



Antônio Jorge Rodrigues Nunes

**Desenvolvimento e Validação de Nova Metodologia para
Calibração de Medidores e Detectores de Potência de Rádio
Frequência**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (Pós-MQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Professor Orientador: Dr. Carlos R. Hall Barbosa

Rio de Janeiro
março de 2008



Antônio Jorge Rodrigues Nunes

**Desenvolvimento e Validação de Nova Metodologia
para Calibração de Medidores e Detectores de
Potência de Rádio Freqüência**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação do Centro Técnico Científico da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas:

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa
Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Maurício Nogueira Frota

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Profa. Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite

UERJ - Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 17 de março de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Antônio Jorge Rodrigues Nunes

Graduado em Engenharia pela Universidade Veiga de Almeida, em 1987. Especialista em Telecomunicações pelo Centro de Instrução e Adaptação da Aeronáutica, em 2004. Chefe da Seção de Laboratórios de Padrões da Subdivisão de Metrologia do Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro, desde 2005.

Ficha Catalográfica

Nunes, Antônio Jorge Rodrigues

Desenvolvimento e validação de nova metodologia para calibração de medidores e detectores de potência / Antônio Jorge Rodrigues Nunes ; orientador: Carlos R. Hall Barbosa. – 2008.

111 f.: il. (color.) ; 30 cm

1. Dissertação (Mestrado em Metrologia)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Calibração. 3. Validação. 4. Medidores de potência. 5. Detectores. I. Barbosa, Carlos R. Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Agradeço a Deus por todas as graças recebidas, pois o Senhor é o meu pastor e nada me faltará.

AGRADECIMENTOS

A Metrologia na minha Vida

“ A minha vida pode ser traduzida em um processo metrológico” , em que:

- Deus é o Valor Verdadeiro.
- Os meus queridos pais Antônio e Arminda são os Padrões Primários.
- A minha amada esposa Mary é o meu Padrão de Referência.
- Os meus queridos filhos Matheus, Nicole, Gabriel, Luka e Luana são os Materiais de Referência Certificados.
- O meu padrinho Amadeu é o Valor Verdadeiro Convencional das grandezas de base.
- Os meus amigos Ricardo, Albino, Peixoto e Alfredo são os Padrões de Trabalho de todas as medições realizadas.
- Os meus amigos Américo, Zeca, Carlinhos e Carlos são os Instrumentos Calibrados cujas Exatidões são adequadas ao meu processo.
- Os amigos do INMETRO Paulo Couto e Paraguassu monitoraram as condições ambientais para a elaboração desta dissertação.
- Aos usuários dos serviços oferecidos pelo PAME-RJ, que, esperamos, tiveram suas incertezas reduzidas.
- Ao Orientador Professor Doutor Carlos Roberto Hall Barbosa, pelos conselhos e orientações, essenciais para a realização deste trabalho.
- Ao Orientador Professor Doutor Carlos Roberto Hall Barbosa, pelos conselhos e orientações, essenciais para a realização deste trabalho.
- Ao ex-Diretor Mauro Henrique Ramos **Conti** e ao Atual Diretor do PAME-RJ **Fernando** Cesar Pereira Santos, que possibilitaram, confiaram e acreditaram na realização do meu curso de mestrado.
- Aos professores, pelos ensinamentos e a Secretária Márcia pelo desprendido suporte.

A todos, o meu muito Obrigado!

Resumo

Nunes, Antônio Jorge Rodrigues; Barbosa, Carlos Roberto Hall. **Desenvolvimento e Validação de Nova Metodologia para Calibração de Medidores e detectores de Potência de Rádio Freqüência**. Rio de Janeiro, 2007. 111 pg. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (Pós-MQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação aborda o desenvolvimento e a validação de uma nova metodologia de calibração de medidores e detectores de Rádio Freqüência, visando a uma redução de custo desse procedimento metrológico, uma vez que não será mais necessário enviar padrões de referência para serem calibrados no exterior, como ocorria no procedimento anterior. Visa, ainda, a melhorar a confiabilidade e qualidade da calibração, por meio do emprego de padrões mais modernos. O alto custo da calibração nos laboratórios internacionais e a crescente carência deste serviço motivaram a nacionalização do procedimento, por meio de medidores de potência mais modernos e com menor grau de incerteza. Ressalta-se, ainda, que os detectores são muito utilizados nos transmissores dos Aeroportos de todo Brasil e nos sítios (DTCEA), no auxílio à aterrissagem por instrumentos e à navegação tanto dos aviões da Defesa Aérea como das aeronaves da Aviação comercial. Nos últimos anos, para atender às necessidades de medição, a Força Aérea Brasileira (FAB) tem investido na aquisição de novos instrumentos mais eficazes e complexos. Cabe ressaltar que várias tentativas foram feitas para aquisição de novos padrões de calibração dos medidores e detectores de potência, porém sem sucesso. Como órgão central, a Subdivisão de Metrologia do PAMERJ, que é laboratório central de metrologia do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB) precisava dar uma resposta ao sistema. Essa tarefa mostrou-se árdua, devido à grande variedade de detectores, com faixas diferentes de freqüências e potências, o que acarretava na necessidade de aquisição de vários padrões e no envio periódico dos mesmos ao exterior para serem calibrados. O desenvolvimento e a validação deste procedimento basearam-se na perspectiva da Pesquisa-Ação, sendo utilizadas as normas técnicas do Sistema de Metrologia Aeroespacial, bem como os requisitos internacionais da NBR ISO 17025 e os manuais técnicos dos fabricantes. O trabalho desenvolvido inclui: (i) utilização de instrumentos comerciais como padrão intercambiável; (ii) análise das medições efetuadas; (iii) cálculo das incertezas de medição; (iv) calibração com incerteza

menor do que a do procedimento anteriormente utilizado; e (v) melhoria da confiabilidade e qualidade laboratorial. Com a utilização desta nova metodologia para a calibração de medidores e detectores de alta frequência e alta potência, substituindo plena e satisfatoriamente a anterior, conseguiu-se melhorar a confiabilidade, reprodutibilidade e qualidade de calibração, além de resolver a carência de padrões disponíveis nesta área no COMAER, permitindo assim atender à demanda, garantindo a segurança do serviço de proteção ao voo à população, reduzindo custos, além de padronizar o processo e agregar valor ao serviço de calibração.

Palavras-chave

Calibração; Validação; Metrologia; Medidores de Potência; e Detectores.

Abstract

Nunes, Antônio Jorge Rodrigues; Barbosa, Carlos Roberto Hall. **Development and Validation of a New Method for Calibration of Radio Frequency Meters and Detectors.** Rio de Janeiro, 2007, 111 pg. Master's Degree Paper – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (Pós-MQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This dissertation approach the development and the validation of a new methodology for calibration of meters and detectors of radio frequency, to aim a cost reduction of this metrologic procedure, once that will not be necessary anymore to send reference standards to be calibrate in the exterior, like happened with the last procedure. It aims, still, to improve the reliability and quality of the calibration, by using newer standards. The high calibration cost in the international laboratories and the increasing lack of this kind of service motivated the nationalization of the procedure, by using newer power meters with lower uncertainty. It is important to say, that the detectors are very useful in transmitters in all airports of Brazil and in the country-side (DTCEA), on the help for landing by instruments and the navigation for both military and commercial airplanes. In the last years, to attend the measurement needs, the Brazilian Air Force (FAB) has invested a lot of money in the acquisition of new efficacy and complex instruments. It is necessary to emphasize that a lot of trying were done to acquire new standards in the calibration of power meter and power detector, without successful though. As central organization, the Subdivision of Metrology of PAME-RJ, which is the Metrologic central laboratory of the Brazilian Airspace Control System (SISCEAB), has needed to give an answer to the System. This task showed itself very hard, what cause the need of buying different kinds of detectors in different frequencies and powers, that induced to acquire a variety of standards and to send them periodically to exterior to be calibrate. The development and validation of this procedure have been based on the perspective of search-action, using the Airspace Metrology System(SISMETRA) techniques rules, as well as the International requirements of the NBR ISO 17025 and the factories technical orders. The work developed includes: (i) the utilization of commercial instruments as standard and interchangeable; (ii) a analyzes of the measurement taken; (iii) uncertainty measurement calculations; (iv) calibration

with uncertainty lower than the procedure used before; and (v) increasing of the reliability and laboratory quality. With the use of this new calibration methodology of meters and detectors of high frequency and power, replacing the previous fully and satisfactory, the reliability, reproducibility and quality of the calibration were improved, besides of solving the absent of standards available in this area in the COMAER, allowing to attend the demand, assuring the fly protection service security to the population, reducing costs, besides of to standardize the procedure and add worth to this calibration service.

Keywords

Calibration; Validation; Metrology; Power Meters; and Detectors.

Sumário

1. Introdução	17
1.1 Metrologia na Força Aérea Brasileira	17
1.2 Motivação	18
1.2.1 Auxílios de Navegação	18
1.2.2 Sistema de Pouso por Instrumentos (ILS)	19
1.2.3 Calibração dos Detectores de RF	27
1.2.4 Situação Atual de Calibração de Potência	29
1.3 Objetivo	31
1.4 Organização da Dissertação	32
2. Transdutores de Potência	34
2.1 Medição de Potência de sinais de rádio-freqüência	34
2.1.1 Termistores	34
2.1.2 Termopares	36
2.1.3 Detector de Diodo	37
2.2 Wattímetros	39
2.3 Modelos de wattímetros tipo thruline	40
2.3.1 Wattímetro Modelo 43	41
2.3.2 Wattímetro Modelo 4410	42
2.3.3 Wattímetro Modelo 4391M	43
2.3.4 Wattímetro Modelo NAUS 4	45
2.4 Modelo de wattímetros do tipo termaline	46
2.4.1 Wattímetro Modelo 612	46
2.4.2 Wattímetro Modelo 6155	47
3. Metodologia de calibração proposta	49
3.1 Especificações dos instrumentos utilizados	50
3.2 Nova metodologia de calibração proposta	59

4. Incerteza de medição	62
4.1 Introdução	62
4.1.1 Incerteza de Medição	62
4.1.2 Interpretação do conceito de incerteza e medição	63
4.2 Estimativa da incerteza de medições	66
4.2.1 Definição do mensurando	66
4.2.2 Diagrama causa-efeito	67
4.2.3 Avaliação das incertezas-padrão	69
4.2.4 Componentes de Incerteza	72
4.2.5 Cálculo da incerteza-padrão combinada	73
4.2.6 Determinação dos graus de liberdade	75
4.2.7 Determinação do fator de abrangência	76
4.2.8 Estimativa da incerteza expandida	77
4.2.9 Balanço das Incertezas	78
4.3 Estudos de Caso	79
5. Conclusões e trabalhos futuros	86
6. Referências bibliográficas	88

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA).	18
Figura 2 – Orientação de Curso com Fontes Luminosas.	19
Figura 3 – Estação do localizador.	21
Figura 4 – Orientação Lateral fornecida pelo Localizador.	22
Figura 5 – Setor de cobertura do localizador.	23
Figura 6 - Orientação Vertical nos pontos notáveis da trajetória de planeio.	24
Figura 7 – Wattímetro, podendo-se notar ainda o elemento sensor.	28
Figura 8 – Padrão Modelo1223 da Philco-Ford Corporation.	29
Figura 9 – Diagrama Esquemático de um Sistema de Medição de Potência.	34
Figura 10 – Curva Característica de um Termistor Típico.	35
Figura 11 – Tensão medida, relacionada com a diferença de temperatura.	36
Figura 12 – A região da lei do quadrado do diodo.	38
Figura 13 – Esquema básico de utilização de um diodo para medição da potência de sinais de rádio-freqüência.	39
Figura 14 – Wattímetro do tipo thruline.	40
Figura 15 – Wattímetro do tipo Termaline.	40
Figura 16 – Wattímetro modelo 43.	41
Figura 17 – Wattímetro modelo 4410.	43
Figura 18 – Wattímetro modelo 4391M.	44
Figura 19 – Wattímetro modelo NAUS 4.	45

Figura 20 – Wattímetro modelo 612.	47
Figura 21 – Wattímetro modelo 6155.	47
Figura 22 – Metodologia tradicional de calibração direta.	49
Figura 23 – Nova Metodologia proposta.	49
Figura 24 – Gerador de Sinais.	51
Figura 25 – Curva Pin x Pout do amplificador.	52
Figura 26 – Amplificador modelo 100A250A.	53
Figura 27 – Amplificador modelo 250W1000A.	53
Figura 28 – Amplificador modelo 1000A250.	54
Figura 29 – Wattímetro.	55
Figura 30 – Atenuador 8325.	56
Figura 31 – Atenuador modelo 8357-300.	57
Figura 32 – Medidor e Sensor de Potência.	58
Figura 33 – Nova Metodologia de calibração proposta.	59
Figura 34 – Montagem para a calibração do detector de potência.	60
Figura 35 – Resultado Corrigido de uma Medição.	64
Figura 36 – Variação do mensurando.	64
Figura 37 – Diagrama causa-efeito da medição de uma força.	67
Figura 38 – Nova Metodologia proposta.	68
Figura 39 – Diagrama Causa-efeito para o Sistema de Calibração Proposta.	68
Figura 40 - Balanço das incertezas da indicação do instrumento a calibrar.	78
Figura 41– Balanço das Incertezas no Erro(W).	79
Figura 42 – Desenho esquemático de um resultado de medição não corrigido.	94
Figura 43 – Desenho esquemático representativo do resultado de medição corrigido.	94
Figura 44 – As sete unidades de base.	95
Figura 45 – Algumas unidades derivadas.	96

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do calibrador de RF Sierra 1223.	30
Tabela 2 – Especificação do Gerador de Sinais – SML 03 (Rohde & Schwarz).	51
Tabela 3 – Especificações do AR 100A250A.	53
Tabela 4 – Especificações do AR 250W1000A.	54
Tabela 5 – Especificações do AR 1000A250.	54
Tabela 6 – Especificação do Atenuador de RF – Modelo 8325.	56
Tabela 7 – Especificação do modelo 8357-300.	57
Tabela 8 – Especificação do Sensor de Potência.	58
Tabela 9 – Planilha de cálculo do detector 50 C.	69
Tabela 10 – Avaliação Tipo A.	70
Tabela 11 – Avaliação Tipo B.	72
Tabela 12 – Coeficiente de Sensibilidade e Incerteza combinada.	75
Tabela 13 – Graus de liberdade.	76
Tabela 14 – Fator de abrangência.	77
Tabela 15 – Incerteza Expandida.	78
Tabela 16 – 1000W - Faixa de 2MHz a 30MHz.	81
Tabela 17 – 100W - Faixa de 100MHz a 250MHz.	82
Tabela 18 – 250W - Faixa de 2MHz a 30MHz.	83
Tabela 19 – 25W - Faixa de 50MHz a 125MHz.	84
Tabela 20 – 25W - Faixa de 100MHz a 250MHz.	85

Siglas e abreviaturas

AC – Corrente Alternada

AFPSL – Laboratório de Padrões Primário da Força Aérea

BIPM – Bureau Internacional de Pesos e Medidas (LNM da França)

CINDACTA – Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle do Tráfego
Aéreo

CGPM – Conferência Geral de Pesos e Medidas

COMAER – Comando da Aeronáutica

CTA – Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial

DC – Corrente Contínua

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DME – Distance Measuring Equipment (Equipamento de Medição de
Distância)

DMM – Multímetro Digital

DDM – Diferença de Profundidade de Modulação

DTCEA – Destacamento de Controle do Espaço Aéreo

FAB – Força Aérea Brasileira

FAA- Federal Aviation Administraion

GUM – Guia para a expressão da incerteza de medição

IFI – Instituto de Fomento Industrial

ILS – Instrumental Landing System (Sistema de aterrissagem por
instrumento)

ISO – International Standartization Organization (Organização
Internacional de Padronização)

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade
Industrial

LAI – Laboratório de Aferição de Instrumentos
LCC – Laboratório Central de Calibração
LNM – Laboratório Nacional de Metrologia
NBR – Norma Brasileira Registrada
NBR ISO 9000 – Normas da Gestão da Qualidade e Garantia da Qualidade
NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração
NIST – National Institute of Standards and Technology (LNM dos EUA)
PAME-RJ – Parque de Material de Eletrônica da Aeronáutica do Rio de Janeiro
RBC – Rede Brasileira de Calibração
RF – Rádio Freqüência
SI – Sistema Internacional de Unidades
SISCEAB – Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
SISMETRA – Sistema de Metrologia da Aeronáutica
SIVAM – Sistema Integrado de Vigilância da Amazônia
SWR – Standing Wave Ratio (Taxa de onda Estacionária)
USAF – United States Air Force (Força Aérea dos Estados Unidos da América)
VHF – Very High Frequency (Frequência Muito Alta)
VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia
VOR – VHF Omnidirectional Range navigation system (Sistema de Navegação de coordenadas radiais obtidas por VHF)
VSWR – Voltage Standing Wave Ratio (Taxa em tensão da onda estacionária)