MICROFONES

2.1. Estrutura do microfone

Os microfones são transdutores que transformam as vibrações mecânicas causadas por ruídos sonoros em sinal elétrico para serem mensurados. Os microfones utilizados em teste aeroespaciais são conhecidos como microfones condensadores. O microfone condensador funciona como um capacitor que recebe carga e descargas elétricas e necessita de uma tensão de polarização.

A estrutura do sensor é formada de uma grade de proteção que tem como função proteger o diafragma. O diafragma é uma película fina e flexível que recebe as vibrações sonoras, logo abaixo a uma placa, as duas partes formam um capacitor como mostra a figura abaixo:



Figura 1- Figura esquemática do microfone padrão

2.2. Especificação do microfone

Os campos sonoros são as regiões afetadas pelas vibrações sonoras, sendo que para cada tipo de campo existe um microfone específico. Os tipos de campos sonoros são: campo livre campo difuso e campo de pressão.

O campo livre ocorre quando a fonte de som se irradia em várias direções de uma única origem que apontam diretamente para o diafragma do microfone operando em uma área onde são minimizadas as reflexões do som no ambiente

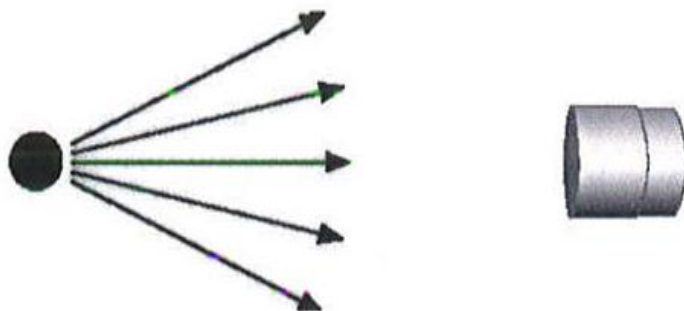


Figura 2- Microfone de Campo Livre

O microfone de campo de pressão é construído para medir a pressão do som exercida na frente do diafragma, obtendo a mesma magnitude e fase em qualquer posição do campo sonoro. Este tipo de campo sonoro é geralmente encontrado em uma cavidade, que é menor quando comparado ao comprimento de onda e a fonte sonora proveniente de uma única fonte sonora.

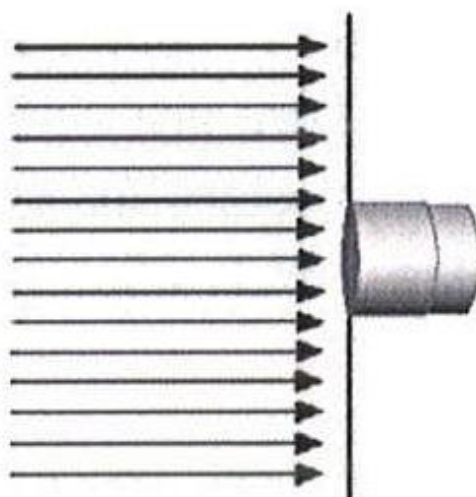


Figura3-Microfone de campo de pressão

O campo difuso é um campo onde o microfone é inserido e recebe ondas sonoras de várias direções com múltiplas fontes e múltiplas reflexões. Ele possui correções de curvas em diferentes ângulos de incidência.

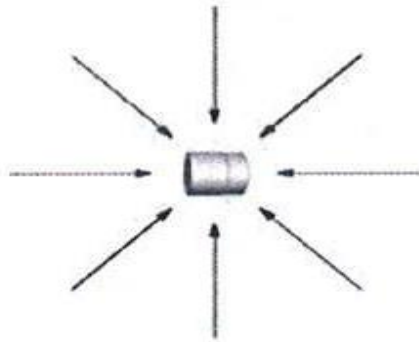


Figura 4-Microfone de campo difuso

2.3. Sensibilidade do microfone

O microfone condensador transforma a pressão do som exercida no diafragma em tensão elétrica (sensibilidade), descrita na seguinte fórmula:

$$S = \frac{mV}{Pa}$$

Onde:

S	Sensibilidade do microfone (mV/Pa)
mV	Tensão em milivolts (10^{-3} V)
Pa	Pressão em Pascal (N/m ²)

2.4. Nível de sensibilidade do microfone

O nível de sensibilidade de um microfone é obtido multiplicando vinte vezes logaritmo da razão entre o modulo da sensibilidade do microfone com uma sensibilidade de referência de 1 V/Pa.

$$Nsens = 20 \log \left(\frac{Sr}{S} \right)$$

Onde:

Nsens	Nível de sensibilidade em decibéis (dB)
Sr	Sensibilidade de referência Volt por Pascal (1 V/Pa)
S	Sensibilidade medida milivolts por Pascal (10^{-3} V /Pa)

3. CALIBRAÇÃO

3.1. Sistema de calibração

O sistema adquirido calibra microfones, microfones com pré-amplificador, *pistonfone* e faz teste de conformidade de pré-amplificadores. Ele é composto de um gabinete eletrônico e uma câmara de isolamento de som. O controle durante a calibração é realizado por um software que realiza o cálculo de incerteza e gera o certificado com as curva de calibração.



Figura-5 Sistema de calibração

3.2. Objetos utilizados

3.2.1. *Pistonfone*

O *pistonfone* é utilizado para comparação da sensibilidade dos microfones através de um volume de acoplamento fechado para gerar pressão de referência sobre o diafragma do microfone com frequência de 250 Hz.



Figura-6 Pistonfone

3.2.2. Atuador eletrostático

O atuador eletrostático é um dispositivo para a determinação da resposta em frequência do microfone. Ele é constituído de uma placa, condutora de eletricidade, posicionada próxima ao diafragma do microfone. Variando-se a tensão aplicada entre o atuador e o diafragma produz-se uma força eletrostática distribuída sobre a superfície do diafragma.



Figura-7 Atuador Eletrostático

3.3. Procedimento de calibração de microfones

O sistema de acústica é dotado de dois microfones de referência, sendo microfone padrão de trabalho e microfone padrão de referência. Antes do início da calibração os dois padrões são comparados para verificar o desvio existente entre eles, após a

verificação é realizada a calibração do microfone sob teste utilizando o microfone padrão de trabalho.

O sistema mede a sensibilidade do microfone sob teste, através da comparação com o microfone padrão de trabalho realizado com a utilização do *pistonfone*. Com o valor da sensibilidade do microfone sob teste realiza-se a varredura de frequência utilizando o atuador eletrostático, que aplica uma tensão de polarização sobre o diafragma do microfone variando a frequência.



Figura- 8 (a) Comparação da sensibilidade do microfone utilizando *pistonfone*
(b) Varredura de frequência utilizando atuador eletrostático

Com os dados colhidos o sistema gera um gráfico da resposta em frequência do microfone em Hertz pelo ganho em decibéis. As linhas representadas são a resposta do microfone em campo de pressão (linha azul), e correção para microfones de campo livre (linha vermelha).

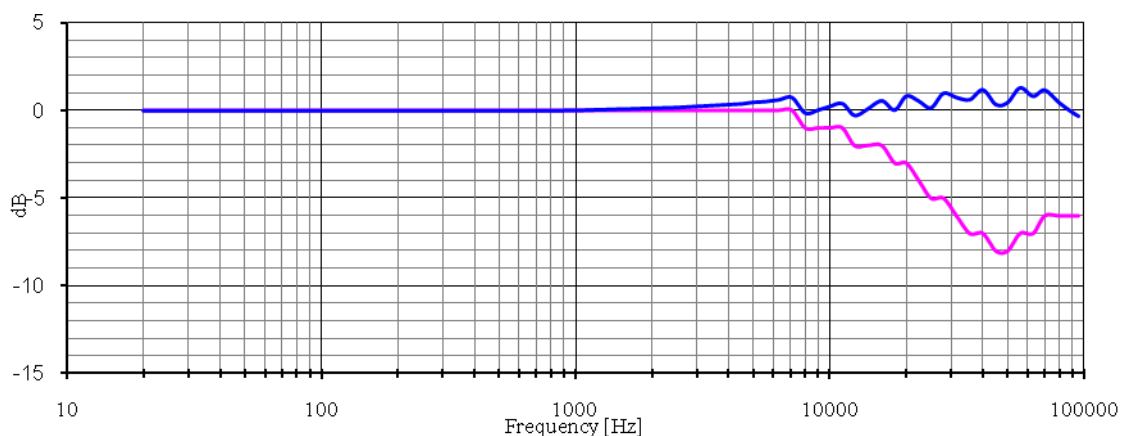


Figura- 9 Gráfico de calibração de microfone em campo livre

3.4. Certificados

O certificado é gerado pelo sistema de maneira automatizada utilizando o programa exel. No certificado é evidenciada a sensibilidade do microfone em duas frequências de referência 250 Hz e 1000 Hz, condições ambientais presentes durante a calibração e técnico responsável.

3.5. Cálculo de incerteza

O cálculo da incerteza de calibração é realizado de forma automatizada pelo sistema de calibração utilizando planilha de cálculo onde são inseridas as contribuições de incerteza do microfone padrão, *pistonfone* e microfone sob teste, que são as influências exercidas por cada objeto utilizado. As informações são retiradas do manual do sistema, data sheets dos objetos utilizados, certificados de calibração etc.

<i>x_i</i>	Componentes de influência	Valor de influência	Faixa de influência	Componente de incerteza <i>u_i</i> [dB]	Coefficiente de probabilidade <i>k_i</i>	Incerteza relativa <i>w_i</i> [dB]	Comentários	Grau de Liberdade <i>v_i</i>
Influência do microfone de referência 40AG - G.R.A.S. na calibração do pistonphone 42AA - G.R.A.S.								
<i>x₁</i>	Sensibilidade do microfone de referência			0.23	2	0.115	Certificado DIMCI 0435/2012 (Média das Incertezas)	inf
<i>x₂</i>	Temperatura no microfone	0.002 dB/°C	4 °C	0.008	1.732050808	0.004618802	Especificação 40AG - G.R.A.S.	inf
<i>x₃</i>	Estabilidade do microfone			0.035	1.732050808	0.020207259	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4)	inf
<i>x₄</i>	Umidade no microfone			0.1	1.732050808	0.057735027	Especificação 40AG - G.R.A.S.	inf
<i>x₅</i>	Pressão estática no microfone	0.008 dB/kPa	0.6 kPa	0.0048	1.732050808	0.002771281	Especificação 40AG - G.R.A.S.	inf
<i>x₆</i>	Linearidade do microfone			0.0039	1.732050808	0.002251666	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 1	inf
<i>x₇</i>	Inserção de tensão			0.003	1.732050808	0.001732051	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 4	inf
<i>x₈</i>	Tensão de polarização de 200 V			0	1.732050808	0	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 2	inf
<i>x₉</i>	Aleatória do Tipo A			0.029	1	0.029	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 3	4
Incerteza (RSS)						0.1335842	0.267168486	1800
Influência do Pistonphone 42AA - G.R.A.S. (influência da pressão sonora de referência - Uncert)								
<i>x₁₀</i>	Verificação do Sistema			0.133584243	1	0.133584243	Contribuição do microfone	1800
<i>x₁₁</i>	Calibração do pistonphone			0.07	2	0.035	Certificado DIMCI 0436/2012	inf
<i>x₁₂</i>	Estabilidade do pistonphone	0.2 dB/ano	1 dia	0.000547945	1.732050808	0.000316356	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4)	inf
<i>x₁₃</i>	Umidade no pistonphone	0.008 dB/%	10 %	0.08	1.732050808	0.046188022	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4)	inf
<i>x₁₄</i>	Pressão estática no pistonphone	0.01 dB/kPa	0.6 kPa	0.006	1.732050808	0.003464102	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4)	inf
<i>x₁₅</i>	Temperatura no pistonphone	0.01 dB/°C	4 °C	0.04	1.732050808	0.023094011	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4)	inf
Incerteza de pressão sonora (RSS)						0.1474738	0.294947567	2673
Influência do objeto sob calibração (DUT)								
<i>x₁₆</i>	Verificação do Sistema			0.147473783	1	0.147473783	Contribuição do conjunto microfone / pistonphone	2673
<i>x₁₇</i>	Inserção de tensão			0.003	1.732050808	0.001732051	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 4	inf
<i>x₁₈</i>	Tensão de polarização de 200 V			0	1.732050808	0	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 2	inf
<i>x₁₉</i>	Aleatória do Tipo A			0.029	1	0.029	Manual do Fabricante (capítulo 4 pag 4) - Nota 3	4
Incerteza do DUT (RSS)						0.1503081	2.00	1442
Incerteza Expandida (k=2)						0.30	2.00	

Figura- 10 Planilha de calculo de incerteza

3.5.1. Contribuições de incerteza do microfone Padrão

- x1 Sensibilidade do microfone de referência (rastreadibilidade do certificado do INMETRO);
- x2 Temperatura no microfone (especificação do fabricante G.R.A.S. 40AG);
- x3 Estabilidade do microfone (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x4 Umidade no microfone (especificação do fabricante G.R.A.S. 40AG);

- x5 Pressão estática no microfone (especificação do fabricante G.R.A.S. 40AG);
- x6 Linearidade do microfone (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x7 Inserção de tensão (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x8 Tensão de polarização de 200 V (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x9 Aleatória do Tipo A (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C).

3.5.2. Contribuição de incerteza do *Pistonfone*

- x10 Verificação do Sistema (Contribuição de incerteza do microfone Padrão);
- x11 Calibração do *pistonfone* (rastreabilidade do certificado do INMETRO);
- x12 Estabilidade do *pistonfone* (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x13 Umidade no *pistonfone* (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x14 Pressão estática no *pistonfone* (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x15 Temperatura no *pistonfone* (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C).

3.5.3. Contribuição de incerteza do microfone sob calibração

- x16 Verificação do Sistema (Contribuição de incerteza do conjunto microfone / *Pistonfone*);
- x17 Inserção de tensão (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x18 Tensão de polarização de 200 V (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C);
- x19 Aleatória do Tipo A (especificação do fabricante do Sistema TMS 9350C).

4. CONCLUSÃO

Na realização deste trabalho foi possível assimilar os tópicos básicos da instrumentação acústica e a importância desta atividade para o desenvolvimento tecnológico da área espacial brasileira e também para área industrial. Com a implantação parcial do sistema de calibração acústica o Laboratório de Integração e Teste possui capacidade de calibrar parte de seus microfones e oferecer suporte a indústria na área acústica.

O primeiro sistema adquirido já possui seu procedimento de funcionamento e cálculo de incerteza e toda a documentação necessária para acreditação. Para término do projeto de implantação da área de acústica no LIT é necessário implantar o segundo sistema adquirido no fim do ano de 2011, que tem a capacidade de calibrar microfones de alta intensidade sonora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **VIM “Vocabulário de Termos Gerais e Fundamentais e Gerais de Metrologia”, INMETRO, 2009.**
2. **Norma ISO IEC 61094-1 “Especifications for Laboratory Standart Microphones”, 2000**
3. **Norma ISO IEC 61094-5 “Methods for Pressure Calibration of Working Standart Microphones by Comparison” 2001**
4. **Norma ISO IEC 61094-6 “Eletrostatic Actuators for Determination of Frequency Response”, 2004**
5. **TMS “Precision Acoustic Calibration Workstation System Documentation Model 9350C”, The Modal Shop INC., SAM-F028 rev NR, 2011.**
6. **B&K “Microphone Handbook”, Bruel & kjaer, vol 1, 1996**