

## **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 Suterio (LIT/INPE, Orientador)  
E-mail: suterio@lit.inpe.br

#### **COLABORADORES**

Albeto de Paula Silva (LIT/INPE)  
Ângela Akemi Tatekawa Silva (LIT/INPE)

Julho de 2011

**ÍNDICE**

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. PLANO DE TRABALHO.....	4
1.2. ATIVIDADES REALIZADAS.....	5
2. MICROFONES .....	6
2.1. CARACTERÍSTICA DO MICROFONE PADRÃO DE LABORATÓRIO .....	6
2.2. CALIBRAÇÃO DE MICROFONES .....	7
2.3. PISTONFONE.....	8
2.4. ATUADOR ELETROSTÁTICO .....	8
3. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO.....	9
3.1. SOFTWARE.....	10
3.2. PROCEDIMENTO.....	10
4. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15

## Figuras

Figura 1-1: Cronograma de atividades .....	5
Figura 2-1: Microfone padrão de laboratório .....	6
Figura 2-2: Pistonfone .....	8
Figura 3-1: Pagina inicial do software no momento que inicia a calibração.....	10
Figura 3-2: Pistonfone acoplado a um microfone durante calibração .....	11
Figura 3-3: Atuador eletrostático acoplado ao microfone durante calibração.....	11
Figura 3-4: Dados recolhidos durante a calibração. ....	12
Figura 3-5: Gráfico mostra a curva da calibração do microfone .....	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 vai suportar durante o seu lançamento e onde vai atuar. O LIT realiza vários testes em satélites entre eles o teste acústico. O teste acústico é realizado para saber como o satélite vai se comportar ao receber vibrações sonoras causadas por ruídos sonoros no momento de seu lançamento ao espaço.

Este 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 através de nitrogênio gasoso que passa por uma corneta localizada em seu teto, faz com que produza som. Dentro da câmara, ao redor do satélite, são instalados microfones que medem o nível de intensidade sonora. No satélite, são instalados acelerômetros com o objetivo de avaliar o seu comportamento dinâmico em função da frequência.

Dentre os diversos Laboratórios existentes no LIT, 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 dar suporte aos testes acústicos de satélites, foi iniciado um projeto com o objetivo de implantar no Laboratório de Metrologia Física, uma área de acústica responsável pela calibração dos sensores e medidores no teste acústico. O projeto contemplou desde a especificação técnica de um sistema de calibração, implantação física e treinamento para qualificação humana.

O sistema escolhido foi 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.

## **1.1. PLANO DE TRABALHO**

O plano está previsto para um período de 24 meses e carga horária de 16 horas semanais.

### **Revisão Bibliográfica:**

- Adquirir embasamento teórico dos tópicos de metrologia, normalização, qualidade, instrumentação acústica e aquisição de dados das grandezas elétricas e físicas.
- Estudo de bibliografias pertinentes tais como normas técnicas, livros textos etc., visando verificar sua aplicabilidade às atividades do Laboratório.
- Participar na elaboração de procedimentos e relatórios técnicos de calibração para sedimentar os fundamentos teóricos na área de atuação do Laboratório.
- Cursos/Treinamentos da norma ISO/IEC 17025 e cálculo de incertezas
- Participação na preparação e execução de calibração de microfones.

### **Trabalho de Pesquisa:**

- Realizar o trabalho de pesquisa através do desenvolvimento procedimentos de calibração de microfones padrão e de microfones de uso geral pelos métodos da reciprocidade e comparação respectivamente.
- Desenvolver e validar procedimentos de cálculo para determinar as sensibilidades de microfones.
- Validar os métodos através de calibrações de microfones do INPE/LIT.

### **Documentação e Divulgação dos Resultados:**

- Elaborar procedimento de operação do sistema e procedimento de calibração de microfones.
- Divulgar os conhecimentos adquiridos através de publicações técnicas/acadêmicas.
- Treinar os técnicos do Laboratório de Metrologia Física para o uso devido do método.

## 1.2. ATIVIDADES REALIZADAS

Antes do início da bolsa de iniciação científica a equipe do Laboratório de Metrologia elaborou toda a especificação técnica e providenciou a aquisição de um Sistema de Calibração de Microfones e Calibradores Acústicos, objeto de estudo deste projeto de pesquisa e detalhado nos capítulos a seguir.

Nos últimos seis meses foram realizadas as seguintes etapas do trabalho:

- (1) Estudo dos fenômenos elétricos e mecânicos envolvidos,
- (2) Caracterização do microfone padrão do Laboratório,
- (3) Estudo de bibliografias referentes ao assunto,
- (4) Instalação e configuração do Sistema no Laboratório respeitando as condições especificadas do fabricante, além de obtenção de treinamentos operacionais e específicos.

Na Figura 1-1 está apresentada a evolução das atividades realizadas e previstas do projeto.

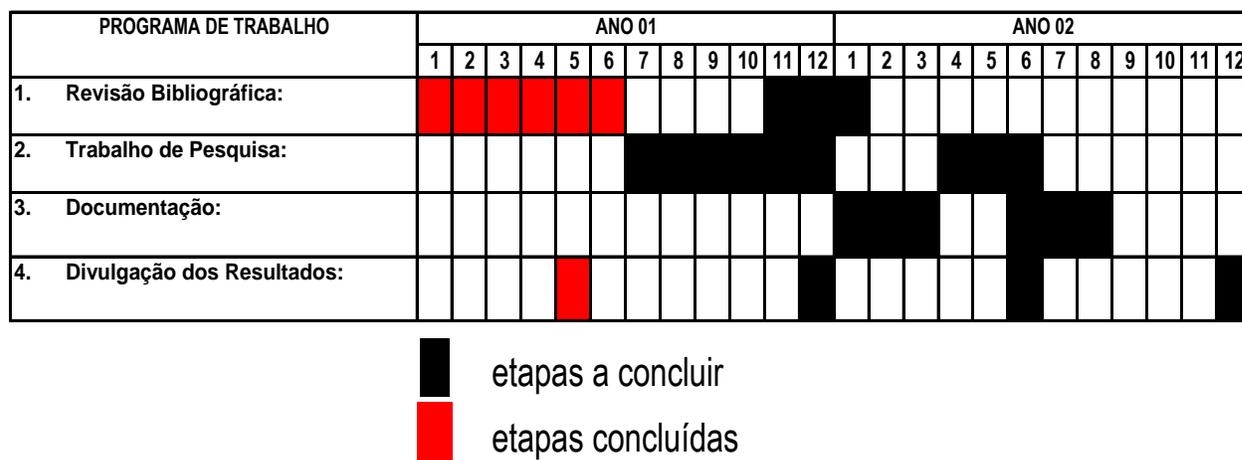


Figura 1-1: Cronograma de atividades

## 2. MICROFONES

O microfone padrão de laboratório é um transdutor que transforma vibrações causadas pelo som em sinais elétricos para serem medidos. Existe uma grande variedade destes sensores que vão desde os usados em nosso cotidiano, até os usados em testes aeroespaciais com satélites e aeronaves. O trabalho dá ênfase ao microfone condensador que é um sensor que funciona através de carga e descarga de um condensador, ele necessita de uma tensão de alimentação ou tensão de polarização. Este sensor tem alto nível de precisão se forem tomados todos os cuidados em sua utilização, uma vez que ele possui partes sensíveis. Uma das partes mais sensíveis é o seu diafragma onde são captadas as vibrações sonoras, esta região é formada por uma película fina e flexível, exatamente nessa região existe uma grade que o protege e pode ser removida durante a calibração.



**Figura 2-1: Microfone padrão de laboratório**

### 2.1. CARACTERÍSTICA DO MICROFONE PADRÃO DE LABORATÓRIO

Microfone padrão de laboratório é descrito por um sistema de características que consiste nas letras LS que faz a referência como sendo o sensor usado em laboratório, logo segue um número que representa a configuração mecânica e uma terceira letra que representa características eletroacústicas. A terceira letra pode ser P ou F que representa microfones em campo de pressão ou em campo livre de sensibilidade.

## 2.2. CALIBRAÇÃO DE MICROFONES

Para calibrar um microfone é necessário conhecer sua sensibilidade. A sensibilidade é o módulo da tensão do microfone pelo módulo da pressão sobre seu diafragma, a unidade usada para expressar é o volt por pascal (V / Pa) e o nível de sensibilidade é obtido através de decibéis (dB).

$$dB = 20 \cdot \text{Log} \frac{S}{S_r}$$

Em que:

$S$  = Sensibilidade medida

$S_r$  = Sensibilidade de referência

A sensibilidade varia com a frequência e condições ambientais, portanto é normalmente registrado com valores de sensibilidade para uma faixa de frequência específica, também pode variar com a natureza do campo em que é submetido.

O campo difuso acontece no momento em que surgem ondas sonoras de igual amplitude em todas as direções, já no campo livre, as ondas se espalham livremente sem a existência de obstáculos. O campo de pressão é caracterizado por uma pressão sonora a qual tem a mesma magnitude e fase em qualquer posição dentro de uma seção do campo sonoro.

Os métodos para calibrar um microfone são o método da reciprocidade e o da comparação. O método da comparação utilizado para realizar a calibração determina a sensibilidade de um microfone, comparando sua resposta elétrica para um campo de som contra a de um microfone previamente calibrado ou de referência. Na comparação sequencial, ou seja, que mede um por vez, é importante garantir que a pressão sonora de excitação e que as condições ambientais no campo sonoro não mudem durante as medições com o microfone em calibração e de referência.

### **2.3. PISTONFONE**

Para comparação da sensibilidade dos microfones é usado o pistonfone que utiliza um volume de acoplamento fechado para gerar pressão de som necessário para a calibração de microfones de medição. O pistonfone é altamente dependente da pressão ambiente e geralmente usados em frequências baixas normalmente 250Hz.



**Figura 2-2: Pistonfone**

### **2.4. ATUADOR ELETROSTÁTICO**

O atuador eletrostático é um dispositivo para a determinação da resposta em frequência do microfone. Ele é constituído de uma placa fixa, 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, que corresponde a pressão eletrostática entre 84 à 104 dB.

### **3. SISTEMA DE CALIBRAÇÃO**

O nome do sistema adquirido foi “modelo 9350C Precision Acoustic Calibration Workstation” de uma empresa americana que realiza a calibração de microfones  $\frac{1}{4}$  ,  $\frac{1}{2}$  e 1 polegada com sensibilidade de (circuito aberto) e microfones com pré-amplificador (circuito fechado) e microfones com uma função de resposta de frequência, ele também fornece calibração e testes de conformidade de pistonfone, alto falantes e pré-amplificadores.

O sistema é formado por um microcomputador, uma câmara que contem um pré-amplificador, atuador eletrostático e também um pistonfone. No microcomputador está o software que realiza respectivamente a calibração, salva os dados e gera o certificado da calibração pré-configurado. Ele funciona em quatro modos diferentes sendo eles: calibração de microfone, microfone e pré-amplificador, teste de conformidade do pré-amplificador e calibração de fonte sonora.

Para a realização de uma calibração alguns fatores devem ser observados como: o ambiente onde o sistema é instalado a pressão também deve ser monitorada, pois o pistonfone é suscetível a mudança de pressão, também não pode estar instalado em ambientes barulhentos ou que possuam um alto grau de vibração para evitar que interfira na calibração.

A câmara de isolamento de som é constituída de madeira com uma porta articulada que oscila para cima permitindo assim que quem esteja operando tenha acesso fácil ao dispositivo sobre teste.

Para alcançar a mais alta precisão de calibração possível o operador deve estar alerta para detectar possíveis erros na calibração. Além disso, deve obter um profundo conhecimento dos princípios de medição, juntamente com conhecimentos gerais sobre acústica e cuidados com a instrumentação especialmente os microfones de referência, sendo um requisito para alcançar calibrações confiáveis.

### 3.1. SOFTWARE

O software é responsável pela aquisição de dados e coletar as informações e enviando para o armazenamento e criando um certificado de calibração.

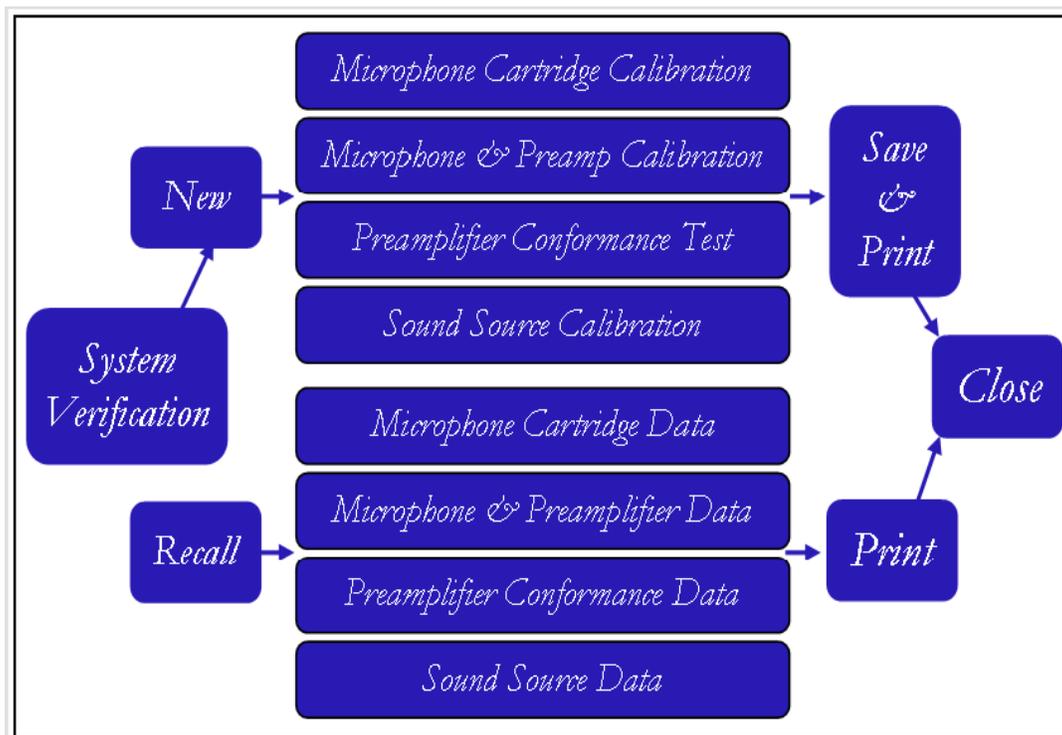


Figura 3-1: Pagina inicial do software no momento que inicia a calibração

A figura acima ilustra a pagina inicial quando o software inicia a calibração, importante observar que ele possui o procedimento que o operador deve seguir para realizar a calibração.

### 3.2. PROCEDIMENTO

Para realizar a calibração inicialmente é necessário determinar a sensibilidade do objeto com a presença da grade de proteção utilizando uma frequência fixa de 250 Hz, pela transferência da calibração de um microfone padrão de referencia pelo método da cavidade pulsante utilizando o pistonfone.



**Figura 3-2: Pistonfone acoplado a um microfone durante calibração**

Em seguida mede a resposta em frequência retirando a grade que protege o diafragma e aplica uma pressão eletrostática em forma de onda senoidal utilizando um atuado eletrostático na faixa de 20 a 12500 Hz.



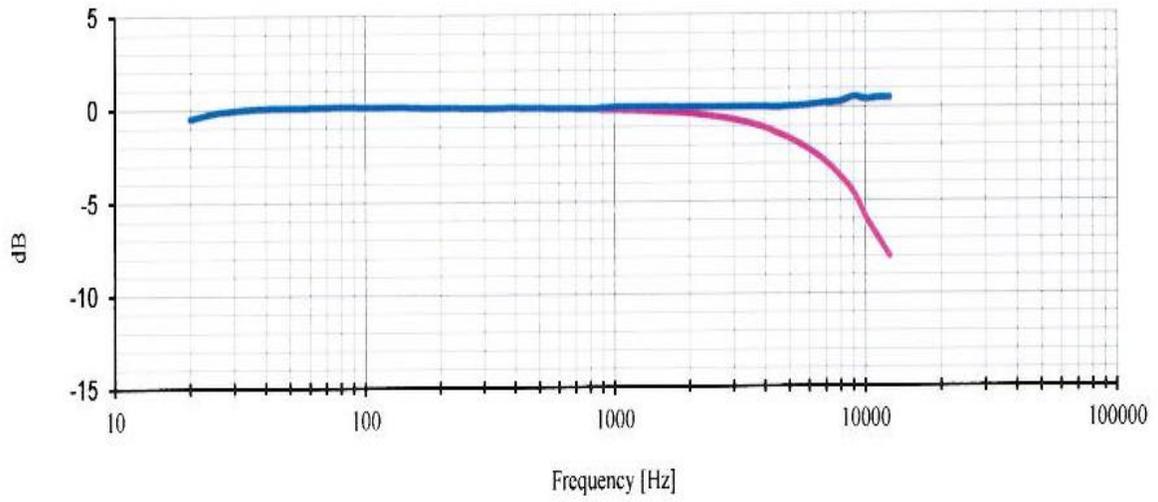
**Figura 3-3: Atuador eletrostático acoplado ao microfone durante calibração**

Na tabela abaixo mostra os dados recolhidos durante a calibração de um microfone com um pré-amplificador.

Frequência Hz	Desvio %	Sensibilidade	
		dB re. 1V/Pa	mV/Pa
20	-0,51	-30,68	29,23
25	-0,21	-30,38	30,26
31,5	-0,05	-30,22	30,83
40	0,02	-30,15	31,09
50	0,05	-30,12	31,18
63	0,05	-30,12	31,20
80	0,09	-30,08	31,33
100	0,06	-30,11	31,23
125	0,07	-30,10	31,27
160	0,03	-30,14	31,12
200	0,01	-30,16	31,05
250	0,00	-30,17	31,01
315	-0,03	-30,20	30,92
400	-0,02	-30,19	30,94
500	-0,04	-30,21	30,86
630	-0,06	-30,23	30,80
800	-0,08	-30,25	30,73
1000	-0,11	-30,28	30,62
1120	-0,13	-30,30	30,56
1250	-0,15	-30,32	30,47
1400	-0,18	-30,35	30,37
1600	-0,23	-30,40	30,21
1800	-0,28	-30,45	30,03
2000	-0,33	-30,50	29,86
2240	-0,41	-30,58	29,58
2500	-0,49	-30,66	29,31
2800	-0,59	-30,76	28,98
3150	-0,72	-30,89	28,53
3550	-0,90	-31,07	27,94
4000	-1,10	-31,27	27,31
4500	-1,41	-31,58	26,36
5000	-1,67	-31,84	25,57
5600	-2,03	-32,20	24,54
6300	-2,48	-32,65	23,32
7100	-3,02	-33,19	21,89
8000	-3,75	-33,92	20,13
9000	-4,58	-34,75	18,29
10000	-5,84	-36,01	15,82
11200	-6,95	-37,12	13,94
12500	-7,99	-38,16	12,36

**Figura 3-4: Dados recolhidos durante a calibração.**

Os dados existentes Figura 3-4, são utilizados para criar a curva de calibração do microfone apresentada na Figura 3-5, que é a frequência medida no atuador eletrostático pela sensibilidade medida com o pistonfone. A linha vermelha indica a curva do microfone medido e a linha azul à correção aplicada pelo sistema. A tabela e o gráfico são inseridos no certificado juntamente com outras informações terminando a calibração.



**Figura 3-5: Gráfico mostra a curva da calibração do microfone**

## **4. CONCLUSÃO**

As primeiras informações colhidas ajudaram no projeto de pesquisa que será realizado para se implantar o método de calibração de microfones acústicos para uso nos testes em satélites, trazendo benefícios para o laboratório, já que as calibrações poderão ser realizadas internamente. Também vai criar mão de obra especializada para realizar a calibração de sensores acústicos.

Sendo assim os próximos passos para continuação do projeto são os seguintes: 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, elaboração de toda a documentação necessária para operação e configuração da técnica de medição, procedimento e cálculo de incertezas de calibração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **VIM “Vocabulário de Termos Gerais e Fundamentais e Gerais de Metrologia”, INMETRO, 2009.**
2. **Norma ISO IEC 61094-1 “Specifications for Laboratory Standard Microphones”, 2000**
3. **Norma ISO IEC 61094-5 “Methods for Pressure Calibration of Working Standard Microphones by Comparison” 2001**
4. **Norma ISO IEC 61094-6 “Electrostatic 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. MILHOMEM, Thiago Antônio Bacelar - “*Técnica de calibração de microfones de meia polegada por reciprocidade em campo livre*”, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação de Engenharia Mecânica, UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2008.