



UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas
FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
DECOM - Departamento de Comunicações

ANÁLISE DE APLICAÇÃO E DESEMPENHO DE UMA ESFERA INTEGRADORA EM RADIÔMETROS PARA CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE POTÊNCIA ÓPTICA

Autor: Hilton Henrique Bertan

Orientador: Prof. Dr. Yuzo Iano

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações e Telemática.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Yuzo Iano FEEC-UNICAMP

Prof. Dr. Edson Moschim FEEC-UNICAMP

Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón GREMAP-UNISAL

Campinas/SP - Brasil
Dezembro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B461a Bertan, Hilton Henrique
Análise de aplicação e desempenho de uma esfera integradora em radiômetros para calibração de medidores de potência óptica / Hilton Henrique Bertan. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Yuzo Iano
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Medição. 2. Instrumento de medição. 3. Calibração. I. Iano, Yuzo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Application analysis and performance of a integrating sphere in radiometers for optical power meters calibration

Palavras-chave em Inglês: Measurement, Measuring instrument, Calibration

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Edson Moschim e Vicente Idalberto Becerra Sablón

Data da defesa: 19/12/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Hilton Henrique Bertan

Data da Defesa: 19 de dezembro de 2007

Título da Tese: "Análise de Aplicação e Desempenho de uma Esfera Integradora em Radiômetros para Calibração de Medidores de Potência Óptica"

Prof. Dr. Yuzo Iano (Presidente):

Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón:

Prof. Dr. Edson Moschim:

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Yuzo Iano, pela confiança e apoio em todas as fases deste trabalho.

Ao COTUCA/Unicamp – Colégio Técnico de Campinas, pela minha formação técnica em Eletro-Eletrônica, que foi muito útil para as etapas acadêmicas e profissionais futuras.

À FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp (Universidade Estadual de Campinas).

Ao LabCal – Laboratório de Calibração da Fundação CPqD (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações), aos amigos e profissionais, ao Técnico de Laboratório José Maria Gâmbaro, pelo auxílio nas medições em determinados experimentos, e em especial ao Eng. Celso P. Saraiva, responsável técnico pelo Laboratório de Calibração.

Ao IEP – Instituto Electrotécnico Português, em especial ao Eng. Modesto de Moraes, responsável pelo Laboratório de Fibras Ópticas.

Ao LARAD – Laboratório de Radiometria do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), à Chefe da Divisão de Metrologia Óptica Iakyra B. C. Bougleux, à Pesquisadora Juliana F. S. Gomes e em especial ao Pesquisador Augusto P. Cunha.

Ao Eng. Fábio C. P. Lemos, Supervisor da Seção de Eletrônica e Analítica do CEMEQ/Unicamp (Centro para Manutenção de Equipamentos), pelo apoio.

Aos meus pais, Henrique e Benedita, pelos ensinamentos na vida.

À minha esposa, Danieli, pelo amor e incentivo.

Aos amigos verdadeiros.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento desse trabalho.

RESUMO

Uma esfera integradora e suas propriedades foram estudadas a fim de se obter um padrão de referência em medição de potência óptica. Este trabalho apresenta pesquisas realizadas em laboratórios nacionais e internacionais.

As medições com uma esfera foram comparadas com as de um medidor de potência óptica padrão de um laboratório de calibração brasileiro e com equipamentos de um laboratório de medições ópticas europeu.

Os resultados indicaram que a esfera integradora em questão apresenta uma incerteza de medição menor e, portanto, pode ser usada como padrão de referência. Este trabalho também tem como finalidade mostrar que é possível elaborar um procedimento de escolha de um novo equipamento padrão utilizando-se recursos e equipamentos limitados disponíveis no laboratório.

Palavras chave: esfera integradora, incerteza de medição, potência óptica.

ABSTRACT

We have studied an integrating sphere and its properties for application as a reference standard in optical power measurement. This work shows the researches made in national and international laboratories.

We have compared the measurements of a sphere with the standard optical power meter of a Brazilian calibration laboratory and with equipments of a European optical measurement laboratory.

The results indicate that the integrating sphere can be used as a reference standard, because its measurement uncertainty is small. This work also has the purpose to show that a procedure for the choice of new standard equipment is reliable using resources and equipment commonly available in a laboratory.

Key-words: integrating sphere, measurement uncertainty, optical power.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xix
PUBLICAÇÕES DO AUTOR	xxiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Organização do Trabalho	2
1.2. Resumo das Contribuições	4
2. PADRÕES DE MEDIÇÃO	5
2.1. Radiômetro Criogênico	5
2.2. Padrões de Transferência	9
3. ESFERA INTEGRADORA.....	13
3.1. Estrutura e Teoria	13
4. EXPERIMENTOS	21
4.1. Fase I – Experimentos Iniciais	21
4.1.1. Método	23
4.1.2. Verificação do Detector Piroelétrico	24
4.1.3. Verificação do Detector da Esfera.....	28
4.1.4. Verificação da Esfera Integradora	32

4.2. Fase II – Calibrações	36
4.2.1. Calibração da Esfera Integradora	37
4.2.1.1. Primeira Calibração da Esfera	38
4.2.1.2. Segunda Calibração da Esfera.....	40
4.2.2. Calibração do Medidor sem Esfera	44
4.3. Fase III – Experimentos Finais	47
4.3.1. Estrutura Laboratorial	48
4.3.2. Calibração do Medidor para Comparação	49
4.3.3. Resultados usando Medidor sem Esfera	50
4.3.4. Resultados usando Esfera Integradora	51
5. INCERTEZA DE MEDIÇÃO	53
5.1. Considerações Gerais	54
5.2. Avaliação da Incerteza de Medição	55
5.3. Incerteza Padrão Tipo A.....	55
5.4. Incerteza Padrão Tipo B.....	56
5.5. Incerteza Padrão Combinada.....	59
5.6. Incerteza Expandida	59
6. ESTUDO DAS INCERTEZAS	63
6.1. Incerteza do Medidor Padrão.....	64
6.2. Linearidade do Medidor Padrão.....	65
6.3. Estabilidade do <i>Laser</i>	66
6.4. Comprimento de Onda do <i>Laser</i>	67
6.5. Variação do <i>Laser</i> com a Temperatura.....	67
6.5.1. Variação da Temperatura em 10°C.....	69
6.5.2. Variação da Temperatura em 4°C.....	71

6.6.	Dependência do Tipo de Conector.....	73
6.7.	Uniformidade Espacial do Detector.....	80
6.8.	Dependência da Polarização.....	81
7.	CÁLCULO DA INCERTEZA	83
7.1.	Incertezas Combinadas Parciais	84
7.2.	Incertezas do Equipamento sob Calibração	86
7.3.	Incertezas Combinadas.....	87
7.4.	Incertezas Expandidas	88
8.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	89
9.	CONCLUSÕES	91
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
11.	ANEXO.....	99

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Diagrama simplificado de um radiômetro de substituição elétrica [7].	6
Fig. 2.2 - Radiômetro criogênico de alta exatidão do NIST [7].	7
Fig. 2.3 - Esquema de montagem para uso do radiômetro criogênico [7].	9
Fig. 2.4 - Configuração típica de um detector do tipo armadilha óptica [15].	10
Fig. 2.5 - Detector do tipo armadilha óptica utilizando espelho esférico [16].	11
Fig. 3.1 - Esfera integradora montada em um suporte.	14
Fig. 3.2 - Troca de radiação entre duas superfícies difusoras [28].	15
Fig. 3.3 - Esfera com superfície interna difusora [28].	15
Fig. 3.4 - Esfera integradora e suas aberturas [28].	17
Fig. 3.5 - Campo de visão do detector da esfera integradora [28].	18
Fig. 3.6 - Esfera integradora com anteparos internos [28].	19
Fig. 4.1 - Procedimento do CENAM para calibração de seus padrões.	24
Fig. 4.2 - Procedimento utilizado para as verificações no Inmetro.	24
Fig. 4.3 - Esquema de montagem para verificação do detector piroelétrico.	25
Fig. 4.4 - Esquema de montagem para verificação do detector da esfera.	29
Fig. 4.5 - Esquema de montagem para verificação da esfera integradora.	34
Fig. 4.6 - Esquema para calibração em potência óptica da esfera integradora.	39
Fig. 4.7 - Esquema para calibração em linearidade da esfera integradora.	39
Fig. 4.8 - Esquema para calibração da esfera integradora usando fonte sintonizável.	41
Fig. 4.9 - Responsividades da esfera obtidas nas duas calibrações.	42
Fig. 4.10 - Responsividades da esfera próximas de 1300nm.	43
Fig. 4.11 - Responsividades da esfera próximas de 1550nm.	43
Fig. 4.12 - Esquema para calibração em potência óptica do medidor HP81521B.	45
Fig. 4.13 - Esquema para calibração em linearidade do medidor HP81521B.	46
Fig. 4.14 - Esquema para calibração do medidor <i>Anritsu</i> MA9301A.	49
Fig. 6.1 - Montagem para os ensaios ópticos na câmara climática.	68
Fig. 6.2 - Registro do tempo (h) x temperatura (°C) para a variação de 10°C.	70
Fig. 6.3 - Registro do tempo (h) x umidade relativa (%) para a variação de 10°C.	70
Fig. 6.4 - Potência óptica em função do tempo para a variação de 10°C.	70
Fig. 6.5 - Registro do tempo (h) x temperatura (°C) para a variação de 4°C.	72
Fig. 6.6 - Registro do tempo (h) x umidade relativa (%) para a variação de 4°C.	72
Fig. 6.7 - Potência óptica em função do tempo para a variação de 4°C.	72
Fig. 6.8 - Esquema das montagens para medições com diferentes conectores.	75
Fig. 6.9 - Média das medições com conectores diferentes em 1300nm.	76
Fig. 6.10 - Média das medições com conectores diferentes em 1550nm.	77
Fig. 6.11 - Comparação entre os conectores em 1300nm.	78
Fig. 6.12 - Comparação entre os conectores em 1550nm.	78
Fig. 11.1 - Esfera integradora.	99
Fig. 11.2 - Esfera integradora em três vistas.	99
Fig. 11.3 - Radiômetro criogênico.	100
Fig. 11.4 - Montagem para verificação da esfera integradora.	100
Fig. 11.5 - Esfera integradora e detector piroelétrico.	101
Fig. 11.6 - Esfera integradora e detector piroelétrico em vista de perfil.	101
Fig. 11.7 - Montagem para primeira calibração da esfera integradora.	102
Fig. 11.8 - Montagem para segunda calibração da esfera integradora.	102
Fig. 11.9 - Montagem para calibração em potência óptica do medidor sem esfera.	103
Fig. 11.10 - Montagem para calibração em linearidade do medidor sem esfera.	103
Fig. 11.11 - Conectores ópticos avaliados.	104

Fig. 11.12 - Montagem para medições com diferentes conectores.	104
Fig. 11.13 - Esfera integradora e pico-amperímetro.....	105
Fig. 11.14 - Montagem para calibração do medidor <i>Anritsu</i> MA9301A.	105
Fig. 11.15 - Dados enviados pelo fabricante da esfera integradora.....	106
Fig. 11.16 - Primeira medição do detector <i>trap</i> na verificação do detector piroelétrico.....	107
Fig. 11.17 - Medição na verificação do detector piroelétrico.....	108
Fig. 11.18 - Segunda medição do detector <i>trap</i> na verificação do detector piroelétrico.....	109
Fig. 11.19 - Resumo das medições na verificação do detector piroelétrico.	110
Fig. 11.20 - Medições na verificação do detector da esfera integradora.	111
Fig. 11.21 - Medições na verificação da esfera integradora.....	112
Fig. 11.22 - Leituras com diferentes conectores em 1300nm.....	113
Fig. 11.23 - Leituras com diferentes conectores em 1550nm.....	114
Fig. 11.24 - Resumo das medições com diferentes conectores.	115
Fig. 11.25 - Cálculo das incertezas de medição para a esfera <i>Labsphere</i> e HP81521B.....	116
Fig. 11.26 - Leituras para calibração do medidor <i>Anritsu</i> MA9301A.....	117
Fig. 11.27 - Incertezas de medição do medidor <i>Anritsu</i> MA9301A.....	118

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 - EXPERIMENTOS REALIZADOS E SUAS FASES.....	21
TABELA 4.2 - DADOS DA ESFERA INTEGRADORA	23
TABELA 4.3 - DETECTOR PIROELÉTRICO VERIFICADO	25
TABELA 4.4 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO ..	25
TABELA 4.5 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO	27
TABELA 4.6 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO	27
TABELA 4.7 - DETECTOR DA ESFERA VERIFICADO	29
TABELA 4.8 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA	29
TABELA 4.9 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA	31
TABELA 4.10 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA	31
TABELA 4.11 - ESFERA INTEGRADORA VERIFICADA.....	33
TABELA 4.12 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA.....	33
TABELA 4.13 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA.....	35
TABELA 4.14 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA.....	35
TABELA 4.15 - SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NA ESFERA INTEGRADORA	37
TABELA 4.16 - EQUIPAMENTOS PARA A PRIMEIRA CALIBRAÇÃO DA ESFERA.....	38
TABELA 4.17 - PRIMEIRA CALIBRAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA	40
TABELA 4.18 - EQUIPAMENTOS PARA A SEGUNDA CALIBRAÇÃO DA ESFERA.....	41
TABELA 4.19 - SEGUNDA CALIBRAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA	42
TABELA 4.20 - SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NO MEDIDOR SEM ESFERA	44
TABELA 4.21 - EQUIPAMENTOS PARA A CALIBRAÇÃO DO DETECTOR SEM ESFERA. 45	
TABELA 4.22 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR HP81521B.....	46
TABELA 4.23 - MEDIDOR SEM ESFERA <i>ANRITSU</i> MA9301A.....	47
TABELA 4.24 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR <i>ANRITSU</i> MA9301A EM 1300nm	50
TABELA 4.25 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR <i>ANRITSU</i> MA9301A EM 1550nm	50
TABELA 4.26 - MÉDIA DAS LEITURAS NA CALIBRAÇÃO COM HP81521B	50
TABELA 4.27 - ERRO E DESVIO PADRÃO NA CALIBRAÇÃO COM HP81521B	51
TABELA 4.28 - MÉDIA DAS LEITURAS NA CALIBRAÇÃO COM ESFERA.....	52
TABELA 4.29 - ERRO E DESVIO PADRÃO NA CALIBRAÇÃO COM ESFERA	52
TABELA 5.1 - FATORES DE ABRANGÊNCIA k EM FUNÇÃO DE v_{eff}	61
TABELA 6.1 - EQUIPAMENTOS SOB ENSAIO CLIMÁTICO	68
TABELA 6.2 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM 10°C	69
TABELA 6.3 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM 4°C	71
TABELA 6.4 - RESULTADOS OBTIDOS NO SEGUNDO EXPERIMENTO	73
TABELA 6.5 - EQUIPAMENTOS PARA EXPERIMENTOS COM CONECTORES	74
TABELA 6.6 - TIPOS DE CONECTORES ÓPTICOS AVALIADOS	74
TABELA 6.7 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES COM CONECTORES DIFERENTES EM 1300nm...	76
TABELA 6.8 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES COM CONECTORES DIFERENTES EM 1550nm...	76
TABELA 6.9 - VARIAÇÕES NAS LEITURAS COM CONECTORES EM 1300nm	79
TABELA 6.10 - VARIAÇÕES NAS LEITURAS COM CONECTORES EM 1550nm	79
TABELA 7.1 - COMPONENTES DE INCERTEZA PARA O MEDIDOR HP81521B.....	83
TABELA 7.2 - COMPONENTES DE INCERTEZA PARA A ESFERA INTEGRADORA.....	83
TABELA 7.3 - COMBINAÇÕES PARCIAIS DE INCERTEZAS PARA CADA PADRÃO	85
TABELA 7.4 - INCERTEZAS TIPO A PARA CALIBRAÇÃO DO <i>ANRITSU</i> MA9301A	87
TABELA 8.1 - CALIBRAÇÃO DO <i>ANRITSU</i> MA9301A COM O MEDIDOR HP81521B	89
TABELA 8.2 - CALIBRAÇÃO DO <i>ANRITSU</i> MA9301A COM A ESFERA INTEGRADORA ..	89

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIPM - *Bureau International des Poids et Mesures*
CENAM - Centro Nacional de Metrologia
CIPM - *Comité International des Poids et Mesures*
CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
DKD - *Deutscher Kalibrierdienst*
FC/APC - *Fiber Connector / Angled Physical Contact*
FC/PC - *Fiber Connector / Physical Contact*
Ge - Germânio
GPIB - *General Purpose Instrumentation Bus*
GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*
HACR - *High Accuracy Cryogenic Radiometer*
HeNe - Hélio-Neônio
HP - *Hewlett-Packard*
IEC - *International Electrotechnical Commission*
IEP - Instituto Electrotécnico Português
IFA- Instituto de Física Aplicada
IFCC - *International Federation of Clinical Chemistry*
InGaAs - Arseneto de Índio-Gálio
Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
ISO - *International Organization of Standardization*
IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*
IUPAP - *International Union of Pure and Applied Physics*
LabCal - Laboratório de Calibração
LARAD - Laboratório de Radiometria
Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
NIST - *National Institute of Standards and Technology*
OIML - *International Organization of Legal Metrology*
Si - Silício
SM - *Singlemode* (monomodo)
VIM - Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

$2a$	Amplitude do intervalo
$a-$	Limite inferior
$a+$	Limite superior
A_i	Área no interior da esfera
A_I	Área da abertura de entrada
A_o	Área da abertura de saída
A_S	Área interna total da esfera
dA_i	Elemento diferencial de uma superfície difusora
dF_{d1-d2}	Fator de troca de radiação entre elementos diferenciais
$Erro_{PIRO}$	Erro na leitura do detector piroelétrico
$Erro_{PIRO,\%}$	Erro na leitura do detector piroelétrico em porcentagem
$Erro_{PIRO,W}$	Erro na leitura do detector piroelétrico em unidade de potência (Watt)
f	Relação entre a soma das áreas das aberturas da estrutura e a área total
F_{1-2}	Fração do fluxo radiante recebido por A_2
$Fator$	Fator de correção
i_h	Corrente elétrica para aquecimento
I_{TRAP}	Corrente medida pelo detector de armadilha óptica
k	Fator de abrangência
L	Radiância
$Média$	Média das leituras
$Média_{CORR}$	Média corrigida das leituras
$Média_{DETEC}$	Média das leituras do detector de germânio
$Média_{ESF}$	Média das leituras da esfera integradora
$Média_{PIRO}$	Média final das leituras para o detector piroelétrico
$Média_{PIRO,CORR}$	Média corrigida das leituras do detector piroelétrico
$Média_{TRAP}$	Média final das leituras para o detector de armadilha óptica
n	Número de observações
P	Probabilidade
$Padrão$	Média das leituras no medidor padrão
P_{TRAP}	Potência medida pelo detector de armadilha óptica
$\bar{q}$	Média aritmética das observações
Q	Valor esperado de uma grandeza
q_j	Observações
R	Raio
$res\%$	Resolução em porcentagem
$resp_{CAL,ESF}$	Responsividade da esfera dada no certificado
$resp_{DETEC}$	Responsividade do detector de germânio
$resp_{ESF}$	Responsividade da esfera integradora
$resp_{TRAP}$	Responsividade do detector de armadilha óptica
S	Distância
$s(\bar{q})$	Desvio padrão experimental da média
$s^2(\bar{q})$	Variância experimental da média
$s^2(q)$	Variância experimental

T	Temperatura
T_0	Temperatura do bloco de referência
U	Incerteza de medição expandida
$u(\bar{q})$	Incerteza padrão associada à estimativa de entrada $\bar{q}$
$u(x_i)$	Incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i
$u(y)$	Incerteza padrão de medição associada à y
u_A	Incerteza Tipo A
$U_{ANRITSU,ESF}$	Incerteza expandida do medidor <i>Anritsu</i> calibrado com a esfera
$U_{ANRITSU,HP}$	Incerteza expandida do medidor <i>Anritsu</i> calibrado com o medidor HP
$u_c(y)$	Incerteza padrão combinada associada com y
$u_{C,ESF}$	Incerteza associada ao tipo de conector para a esfera
$u_{C,HP}$	Incerteza associada ao tipo de conector para o medidor HP
$u_{CAL,ESF}$	Incerteza da esfera dada no certificado
$u_{CAL,HP}$	Incerteza do medidor HP dada no certificado
$u_{CB,ESF}$	Incerteza combinada para o medidor <i>Anritsu</i> calibrado com a esfera
$u_{CB,HP}$	Incerteza combinada para o medidor <i>Anritsu</i> calibrado com o medidor HP
$u_{CBP,ESF}$	Incerteza combinada parcial para a esfera
$u_{CBP,HP}$	Incerteza combinada parcial para o medidor HP
u_E	Incerteza corrigida associada à estabilidade da fonte <i>laser</i>
$u_{E,\%}$	Incerteza associada à estabilidade da fonte <i>laser</i>
u_{ESF}	Incerteza de medição corrigida para a esfera integradora
$u_{ESF,1300,\%}$	Incerteza de medição da esfera para 1300nm em porcentagem
$u_{ESF,1550,\%}$	Incerteza de medição da esfera para 1550nm em porcentagem
u_{HP}	Incerteza de medição corrigida para o medidor HP
$u_{HP,1300,\%}$	Incerteza de medição do medidor HP para 1300nm em porcentagem
$u_{HP,1550,\%}$	Incerteza de medição do medidor HP para 1550nm em porcentagem
$u_i(y)$	Componente padronizada de incerteza
u_L	Incerteza corrigida associada à linearidade
$u_{L,\%}$	Incerteza associada à linearidade dada em porcentagem
$u_{P,ESF}$	Incerteza de medição associada à polarização para a esfera
$u_{P,HP}$	Incerteza de medição associada à polarização para o medidor HP
u_R	Incerteza associada à resolução
u_T	Incerteza de medição associada à variação do <i>laser</i> com a temperatura
$u_{U,ESF}$	Incerteza de medição associada à não-uniformidade da esfera
$u_{U,HP}$	Incerteza de medição associada à não-uniformidade do medidor HP
u_λ	Incerteza de medição associada ao comprimento de onda do <i>laser</i>
Var_{MAX}	Variação máxima
v_{eff}	Graus de liberdade efetivos
v_i	Graus de liberdade
$v_{i,TipoA}$	Graus de liberdade da componente Tipo A
$v_{i,TipoB}$	Graus de liberdade da componente Tipo B
X_i	Grandeza de entrada
x_i	Estimativa de entrada
Y	Grandeza de saída
y	Estimativa de saída
Z	Valor verdadeiro de uma quantidade

z_i	Limite do intervalo
α	Ângulo sólido total projetado da superfície
Δ	Diferença entre valores de leituras
Δ_{PIRO}	Diferença entre as leituras do detector com o <i>shutter</i> fechado e aberto
θ_i	Ângulo em relação à normal da superfície
λ	Comprimento de onda
ρ	Reflectância
Φ_i	Fluxo total de radiação na entrada

PUBLICAÇÕES DO AUTOR

C. P. Saraiva, H. H. Bertan, M. Moraes, Y. Iano. “Um estudo sobre a reprodutibilidade de técnica espectrométrica de alta resolução para sistemas DWDM”. ENQUALAB - Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia.. 5 p. São Paulo, 2006

H. H. Bertan, Y. Iano. “Análise de Desempenho da Esfera Integradora para Calibração de Medidores de Potência Óptica”. Revista Científica Periódica - Telecomunicações - INATEL. v. 9, n. 2, p. 7-12. 2007

H. H. Bertan, Y. Iano. “A Esfera Integradora como Padrão de Referência para medição de Potência Óptica no Laboratório de Calibração”. Revista Ciência e Tecnologia – UNISAL. 2007. A ser publicado.

1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia está permitindo o desenvolvimento de métodos mais precisos e dispositivos mais confiáveis a custos menores, com o objetivo constante de aumentar o desempenho dos sistemas de telecomunicações quanto à sua velocidade, capacidade e confiabilidade. Portanto, esses sistemas vêm exigindo instrumentos cada vez mais precisos para a medição de diversas grandezas. Uma das grandezas cuja medição requer extrema precisão é a potência óptica, cuja importância vem aumentando à medida que equipamentos mais complexos são projetados e utilizados nos laboratórios do mundo todo. Sendo crescente a necessidade de instrumentos com incertezas de medição cada vez menores para mensurar várias grandezas, dentre essas a potência óptica, tornou-se necessário uma rápida evolução dos métodos para tais medições.

Esses equipamentos necessitam de calibrações com incertezas de medição muito baixas que são obtidas utilizando uma cadeia de rastreabilidade formada por equipamentos confiáveis, cujas propriedades garantem um ótimo desempenho. Cabe ressaltar que o metrologista possui papel fundamental, pois é dele não apenas a responsabilidade de desenvolver procedimentos, mas também de interpretar com inteligência os resultados.

A interpretação dos dados apresentados nos certificados de calibração é tão importante quanto à calibração do equipamento. Uma análise bem feita do documento proporciona maior confiabilidade aos processos e, conseqüentemente, melhoria na qualidade dos produtos ou serviços oferecidos [1].

Os métodos de medição de potência óptica evoluíram com o tempo, chegando a equipamentos como o radiômetro criogênico, que foi estudado neste trabalho pela sua importância como padrão primário nos institutos nacionais de metrologia.

Este trabalho tem como um dos grandes objetivos servir de guia para todo metrologista que busca um modelo a seguir para a caracterização de um novo equipamento em um laboratório.

Alguns laboratórios ao redor do mundo já empregam a esfera integradora como equipamento de medição há algum tempo, inclusive com resultados muito bons e com

valores de incertezas melhores que aquelas aqui encontradas, mas no Brasil esse dispositivo ainda não se encontra consolidado em aplicações voltadas para telecomunicações. Segundo informações disponíveis no *website* do Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), o país possui apenas um único laboratório acreditado nesta área.

O Inmetro utiliza a norma NBR ISO/IEC 17025 - Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração [2][3], que substituiu a norma ABNT ISO/IEC Guia 25 [4], como requisito para o credenciamento de laboratórios.

Neste trabalho descrevemos o roteiro completo para a caracterização da esfera integradora como padrão de referência de um laboratório de calibração, apresentando resultados que comprovam as vantagens de sua utilização [5]. Também tivemos como objetivo produzir uma publicação de consulta rápida e prática, que ajude desde estudantes até pesquisadores no entendimento dos conceitos relativos à metrologia aplicada ao uso da esfera integradora, servindo de guia para aplicações semelhantes.

1.1. Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado de forma a relatar em detalhes como foram executados os estudos para a completa caracterização da esfera integradora para seu emprego em um laboratório de calibração.

Primeiramente introduzimos uma explicação sobre a necessidade deste estudo e suas implicações positivas à metrologia, em especial ao Brasil. Seguimos com uma abordagem sobre o uso de padrões de medição utilizados na metrologia óptica, partindo dos padrões primários de medição e culminando nos padrões de transferência, que podem ser usados em laboratórios de calibração.

Embora não tenha sido operado neste trabalho, o radiômetro criogênico, devido a sua importância, é descrito de forma a apresentar suas principais características e princípios. Também é dada ênfase aos detectores do tipo armadilha óptica e aos detectores piroelétricos, por serem de grande utilidade em vários laboratórios. Cabe ressaltar que

diversos termos aqui empregados são citados exatamente como são definidos pelo Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia – VIM [6].

Uma teoria sobre a esfera integradora é apresentada com uma complexidade tal que seja suficiente para a aplicação a qual se destina nesse trabalho, sem penetrar em cálculos e simulações mais detalhados que não viriam a contribuir no momento à finalidade proposta. Àqueles interessados em aprofundar-se nesses estudos teóricos, indicamos diversas referências valiosas em locais estratégicos do texto de forma a permitir aprofundamento nos estudos quando isto for desejado.

Mantendo a preocupação em relatar exatamente como foram realizadas as experiências, procuramos descrevê-las neste trabalho em ordem cronológica, ou seja, descrevemos os experimentos na ordem em que foram realizados, sem deixar de existir uma relação lógica e facilidade de entendimento durante a leitura.

Seguindo essa premissa, mostramos os experimentos iniciais realizados, que provaram que o objetivo proposto poderia ser alcançado. Depois explicamos como foi realizada a calibração dos equipamentos que foram empregados nas fases seguintes.

Finalmente, nos experimentos finais, relatamos os últimos estudos que faltavam para validar os experimentos que foram realizados, inclusive descrevendo o procedimento de calibração para a esfera integradora.

Obviamente um trabalho desta categoria não estaria completo sem os cálculos metrológicos relacionados. Apresentamos como é realizado o cálculo da incerteza de medição e listamos as componentes de incerteza que julgamos importantes em nosso trabalho. A incerteza no processo é calculada e explicada, sempre justificando seus valores devidamente. Esses resultados são finalmente analisados, e na conclusão do trabalho explica-se porque os objetivos propostos foram alcançados com sucesso.

Terminamos listando nas referências bibliográficas um conjunto selecionado de documentos que permitiram a realização do presente trabalho com a confiabilidade necessária a todo estudo na área de metrologia.

Um anexo apresenta fotografias de montagens experimentais realizadas e planilhas completas dos principais cálculos efetuados.

1.2. Resumo das Contribuições

Seguem as principais contribuições deste trabalho:

- Estudo dos conceitos e princípios da esfera integradora em um grau de dificuldade compatível com um trabalho metrológico desta magnitude.
- Determinação da incerteza de medição de um radiômetro com esfera integradora para os procedimentos empregados.
- Determinação de um procedimento e sua avaliação na prática, utilizando-se equipamentos e laboratórios no Brasil.
- Comparação deste procedimento com os aplicados no exterior com ótimos resultados, mesmo utilizando equipamentos menos sofisticados.

2. PADRÕES DE MEDIÇÃO

O termo calibração é definido como o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões [6]. Padrões de medição são instrumentos, ou sistemas de medição, destinados a definir ou reproduzir uma unidade ou valores de uma grandeza para servir como referência [6]. Utilizamos padrões na calibração de instrumentos, que são usados para determinar o valor da grandeza de interesse através de medições.

O resultado de uma medição estará completo quando incluir o valor da incerteza de medição. Esta é definida como o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando [6]. A incerteza, portanto, informa sobre a precisão da medição. Este capítulo explicará os princípios que operam o radiômetro criogênico, principal padrão primário da atualidade. Também será estudado o funcionamento dos padrões de transferência utilizados neste trabalho.

2.1. Radiômetro Criogênico

Padrões primários são aqueles instrumentos designados, ou amplamente reconhecidos, como tendo as mais altas qualidades metrológicas, cujo valor é aceito sem referência a outros padrões de mesma grandeza [6]. Um padrão primário muito utilizado atualmente é o radiômetro de substituição elétrica.

O princípio de funcionamento deste radiômetro baseia-se no método da substituição elétrica, onde é comparada a potência da radiação incidente a ser medida com a potência elétrica de referência. O radiômetro possui uma cavidade com uma superfície absorvedora de baixa reflectância que absorve a radiação óptica e sofre aumento de temperatura. O feixe de *laser* precisa ser alinhado, estabilizado e preparado para que proporcione aquecimento homogêneo desta cavidade.

O detector aquece-se ao receber a radiação incidente, tendo a diferença de temperatura medida. Quando cessa a radiação, uma corrente elétrica de referência, com intensidade exatamente medida, aquece o detector a mesma temperatura, sendo então comparados os valores das potências óptica e elétrica.

A Fig. 2.1 apresenta um diagrama simplificado de um radiômetro de substituição elétrica. O fluxo total de radiação na entrada Φ_i é absorvido pela cavidade. Sua temperatura, T , e a temperatura do bloco de referência, T_0 , são monitoradas constantemente por sensores. Quando o *shutter* (obturador) é fechado, uma potência elétrica equivalente à potência óptica é aplicada pelo sistema, através do controle da corrente i_h , estabelecendo o valor da potência óptica [7].

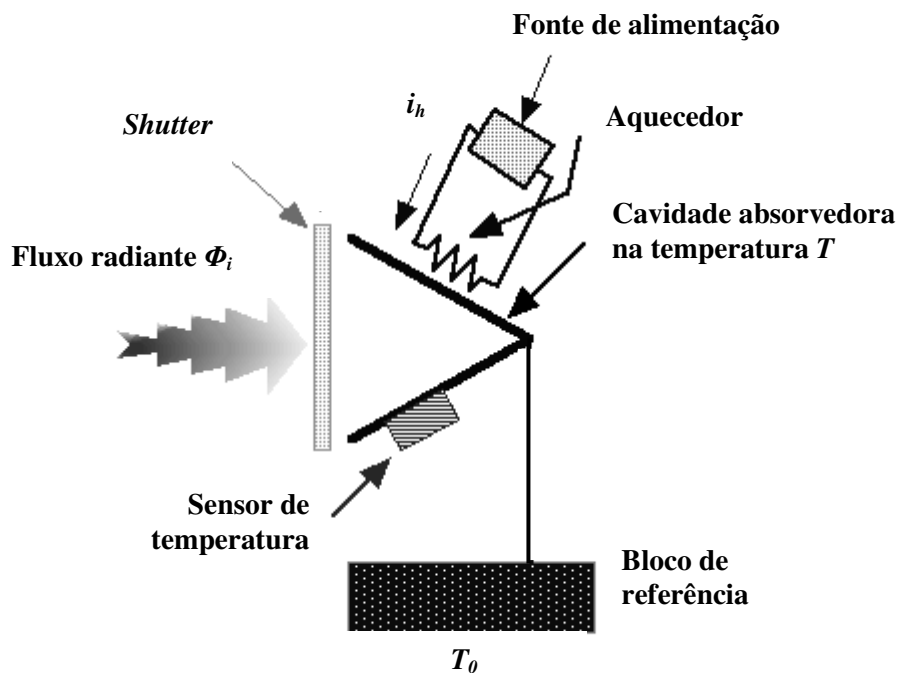


Fig. 2.1 - Diagrama simplificado de um radiômetro de substituição elétrica [7].

Radiômetros de substituição elétrica foram aperfeiçoados para operarem em temperaturas criogênicas, visando o aumento da sensibilidade e redução de incertezas de medição devido à radiação e perdas em condução, sendo chamados de radiômetros criogênicos.

A Fig. 2.2 apresenta um radiômetro criogênico de alta exatidão (HACR – *High Accuracy Cryogenic Radiometer*) do NIST (*National Institute of Standards and Technology*), onde destacamos a cavidade de absorção na qual é conectada uma fonte de calor fixada na temperatura de 5K. O interior do equipamento é esvaziado com uma bomba de vácuo, o que impede a transferência indesejável de calor por condução.

São usados reservatórios para líquidos criogênicos, como hélio e nitrogênio, para garantir a manutenção de uma baixa temperatura suficiente para a ótima operação da cavidade e do sistema de aquecimento elétrico [7]. A característica de supercondutividade de determinados materiais é utilizada em conjunto com esta temperatura criogênica para evitar perdas ôhmicas nos condutores e diminuir dissipação de calor que possa influenciar medições.

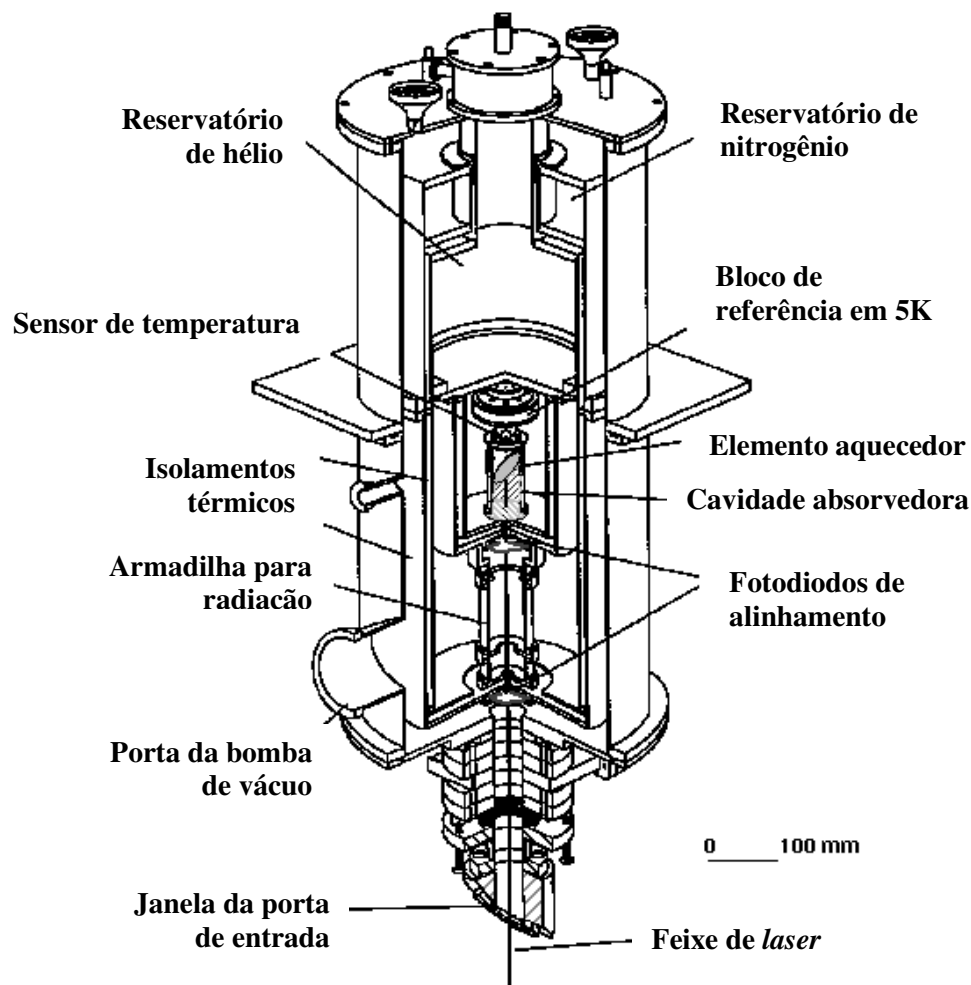


Fig. 2.2 - Radiômetro criogênico de alta exatidão do NIST [7].

Diversos institutos nacionais de metrologia possuem o radiômetro criogênico como padrão primário, pois este possui incerteza de medição extremamente baixa.

Esses institutos são responsáveis pela manutenção da rastreabilidade, que é a propriedade do resultado de uma medição, ou do valor de um padrão, estar relacionado a referências estabelecidas, através de uma cadeia contínua de comparações com incertezas conhecidas [6].

Radiômetros desse tipo possuem desempenhos impressionantes. Comparações entre dois equipamentos dessa categoria chegam a produzir diferenças nas calibrações de somente 0,04% a 0,07%, sendo que a tendência desses números é diminuir devido ao avanço tecnológico [8]. Eles são os mais exatos padrões radiométricos primários, com incerteza de medição da ordem de algumas partes em 10^4 , em medidas de potência óptica disponíveis atualmente [9].

O Inmetro possui um radiômetro desse tipo [10][11] com o objetivo de garantir a rastreabilidade dos laboratórios brasileiros ao que há de melhor em medição óptica.

O método utilizado para calibração de equipamentos usando o radiômetro criogênico é escolhido de forma a reunir as características de menor incerteza, menor tempo de calibração, simplicidade de medição e simplicidade dos requisitos mecânicos para alinhamento ou posicionamento [12].

A operação deste radiômetro é complexa e custosa o bastante para tornar seu uso muito restrito, impossibilitando sua operação como padrão de trabalho em um laboratório, onde um uso diário muitas vezes ocorre para calibrações de instrumentos de medição. Por esta razão, são utilizados padrões de transferência, que são aqueles utilizados como intermediários para comparar padrões [6].

A Fig. 2.3 apresenta uma técnica de medição. Um detector padrão de transferência é inserido no mesmo campo de radiação que é medido pelo radiômetro. Este padrão, portanto, é um equipamento calibrado diretamente com um radiômetro, podendo ser usado para a calibração de demais padrões e equipamentos [7].

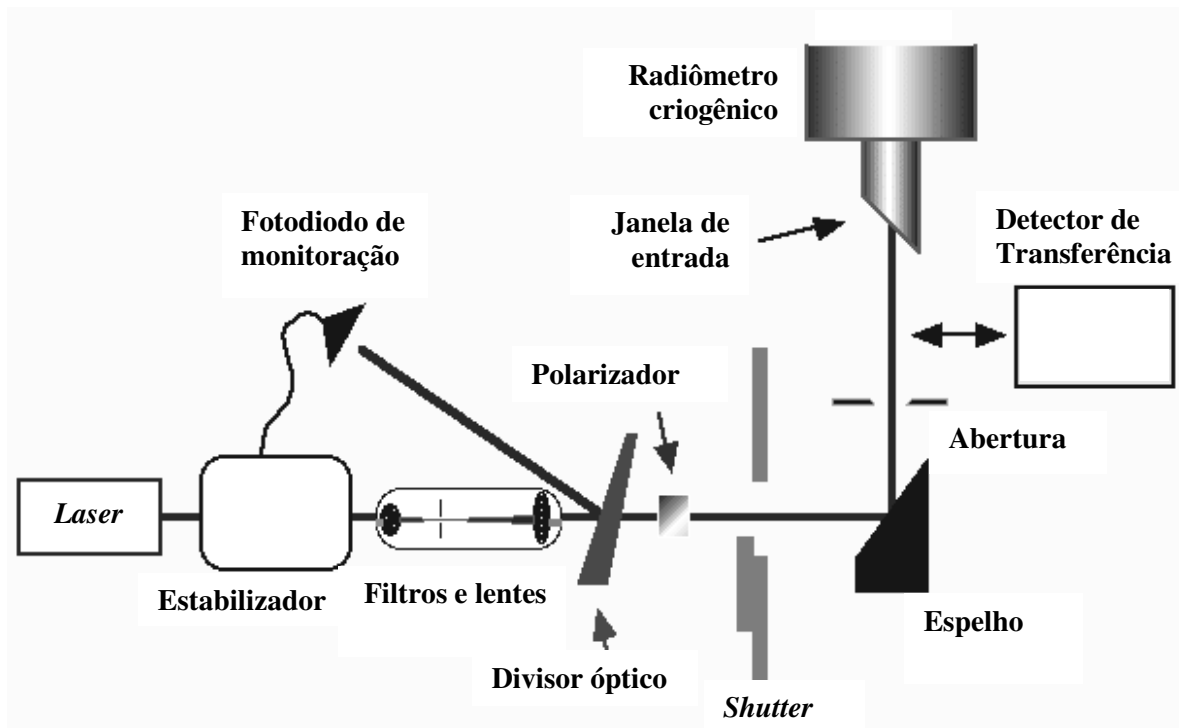


Fig. 2.3 - Esquema de montagem para uso do radiômetro criogênico [7].

2.2. Padrões de Transferência

Devido à complexidade na operação do radiômetro criogênico, são utilizados padrões de transferência, dentre eles destacando-se os detectores do tipo armadilha óptica e os detectores piroelétricos.

O radiômetro criogênico funciona segundo o princípio da medição de diferença de temperatura ocasionada pela absorção da radiação incidente, ou seja, o funcionamento é baseado no efeito térmico. Os detectores do tipo armadilha óptica, também chamados de detectores tipo *trap* [13], funcionam segundo o efeito fotoelétrico.

Os fotodetectores instalados em seu interior são construídos de forma que a energia dos fótons que incidem no semicondutor é usada para forçar a retirada dos elétrons da banda de valência levando-os para a banda de condução.

Através desta fotoionização, os fótons dão origem aos portadores de carga que, antes que se recombinem no interior do dispositivo, são movimentados por um campo elétrico gerando a corrente elétrica que será medida por um equipamento apropriado [14].

Os detectores ópticos que utilizam o conceito de armadilha óptica possuem sensores instalados em seu interior posicionados para formar uma armadilha para a radiação incidente. Dessa maneira, as reflexões que fatalmente ocorrem na superfície de um fotodetector podem ser absorvidas e medidas por outro, o que diminui os erros na medição.

A Fig. 2.4 apresenta uma configuração interna muito usada, com três fotodetectores dispostos geometricamente nos vértices de um cubo [15].

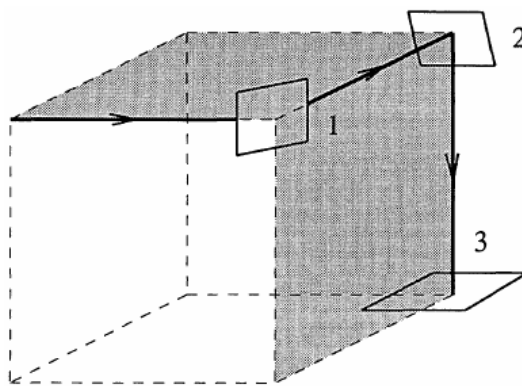


Fig. 2.4 - Configuração típica de um detector do tipo armadilha óptica [15].

Existem outros tipos de configurações para detectores do tipo armadilha óptica que apresentam ótimos resultados. A Fig. 2.5 apresenta uma dessas configurações, onde são usados dois detectores de silício com um espelho esférico [16]. Podemos observar, em três vistas, a orientação relativa dos fotodetectores, espelho côncavo e entrada de campo divergente proveniente de uma fibra óptica.

As principais vantagens na configuração tipo *trap* é a redução no efeito da reflectância, coeficiente da temperatura e a influência da não-uniformidade dos detectores [17][18][19].

Laboratórios de diferentes institutos de metrologia do mundo utilizam esses detectores como padrões de transferência para comparações de medições entre seus radiômetros criogênicos [20].

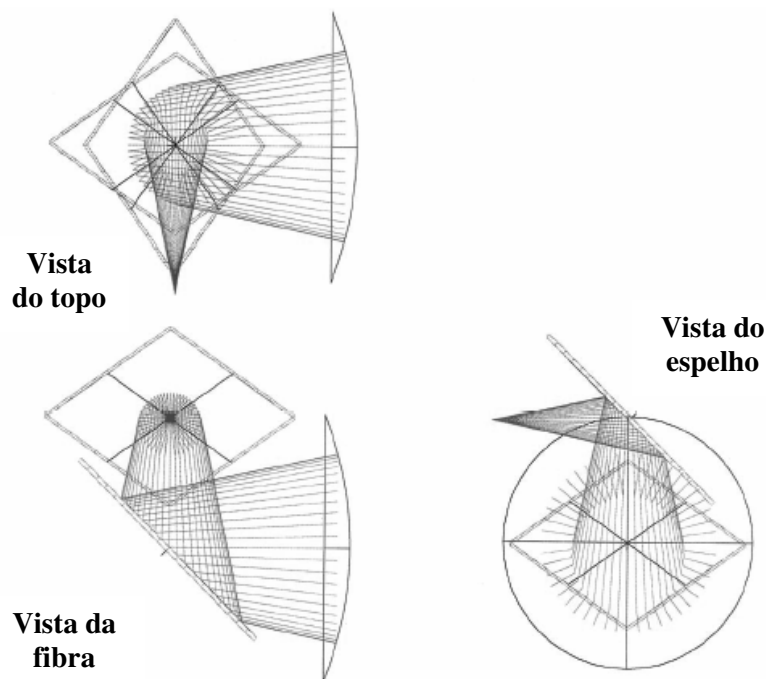


Fig. 2.5 - Detector do tipo armadilha óptica utilizando espelho esférico [16].

Os detectores do tipo armadilha óptica são muitas vezes utilizados como padrões de transferência na calibração de outros padrões, que por sua vez serão utilizados rotineiramente nos laboratórios de calibração. Nos laboratórios de calibração que trabalham na caracterização de equipamentos para telecomunicações, os medidores usados são otimizados para os comprimentos de onda mais utilizados em telecomunicações ópticas, tais como 1300nm e 1550nm.

O silício (Si) é o material comumente utilizado na primeira janela de transmissão (800-900nm), possuindo corte em 1060nm. Sendo inviável sua utilização na segunda (1300nm) e terceira janela (1550nm), nesses casos são utilizados o germânio (Ge) e materiais compostos como o InGaAs [14].

Os detectores baseados no efeito fotoelétrico, além de possuírem faixa espectral bastante limitada, são dependentes do comprimento de onda medido. Quando é necessária uma resposta espectral plana, ou seja, responsividade não dependente do comprimento de onda, são usados os detectores baseados no efeito térmico, sendo os mais comuns os detectores piroelétricos.

O princípio de funcionamento desses detectores é fundamentado no efeito piroelétrico, definido como a carga elétrica gerada, como resposta a variações de temperatura. São constituídos por material piroelétrico entre dois eletrodos de metal.

O material apresenta uma mudança na polarização elétrica com a variação da temperatura [21]. Se a fonte a ser medida irradiar de forma contínua, faz-se necessário uma modulação mecânica, utilizando-se um *chopper*, pois este tipo de detector somente responde a variações de potência da radiação [22]. O *chopper* possui um mecanismo que interrompe de maneira intermitente a passagem da radiação, fazendo com que ocorra sua modulação antes de atingir o detector.

3. ESFERA INTEGRADORA

Embora os medidores de potência óptica baseados em fotodetectores de germânio ou InGaAs sejam largamente empregados como padrões de referência em um dado laboratório, estes apresentam algumas deficiências, pois a radiação incidente atinge diretamente o fotodetector, ocasionando problemas principalmente devido às reflexões indesejáveis.

Radiômetros usando esferas integradoras conectadas em sua entrada de medição podem ser utilizados e trazer algumas vantagens.

No final do século XIX, o engenheiro alemão Ulbricht foi o primeiro a descrever o modelo da esfera integradora [23], sendo hoje também aplicável para comprimentos de onda de interesse em telecomunicações. Desde então, foram publicadas muitas discussões teóricas a respeito [24][25][26][27], demonstrando sua importância crescente para a metrologia.

A esfera acoplada a um radiômetro torna-se uma opção atraente como um padrão de referência na medição de potência óptica por apresentar menor incerteza de medição. Padrão de referência é definido como o padrão, geralmente tendo a mais alta qualidade metrológica disponível em um dado local ou em uma dada organização, a partir do qual as medições lá executadas são derivadas [6].

Por possuir também facilidade de operação e relativa robustez, a esfera integradora também pode ser utilizada como padrão de trabalho, que é aquele utilizado rotineiramente para calibrar ou controlar instrumentos de medição [6].

3.1. Estrutura e Teoria

A esfera integradora é uma estrutura de forma esférica com no mínimo duas aberturas, denominadas portas, sendo uma para a entrada da radiação e outra para a instalação do fotodetector. Essa estrutura é montada na entrada do equipamento de

medição, de forma que sua porta de entrada receba a radiação a ser medida. O fotodetector instalado na porta de saída captura a radiação refletida pelo interior da esfera e gera a fotocorrente que pode ser medida por um equipamento apropriado.

A esfera possui o interior revestido com um material especial que reflete e difunde a radiação incidente de maneira uniforme em todas as direções, representando dessa maneira uma superfície com reflexão difusa perfeita, também denominada superfície Lambertiana. A constante de tempo do dispositivo, ou seja, o tempo necessário para que as reflexões ocorram de forma que desapareça o transiente, varia de alguns nanossegundos até dezenas de nanossegundos [28], possibilitando medições rápidas.

A esfera integradora pode ser instalada na entrada de um radiômetro de forma a dar novas características ao conjunto, diminuindo a incerteza de medição e possibilitando que ela seja utilizada como padrão de trabalho ou até mesmo como padrão de referência do laboratório. A Fig. 3.1 apresenta duas vistas de uma esfera integradora montada em uma base retangular.

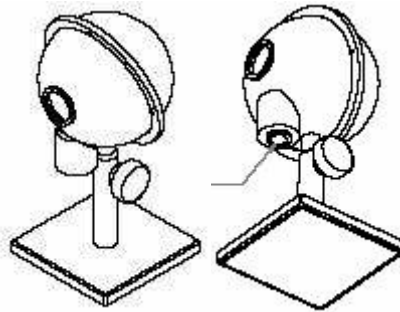


Fig. 3.1 - Esfera integradora montada em um suporte.

Segue uma explicação teórica simplificada, com um detalhamento suficiente para o entendimento do funcionamento da esfera integradora, sendo que uma teoria mais profunda pode ser encontrada em publicações relacionadas [29][30].

A esfera tem seu funcionamento baseado no princípio da troca de radiação entre superfícies difusoras [28]. Consideremos a troca de radiação entre dois elementos diferenciais de uma superfície difusora denominados de dA_1 e dA_2 , separados por uma distância S , conforme Fig. 3.2.

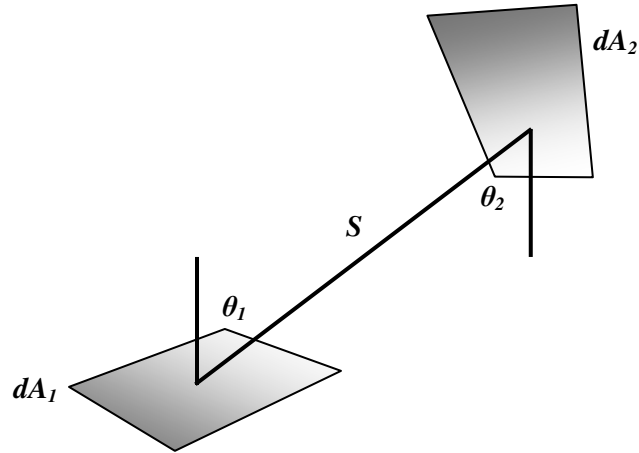


Fig. 3.2 - Troca de radiação entre duas superfícies difusoras [28].

A fração da energia que parte de dA_1 e incide sobre dA_2 é denominado fator de troca de radiação dF_{d1-d2} , dado por (1), onde θ_1 e θ_2 são ângulos medidos em relação às normais da superfície [28].

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (1)$$

Consideremos uma esfera de raio R com superfície interna difusora, possuindo esses dois elementos diferenciados dentro dela, conforme Fig. 3.3.

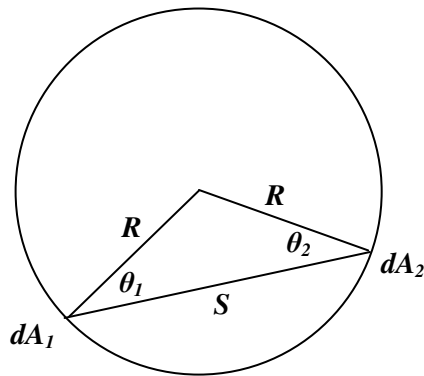


Fig. 3.3 - Esfera com superfície interna difusora [28].

Como a distância S entre os elementos é dada por (2), então o fator de troca dF_{d1-d2} é dado por (3).

$$S = 2R \cos \theta_1 = 2R \cos \theta_2 \quad (2)$$

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (3)$$

Pelas equações (2) e (3) notamos que o resultado independe dos ângulos θ_1 e θ_2 e das distâncias entre os elementos dA_1 e dA_2 , fazendo com que a fração do fluxo luminoso recebido por dA_2 seja sempre o mesmo para qualquer radiação emitida de qualquer ponto da superfície da esfera. Se a área infinitesimal dA_1 emitir radiação agora para uma área finita igual a A_2 , teremos o calculado em (4).

$$\int dF_{d1-d2} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2} \quad (4)$$

Como o resultado é independente de dA_1 , temos a relação descrita em (5), onde A_s representa a área interna total da esfera e a fração do fluxo radiante (F_{1-2}) recebido por A_2 é a razão entre A_2 e A_s .

$$F_{1-2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_s} \quad (5)$$

A radiação incidente na superfície interna da esfera integradora cria uma fonte de radiação virtual por reflexão, sendo essa fonte que emite radiação para o fotodetector, possibilitando sua medição.

O fluxo de radiação incidente é perfeitamente difundido na primeira reflexão, e depois de várias reflexões no interior da esfera, o fluxo total incidente em sua superfície é maior que o fluxo de entrada devido a múltiplas reflexões dentro da estrutura. Isso resulta em uma radiância L (densidade de fluxo por unidade de ângulo sólido) na superfície dada

por (6), onde Φ_i é o fluxo de entrada, A_s é a área atingida pela radiação, ρ é a reflectância da superfície interna da esfera e α é o ângulo sólido total projetado da superfície [28].

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\alpha A_s} \quad (6)$$

A esfera possui no mínimo duas aberturas, sendo uma para a entrada da radiação (A_I) e outra para o detector (A_o), como mostra a Fig. 3.4. Essas aberturas, além de não refletirem radiação, absorvem a radiação que nelas incidem, fazendo com que a radiância agora seja dada por (7), onde f representa a relação entre a soma das áreas das aberturas da estrutura e a área total (8).

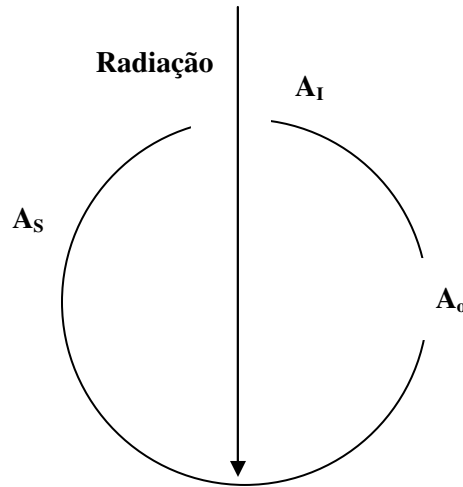


Fig. 3.4 - Esfera integradora e suas aberturas [28].

$$L = \frac{\Phi_i}{\alpha A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (7)$$

$$f = \frac{A_I + A_o}{A_s} \quad (8)$$

A constante de tempo das esferas integradoras, isto é, o tempo necessário para que as reflexões ocorram de forma que desapareça o transiente, tipicamente varia de alguns nanosegundos até dezenas de nanosegundos [31]. No projeto de esferas integradoras para determinadas aplicações, é possível calcular as dimensões de sua estrutura, bem como diâmetros e número de portas, visando à maximização de sua eficiência [32][33].

Devido à suas características, a esfera não apresenta problemas quanto ao alinhamento e variações angulares do feixe de radiação, e suas medições independem da não-uniformidade do detector, pois este captará radiação proveniente do interior da esfera e terá toda sua superfície iluminada uniformemente [28].

Para determinada área de aberturas, os parâmetros erro e eficiência diminuem com o aumento do diâmetro da esfera. Portanto, a escolha pelo melhor diâmetro para uma aplicação específica deve representar um compromisso entre a necessidade de uma grande esfera para minimizar o erro e uma pequena esfera para maximizar a eficiência [29].

Como o detector deve capturar a radiação uniforme do interior da estrutura, é necessário que esta radiação que passa pela porta de entrada não ilumine diretamente o detector ou a área da parede da esfera que esteja em seu campo de visão, conforme Fig. 3.5. Para que esta condição seja alcançada, muitas vezes é necessário o uso de anteparos, chamados de *baffles*, instalados dentro da esfera para bloquear a radiação em certas regiões, de acordo com a Fig. 3.6.

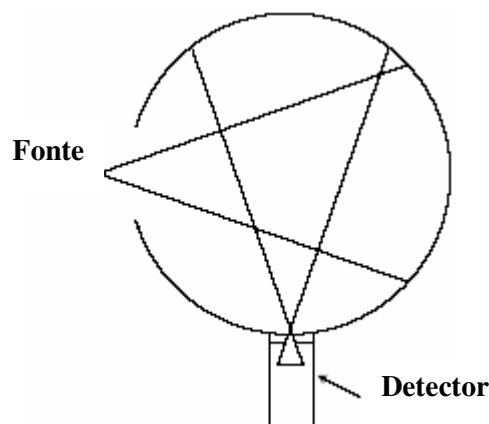


Fig. 3.5 - Campo de visão do detector da esfera integradora [28].

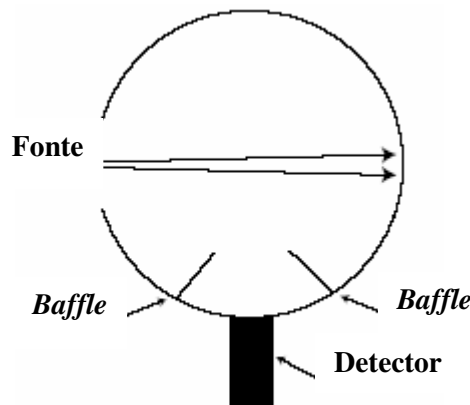


Fig. 3.6 - Esfera integradora com anteparos internos [28].

É importante que uma esfera possua o menor número possível de *baffles* em seu interior, pois mesmo sendo também revestidos do mesmo material, esses anteparos provocam uma indesejável perturbação dentro da estrutura, pois essa deixará de ser considerada uma forma esférica perfeita [28].

Projetistas estudam configurações específicas de esferas para minimizar erros de medição relacionados com o campo de visão do detector [34]. Em um projeto para uma aplicação específica, é importante o estudo não apenas do tamanho relativo do campo de visão do detector, mas também a posição relativa dos *baffles* e as dimensões de todas as portas [35].

As esferas podem também ser utilizadas como fontes de radiação uniformes. Estas podem ser adquiridas comercialmente ou projetadas e construídas em determinados laboratórios de pesquisa, obtendo-se resultados satisfatórios com custos inferiores.

Assim como na sua aplicação como medidora de radiação, uma esfera projetada como fonte de radiação também precisa respeitar determinados princípios básicos, como, por exemplo, o fluxo de entrada deve ser difundido e refletido diversas vezes antes de emergir pela porta de saída para assegurar uniformidade da radiação. Esta condição requer que as portas de entrada não devem ser “observáveis” diretamente por qualquer posição na porta de saída [36].

4. EXPERIMENTOS

Uma sequência de experimentos foi projetada para que os estudos, partindo dos conceitos mais abrangentes e genéricos, chegassem ao procedimento final para uma calibração real utilizando-se a esfera integradora. Dividimos esses experimentos em três fases, realizadas em laboratórios diferentes.

Os experimentos iniciais (Fase I) foram realizados no Laboratório de Radiometria (LARAD) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Inmetro, localizado em Xerém/RJ - Brasil.

As calibrações da esfera integradora e de um medidor sem esfera (Fase II) foram realizadas no Laboratório de Fibras Ópticas do Instituto Electrotécnico Português – IEP, localizado na cidade do Porto - Portugal.

A comprovação dos experimentos (Fase III) foi realizada no Laboratório de Calibração (LabCal) do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – Fundação CPqD, localizado em Campinas/SP - Brasil. A TABELA 4.1 resume o expicado.

TABELA 4.1 - EXPERIMENTOS REALIZADOS E SUAS FASES

Fase	Atividade	Laboratório	Instituição	País
I	Experimentos iniciais	LARAD	Inmetro	Brasil
II	Calibrações	Laboratório de Fibras Ópticas	IEP	Portugal
III	Experimentos finais	LabCal	CPqD	Brasil

4.1. Fase I – Experimentos Iniciais

Os experimentos iniciais foram realizados no Laboratório de Radiometria do Inmetro, cuja estrutura laboratorial e corpo técnico foram de grande importância.

O objetivo da Fase I foi verificar se os procedimentos utilizados estavam corretos e se todos os instrumentos envolvidos estavam em perfeito funcionamento, principalmente a esfera integradora e seu detector.

Aproveitando a boa infra-estrutura deste laboratório, realizamos alguns ensaios para verificar o comportamento do fotodetector trabalhando isoladamente e também acoplado à esfera, sendo obtidos resultados muito satisfatórios que comprovaram suas características principais.

Utilizamos primeiramente um detector do tipo armadilha óptica. Esse detector foi calibrado em 632,8nm para verificar um detector piroelétrico, tendo como fonte óptica um *laser* HeNe estabilizado em 632,8nm. Os equipamentos foram montados em uma bancada antivibratória com suspensão especial para perfeito alinhamento dos dispositivos.

O detector piroelétrico foi utilizado como padrão para verificar o desempenho do sistema formado pela esfera integradora. Este detector é especificado pelo fabricante para medições com erros menores que 1%, abrangendo uma faixa de comprimentos de onda variando de 600nm a 1550nm. Como ele possui intrinsecamente responsividade espectral uniforme, tornou-se nosso padrão para verificação também nos comprimentos de onda de interesse, ou seja, 1300nm e 1550nm.

Foi realizada a verificação do detector de germânio da esfera integradora isoladamente e também acoplado ao sistema, incluindo o pico-amperímetro para as leituras de corrente elétrica gerada. Essa verificação foi realizada utilizando-se *laser* nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm.

Os valores encontrados estão coerentes com os indicados na literatura para os detectores de germânio. Os valores para a esfera também estão coerentes com os informados em sua documentação. Os resultados indicaram que o método utilizado está correto e o sistema em perfeito funcionamento, motivando a continuação dos estudos na Fase II.

Neste trabalho foi empregada uma esfera integradora *Labsphere* [37], com as características constantes na TABELA 4.2, e um pico-amperímetro *Keithley* 6485 [38]. O interior desta esfera é recoberto por um material desenvolvido pela própria *Labsphere*, chamado de *Spectraflect* [39], que possui uma resposta espectral praticamente plana em

uma grande faixa de comprimentos de onda, tendo sua maior eficiência na faixa de 350nm a 2400nm.

TABELA 4.2 - DADOS DA ESFERA INTEGRADORA

Esfera integradora	<i>Labsphere</i> LPM-040-SF	
	Diâmetro	4 polegadas
	Diâmetro da porta do detector	0,5 polegadas
	Diâmetro da porta de entrada	1 polegada
Detector	GDA-050-U, germânio	
	Resposta espectral	800-1800nm
	Pico espectral:	1550nm
	Responsividade @ pico	0,9 A/W
	Campo de visão (<i>field-of-view</i>)	92°
	Área ativa	20mm ²
Revestimento	<i>Spectrafect</i>	
	Faixa espectral efetiva	350nm à 2400nm
	Refletividade em 600nm	96% a 98%

4.1.1. Método

Os experimentos da Fase I seguiram um procedimento semelhante ao utilizado pelo Centro Nacional de Metrologia do México – CENAM.

O CENAM utiliza o radiômetro criogênico e um *laser* HeNe estabilizado (632,8nm) para calibrar o padrão de transferência representado por um detector do tipo armadilha óptica. Este detector, também chamado detector tipo *trap*, por possuir três ou mais fotodetectores dispostos de maneira a absorver a radiação incidente sem perdas devido à reflectância, apresenta baixa incerteza de medição (menores que 1%).

Com a armadilha óptica calibrada em 632,8nm, é utilizado o mesmo *laser* HeNe para calibrar um detector piroelétrico que, por possuir responsividade espectral uniforme, é utilizado como padrão de transferência para calibrar os padrões de trabalho em comprimentos de onda diversos, como 1300nm e 1550nm. A Fig. 4.1 esquematiza o procedimento.

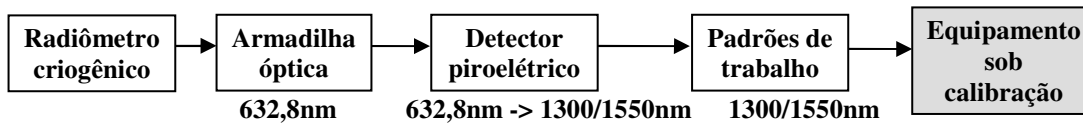


Fig. 4.1 - Procedimento do CENAM para calibração de seus padrões.

Na época dos experimentos, o radiômetro criogênico do Inmetro ainda não estava operacional. Portanto, empregamos um detector do tipo armadilha óptica que foi calibrado pelo próprio Inmetro utilizando-se como padrão outro detector do mesmo tipo, rastreado ao instituto nacional de metrologia francês (INM).

Então, de posse de um detector de armadilha óptica calibrado, verificamos um detector piroelétrico e usamos esse para a verificação da esfera integradora. Adicionalmente, também verificamos o detector de germânio da esfera montado separadamente. Esse procedimento que foi seguido está esquematizado na Fig. 4.2.

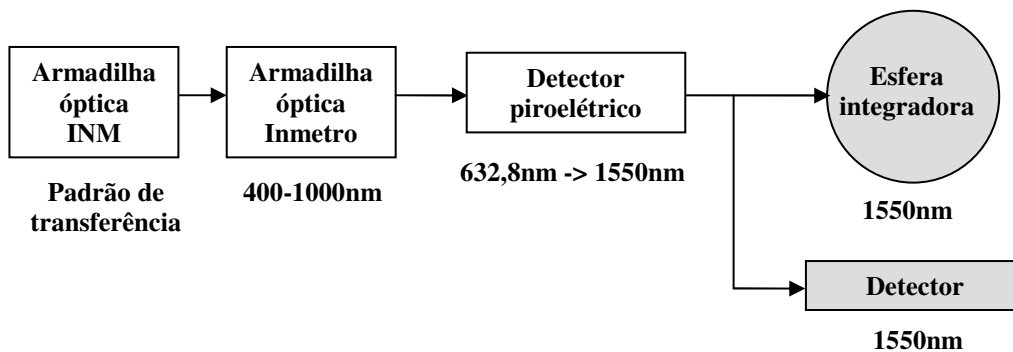


Fig. 4.2 - Procedimento utilizado para as verificações no Inmetro.

4.1.2. Verificação do Detector Piroelétrico

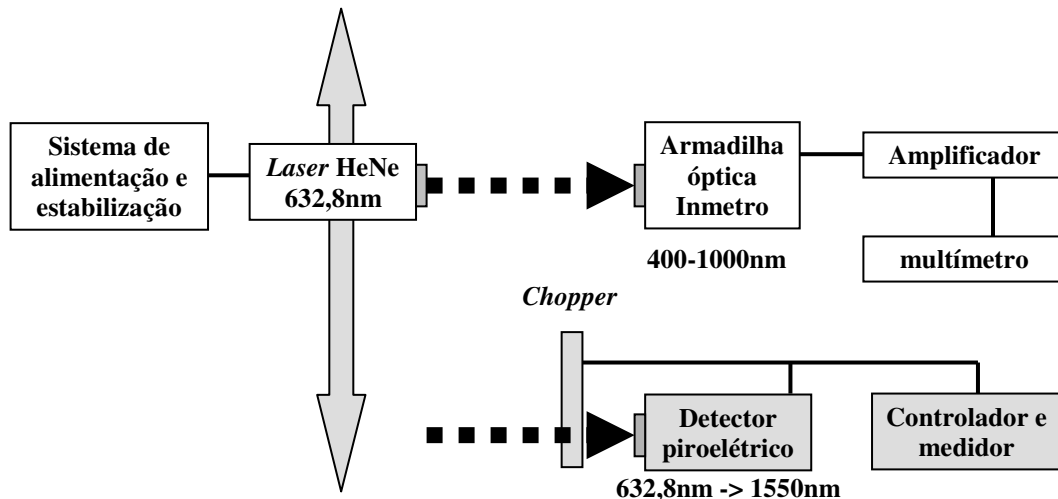
Realizamos a verificação do detector piroelétrico utilizando como padrão um detector do tipo armadilha óptica. A TABELA 4.3 apresenta os dados do detector piroelétrico, enquanto que a TABELA 4.4 lista os equipamentos usados na verificação. A montagem do experimento está esquematizada na Fig. 4.3.

TABELA 4.3 - DETECTOR PIROELÉTRICO VERIFICADO

Equipamento	Identificação	Certificado
Detector piroelétrico com <i>chopper</i>	<i>LaserProbe</i> RsP-590, N/S: 9609-033	Calibração do fabricante: 11/10/1999
Controlador do detector piroelétrico	<i>LaserProbe</i> RsP-5900, <i>Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer</i>	-

TABELA 4.4 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO

Equipamento	Identificação	Certificado
Detector de reflexão do tipo armadilha óptica - <i>trap</i> (padrão)	Larad, Hamamatsu S1337, DT068	Inmetro/DIMCI 1741/2005 (Larad), calibrado em 02/06/2005.
Amplificador de transimpedância	<i>Graseby Optronics Tramp</i> , com ganho selecionado em 10^5	Inmetro/DIMCI 1997/2004 (Latce), calibrado em 16/11/2004.
7 1/2 <i>Digit NanoVolt / Micro OhmMeter</i>	<i>Agilent</i> 34420A, para medição da corrente do detector de reflexão	Inmetro/DIMCI 0420/2005 (Latce), calibrado em 17/03/2005.
Fonte de <i>laser</i> HeNe estabilizada	<i>Melles-Griot</i> (~2mW)	Inmetro/DIMCI 1843/2002 (Laint), calibrado em 07/11/2002.
Bancada antivibratória	<i>Newport</i> RS2000, <i>Sealed Hole Table Top with Tuned Damping</i>	-

**Fig. 4.3 - Esquema de montagem para verificação do detector piroelétrico.**

Foram tomados diversos cuidados durante a verificação, de forma a minimizar as interferências que poderiam ocorrer nas leituras dos instrumentos. Em todas as verificações em que foi utilizado o detector piroelétrico, usamos uma proteção de papel ao redor de sua entrada, de maneira que possíveis variações da pressão do ar causadas pelo ambiente ou pelo próprio funcionamento rotativo do *chopper* não modificassem as medidas.

Realizamos um alinhamento cuidadoso do *laser* HeNe com os outros dispositivos, e optamos por realizar as medições rapidamente e em ambiente escuro. Listamos a seguir o procedimento usado no laboratório:

1. Desligar iluminação do laboratório, tornando o ambiente mais escuro possível.
2. Alinhar o *laser* HeNe e o detector do tipo armadilha óptica.
3. Fechar o *shutter* (obturador) para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras automatizadas de “zero” com um voltímetro.
4. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
5. Alinhar o *laser* HeNe e o detector piroelétrico.
6. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero”.
7. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
8. Alinhar o *laser* HeNe e o detector do tipo armadilha óptica.
9. Fechar o *shutter* (obturador) para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras automatizadas de “zero” com um voltímetro.
10. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.

O detector do tipo armadilha óptica usado como padrão neste experimento possui uma responsividade de 0,4799 A/W em 600nm, com incerteza de 0,88% (95%, $k=2$), conforme seu certificado de calibração emitido pelo Inmetro. Esse detector *trap* foi calibrado pelo Inmetro tendo como padrão outro detector de mesmo tipo rastreado ao INM/França. A TABELA 4.5 apresenta os dados referentes à verificação, e a TABELA 4.6 resume os resultados obtidos, sendo que os registros completos estão em anexo. O valor Δ corresponde à diferença entre as leituras com o *shutter* fechado e aberto.

TABELA 4.5 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO

Padrão	Detector <i>trap</i> rastreado ao radiômetro criogênico
Certificado	Inmetro/DIMCI 1741/2005 (LARAD), Cal: 02/06/2005, Val: 02/06/06
Fonte laser	<i>Melles-Griot</i> , estabilizado, HeNe, 632,8nm
Local	LARAD – Inmetro
Temperatura	20°C

TABELA 4.6 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR PIROELÉTRICO

Equipamento	Parâmetro	<i>Shutter</i> fechado (Zero)	<i>Shutter</i> aberto (leitura do <i>laser</i>)	Δ
Detector armadilha óptica - leitura 1	Média [V]	-2,013E-04	6,749E-01	6,751E-01
	Desvio padrão [V]	1,996E-06	1,169E-04	1,169E-04
Detector piroelétrico	Média [W]	1,198E-06	1,405E-05	1,285E-05
	Desvio padrão [W]	4,271E-09	1,046E-08	1,130E-08
Detector armadilha óptica - leitura 2	Média [V]	-1,408E-04	6,750E-01	6,752E-01
	Desvio padrão [V]	2,860E-06	2,384E-04	2,384E-04

A média final das leituras para o detector de armadilha óptica ($Média_{TRAP}$) é calculada conforme (9), e como o amplificador de transimpedância foi regulado para um ganho de 10^5 , temos a corrente (I_{TRAP}) gerada pelo detector de armadilha óptica de acordo com (10).

$$Média_{TRAP} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{6,751 \cdot 10^{-1} + 6,752 \cdot 10^{-1}}{2} = 6,752 \cdot 10^{-1} V \quad (9)$$

$$I_{TRAP} = \frac{Média_{TRAP}}{10^5} = \frac{6,752 \cdot 10^{-1}}{10^5} = 6,752 \cdot 10^{-6} A \quad (10)$$

Como o certificado deste detector indica uma responsividade ($resp_{TRAP}$) de 0,4799 A/W, então a potência (P_{TRAP}) medida pelo mesmo é dada por (11), onde I_{TRAP} é a corrente medida.

$$P_{TRAP} = \frac{I_{TRAP}}{resp_{TRAP}} = \frac{6,752 \cdot 10^{-6}}{0,4799} = 1,407 \cdot 10^{-5} W \quad (11)$$

Portanto, através de (12), calculamos o erro ($Erro_{PIRO}$) na leitura do detector piroelétrico, onde Δ_{PIRO} é a diferença entre as leituras do detector com o *shutter* fechado e aberto. Este valor em porcentagem ($Erro_{PIRO,\%}$) é dado por (13).

$$Erro_{PIRO} = \Delta_{PIRO} - P_{TRAP} = 1,285.10^{-5} - 1,407.10^{-5} = -1,222.10^{-6} W \quad (12)$$

$$Erro_{PIRO,\%} = \frac{Erro_{PIRO}}{P_{TRAP}}.100 = \frac{-1,222.10^{-6}}{1,407.10^{-5}}.100 = -8,68\% \quad (13)$$

4.1.3. Verificação do Detector da Esfera

Com o detector piroelétrico verificado em 632,8nm de acordo com o procedimento descrito anteriormente, e considerando sua uniformidade espectral, efetuamos a verificação do detector de germânio que posteriormente será acoplado à esfera integradora.

Para estimular o detector piroelétrico e o detector de germânio, que foram montados e cuidadosamente alinhados na bancada antivibratória, utilizamos uma fonte *laser* de comprimento de onda de 1550nm com potência de saída estabilizada em aproximadamente 0dBm (1mW). Essa fonte foi verificada quanto sua estabilidade no medidor de comprimento de onda *Wavemeter Burleigh* (N/S: 0019160).

A fonte *laser* foi acoplada em uma fibra óptica monomodo (*singlemode* - SM) com conector óptico tipo FC. A extremidade de saída da fibra foi conectada em uma lente que convergia o feixe e diminuía seu espalhamento.

Um pico-amperímetro foi utilizado para as leituras de corrente elétrica gerada pelo detector de germânio.

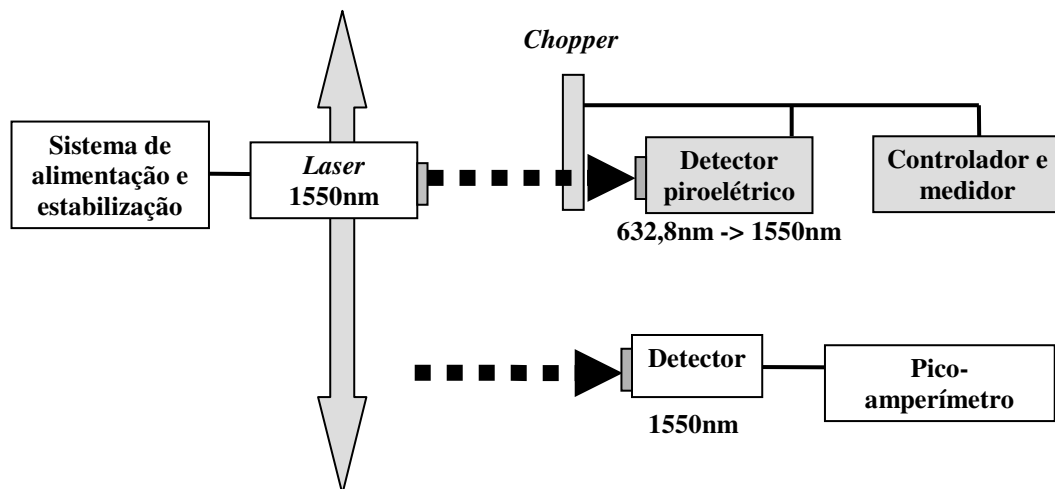
A TABELA 4.7 apresenta as informações sobre o detector da esfera. Os equipamentos empregados na verificação estão listados na TABELA 4.8. A montagem usada foi semelhante à anterior, conforme Fig. 4.4.

TABELA 4.7 - DETECTOR DA ESFERA VERIFICADO

Equipamento	Identificação	Certificado
Detector de germânio	GDA-050-U	<i>Labsphere</i> ID# 41011, <i>Report#</i> 41011-1-1, Data cal: 22/12/2003
Pico-amperímetro	<i>Keithley</i> 6485 N/S 0975780 (mede corrente do detector)	Cert: DKD-K-01901-7382, Data cal: jan/2004

TABELA 4.8 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA

Equipamento	Identificação	Certificado
Detector piroelétrico com <i>chopper</i> (padrão)	<i>LaserProbe</i> RsP-590, N/S: 9609-033	Calibração do fabricante: 11/10/1999
Controlador do detector piroelétrico	<i>LaserProbe</i> RsP-5900, <i>Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer</i>	-
Fonte de <i>laser</i> HeNe estabilizada	<i>Melles-Griot</i> (~2mW)	Inmetro/DIMCI 1843/2002 (Laint), calibrado em 07/11/2002.
Fonte de <i>laser</i> , diodo IR 1550nm	<i>ThorLabs</i> – S1FC1550 – N/S: 010618-1, LARAD RC-09	-
Amplificador de transimpedância	<i>Graseby Optronics Tramp</i> , com ganho selecionado em 10^5	Inmetro/DIMCI 1997/2004 (Latce), calibrado em 16/11/2004.
Bancada antivibratória	<i>Newport RS2000, Sealed Hole Table Top with Tuned Damping</i>	-

**Fig. 4.4 - Esquema de montagem para verificação do detector da esfera.**

Novamente foram tomadas várias precauções durante as medições para minimizar as interferências que poderiam ocorrer nas leituras dos instrumentos.

O *laser* HeNe foi utilizado primeiramente para o alinhamento por possuir um feixe visível (comprimento de onda de 632,8nm), sendo depois substituído pelo *laser* com comprimento de onda de 1550nm, que é invisível (infravermelho). Optamos também por realizar as medições rapidamente e em ambiente escuro.

Listamos a seguir o procedimento usado no laboratório:

1. Desligar iluminação do laboratório, tornando o ambiente mais escuro possível.
2. Alinhar o *laser* 1550nm e o detector piroelétrico.
3. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero”.
4. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
5. Alinhar o *laser* 1550nm e o detector de germânio.
6. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero” no pico-amperímetro.
7. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
8. Alinhar o *laser* 1550nm e o detector piroelétrico.
9. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero”.
10. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.

A TABELA 4.9 apresenta os dados referentes à verificação, e a TABELA 4.10 resume os resultados obtidos, sendo que os registros completos estão em anexo.

O valor Δ corresponde à diferença entre as leituras com o *shutter* fechado e aberto.

TABELA 4.9 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA

Padrão	Detector piroelétrico rastreado ao detector de armadilha óptica
Certificado	-
Fonte laser	ThorLabs, 1550 nm
Local	LARAD – Inmetro
Temperatura	20°C

TABELA 4.10 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DO DETECTOR DA ESFERA

Equipamento	Parâmetro	Shutter fechado (Zero)	Shutter aberto (leitura do laser)	Δ
Detector piroelétrico leitura 1	Média [W]	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03
	Desvio padrão [W]	0,000E+00	1,524E-06	1,524E-06
Detector de germânio	Média [A]	3,999E-10	9,261E-04	9,261E-04
	Desvio padrão [A]	3,445E-11	1,194E-06	1,194E-06
Detector piroelétrico leitura 2	Média [W]	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03
	Desvio padrão [W]	0,000E+00	1,751E-06	1,751E-06

A média final das leituras para o detector piroelétrico ($Média_{PIRO}$) é calculada conforme (14).

$$Média_{PIRO} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{1,003 \cdot 10^{-3} + 1,003 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,003 \cdot 10^{-3} W \quad (14)$$

Como o erro do detector piroelétrico ($Erro_{PIRO, \%}$), calculado na verificação anterior, é de -8,68%, com (15) calculamos o erro presente em sua leitura em unidade de potência (Watt), representado por $Erro_{PIRO, W}$.

$$Erro_{PIRO, W} = \left(\frac{Erro_{PIRO, \%}}{100} \right) \cdot Média_{PIRO} = \left(\frac{-8,68}{100} \right) \cdot 1,003 \cdot 10^{-3} = -8,71 \cdot 10^{-5} W \quad (15)$$

Devemos subtrair este erro da média das leituras para obter-se a média corrigida das leituras ($Média_{PIRO, CORR}$), de acordo com (16).

$$Média_{PIRO,CORR} = Média_{PIRO} - Erro_{PIRO,W} = 1,003.10^{-3} - (-8,71.10^{-5}) = 1,09.10^{-3} W \quad (16)$$

Possuindo a média das leituras do detector de germânio ($Média_{DETEC}$) e a média corrigida das leituras do detector piroelétrico, calculamos a responsividade ($resp_{DETEC}$) do primeiro com (17).

$$resp_{DETEC} = \frac{Média_{DETEC}}{Média_{PIRO,CORR}} = \frac{9,261.10^{-4}}{1,09.10^{-3}} = 0,85 A/W \quad (17)$$

O valor encontrado para a responsividade do detector de germânio está coerente com o valor dado pela literatura, atestando o perfeito funcionamento do mesmo e validando nossos procedimentos e cálculos.

4.1.4. Verificação da Esfera Integradora

Utilizando-se a mesma montagem para a verificação do detector de germânio, efetuamos a verificação da esfera integradora utilizando como equipamento padrão o detector piroelétrico.

Com o detector piroelétrico verificado em 632,8nm, efetuamos a verificação do conjunto formado pela esfera integradora e o detector de germânio devidamente acoplado na mesma. Utilizamos a mesma fonte *laser* de comprimento de onda de 1550nm com potência de saída em 0dBm (1mW).

A fonte *laser* foi acoplada a uma fibra óptica monomodo com conector óptico tipo FC. A extremidade de saída da fibra foi conectada em uma lente usada para a convergência do feixe e redução de seu espalhamento. O pico-amperímetro foi utilizado para as leituras de corrente elétrica gerada pelo detector.

Um adaptador (para fibra óptica) tipo FC conectado à porta de entrada da esfera integradora foi retirado, sendo substituído por um disco contendo um orifício circular. O diâmetro deste disco é igual ao diâmetro da entrada do detector piroelétrico (~ 8mm), de forma que a geometria das entradas dos equipamentos onde a radiação incide seja

equivalente. A face do disco que permanecia voltada para o interior da esfera foi coberta com papel-cartão branco, simulando uma superfície refletora difusa, semelhante ao revestimento interno da esfera.

A TABELA 4.11 apresenta os dados relativos à esfera integradora. Os equipamentos empregados em sua verificação estão listados na TABELA 4.12. A montagem usada foi semelhante a anterior, conforme apresentada pela Fig. 4.5

TABELA 4.11 - ESFERA INTEGRADORA VERIFICADA

Equipamento	Identificação	Certificado
Esfera integradora	<i>Labsphere</i> LPM-040-SF, CPqD033471	<i>Labsphere</i> ID# 41011, Report# 41011-1-1, Data cal: 22/12/2003
Detector de germânio	GDA-050-U	<i>Labsphere</i> ID# 41011, Report# 41011-1-1, Data cal: 22/12/2003
Pico-amperímetro (mede corrente do detector)	<i>Keithley</i> 6485, N/S: 0975780	Cert: DKD-K-01901-7382, Data cal: jan/2004

TABELA 4.12 - EQUIPAMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA

Equipamento	Identificação	Certificado
Detector piroelétrico com <i>chopper</i> (Padrão)	<i>LaserProbe</i> RsP-590, N/S: 9609-033	Calibração do fabricante: 11/10/1999
Controlador do detector piroelétrico	<i>LaserProbe</i> RsP-5900, <i>Electrically Calibrated Pyroelectric Radiometer</i>	-
Fonte de <i>laser</i> HeNe estabilizada	<i>Melles-Griot</i> (~2mW)	Inmetro/DIMCI 1843/2002 (Laint), calibrado em 07/11/2002.
Fonte de <i>laser</i> , diodo IR 1550nm	<i>ThorLabs</i> – S1FC1550 – N/S: 010618-1, LARAD RC-09	-
Amplificador de transimpedância	<i>Graseby Optronics Tramp</i> , com ganho selecionado em 10^5	Inmetro/DIMCI 1997/2004 (Latce), calibrado em 16/11/2004.
Bancada antivibratória	<i>Newport</i> RS2000, <i>Sealed Hole Table Top with Tuned Damping</i>	-

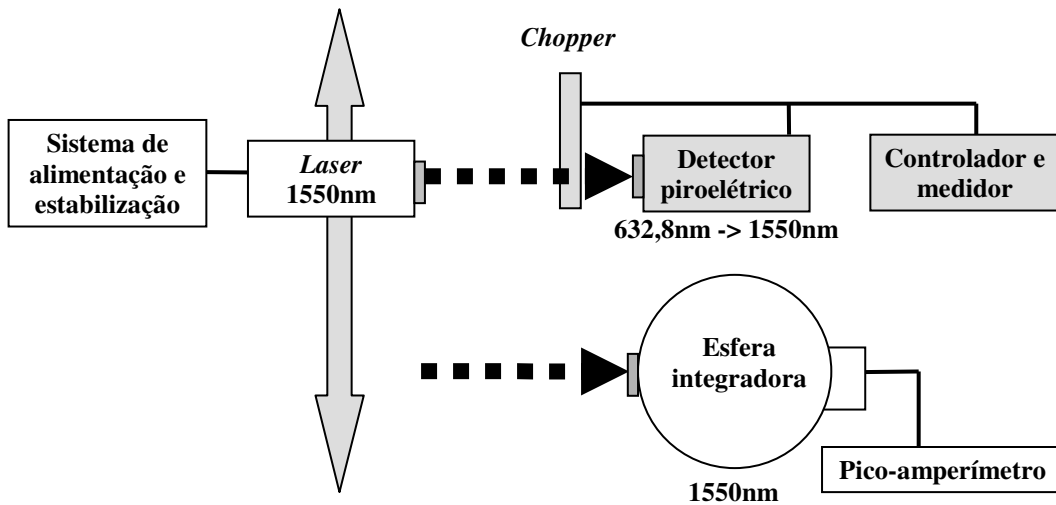


Fig. 4.5 - Esquema de montagem para verificação da esfera integradora.

Para a verificação da esfera integradora tomamos as mesmas precauções que a verificação de seu detector, principalmente quanto ao alinhamento do feixe. A seguir temos o procedimento utilizado:

1. Desligar iluminação do laboratório, tornando o ambiente mais escuro possível.
2. Alinhar o *laser* 1550nm e o detector piroelétrico.
3. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero”.
4. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
5. Alinhar o *laser* 1550nm e a porta de entrada da esfera integradora.
6. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero” no pico-amperímetro.
7. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.
8. Alinhar o *laser* 1550nm e o detector piroelétrico.
9. Fechar o *shutter* para interromper o feixe incidente e fazer 10 leituras manuais de “zero”.
10. Abrir *shutter* e fazer outras 10 leituras.

A TABELA 4.13 apresenta os dados referentes à verificação, e a TABELA 4.14 resume os resultados obtidos, sendo que os registros completos estão em anexo. O valor Δ é a diferença entre as leituras com o *shutter* fechado e aberto.

TABELA 4.13 - DADOS DA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA

Padrão	Detector piroelétrico rastreado ao detector de armadilha óptica
Certificado	-
Fonte <i>laser</i>	<i>ThorLabs</i> , 1550 nm
Local	LARAD – Inmetro
Temperatura	20°C

TABELA 4.14 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA

Equipamento	Parâmetro	<i>Shutter</i> fechado (Zero)	<i>Shutter</i> aberto (leitura do <i>laser</i>)	Δ
Detector piroelétrico leitura 1	Média [W]	0,000E+00	1,141E-03	1,141E-03
	Desvio padrão [W]	0,000E+00	1,370E-06	1,370E-06
Esfera Integradora com detector	Média [A]	4,249E-11	5,236E-08	5,232E-08
	Desvio padrão [A]	3,470E-11	1,383E-10	1,348E-10
Detector piroelétrico leitura 2	Média [W]	0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03
	Desvio padrão [W]	0,000E+00	1,663E-06	1,663E-06

A média final das leituras para o detector piroelétrico ($Média_{PIRO}$) é calculada de acordo com (18).

$$Média_{PIRO} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} = \frac{1,141 \cdot 10^{-3} + 1,137 \cdot 10^{-3}}{2} = 1,139 \cdot 10^{-3} W \quad (18)$$

Como o erro do detector piroelétrico ($Erro_{PIRO,\%}$) é de -8,68%, com (19) novamente calculamos qual o erro presente em sua leitura em unidade de potência (watt), denominado $Erro_{PIRO,W}$.

$$Erro_{PIRO,W} = \left(\frac{Erro_{PIRO,\%}}{100} \right) \cdot Média_{PIRO} = \left(\frac{-8,68}{100} \right) \cdot 1,139 \cdot 10^{-3} = -9,89 \cdot 10^{-5} W \quad (19)$$

Este erro deve ser subtraído da média das leituras para obter-se a média corrigida das leituras ($Média_{PIRO,CORR}$), conforme (20).

$$Média_{PIRO,CORR} = Média_{PIRO} - Erro_{PIRO,W} = 1,139.10^{-3} - (-9,89.10^{-5}) = 1,24.10^{-3} W \quad (20)$$

Possuindo a média das leituras da esfera integradora ($Média_{ESF}$) e a média corrigida das leituras do detector piroelétrico, calculamos a responsividade ($resp_{ESF}$) do primeiro de acordo com (21).

$$resp_{ESF} = \frac{Média_{ESF}}{Média_{PIRO,CORR}} = \frac{5,232.10^{-8}}{1,24.10^{-3}} = 4,23.10^{-5} A/W \quad (21)$$

A responsividade encontrada para a esfera integradora em conjunto com seu detector é de $4,227.10^{-5} A/W$, muito próximo do apresentado no certificado de calibração da esfera realizado pelo fabricante em 2003 ($4,50.10^{-5} A/W$; 1550nm) [40].

Os resultados conseguidos na Fase I dos experimentos mostraram que os procedimentos que utilizamos estavam corretos e que todos os equipamentos associados estavam em perfeito funcionamento.

4.2. Fase II – Calibrações

A Fase II dos experimentos foi realizada no Laboratório de Fibras Ópticas do IEP, cuja estrutura laboratorial e conjunto de padrões permitiram a obtenção de resultados. A colaboração do laboratório do IEP foi importante porque o mesmo é um órgão reconhecido pelo Inmetro. Esse órgão possui as rastreabilidades devidamente comprovadas e documentadas, aumentando consideravelmente a confiabilidade dos resultados.

Nessa fase foram realizadas as calibrações da esfera integradora e de um medidor que não utiliza esfera, para que comparações diretas entre esses dois instrumentos fossem possíveis.

4.2.1. Calibração da Esfera Integradora

Como sabemos, a esfera integradora opera em conjunto com outros dispositivos, sendo que o principal continua sendo o detector óptico de germânio localizado em sua porta de saída. A corrente originada pelo detector é captada por um pico-amperímetro. Portanto, todos esses dispositivos serão calibrados em conjunto, formando um único sistema de medição.

Quando o texto fizer referências às leituras, erros e incertezas de medição citando a esfera integradora, estes valores aplicam-se ao sistema completo de medição, incluindo a própria esfera, o detector acoplado e não mais separado de sua porta, e o pico-amperímetro, conforme TABELA 4.15.

TABELA 4.15 - SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NA ESFERA INTEGRADORA

Equipamento	Identificação
Esfera integradora	<i>Labsphere</i> LPM-040-SF, CPqD033471
Detector de germânio	GDA-050-U
Pico-amperímetro (mede corrente do detector)	<i>Keithley</i> 6485, N/S: 0975780

Para a calibração, foram utilizados *lasers* nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm. Foi utilizada como padrão uma esfera integradora do IEP de 2 polegadas de diâmetro, calibrada com rastreabilidade a instituições européias reconhecidas pelo Inmetro.

Os certificados de calibração emitidos forneceram os valores de responsividade do sistema e as respectivas incertezas de medição para cada comprimento de onda calibrado.

Realizamos duas calibrações, sendo todas centradas nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm, mas usando *lasers* diferentes, resultando em dois certificados de calibração distintos.

4.2.1.1. Primeira Calibração da Esfera

O padrão de medição foi um radiômetro de esfera integradora do IEP de 2 polegadas de diâmetro calibrado no IFA (Instituto de Física Aplicada) em Madrid/Espanha, tendo rastreabilidade a um radiômetro criogênico espanhol. Sua corrente é captada por um pico-amperímetro (*Newport*) acoplado via cabo com conector BNC.

Foram usadas duas fontes *laser Fabry-Perot* nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm, ambas conectadas ao módulo principal HP8153A [41] e com certificados de calibração [42] emitidos pelo mesmo laboratório do IEP. O atenuador óptico HP8156A foi usado para aplicação de atenuação ao sistema para calibração de linearidade de potência. As fibras ópticas empregadas em toda a Fase II de experimentos foram do tipo monomodo, e todas as montagens foram realizadas sobre uma bancada antivibratória especial. A TABELA 4.16 lista os equipamentos usados na primeira calibração da esfera.

TABELA 4.16 - EQUIPAMENTOS PARA A PRIMEIRA CALIBRAÇÃO DA ESFERA

Equipamento	Identificação	Certificado
Radiômetro de esfera integradora ($\sim 2''$) com detector de InGaAs	Esfera 2, LFO960, com detector CA-03723-000/CSTM-DH-050	Cert: 2355, Cal: 25/02/2005.
<i>Picoammeter Type SPO 44ABC – Newport</i>	LFO958, N/S: C328. Leitura de corrente elétrica das esferas	Cert IEP: 0824/2003, Cal: 12/06/03; Próx Cal: 11/06/06.
<i>Lightwave Multimeter</i>	HP8153A, N/S: 2946G02421	Cal: 08/08/95, Próx Cal: 07/08/96
<i>Laser Source 1550nm</i>	HP81553SM	-
<i>Laser Source 1300nm</i>	HP81552SM	-
<i>Optical Attenuator, 1300/1550nm, SM, APC</i>	HP8156A, LFO962	IEP. Cal: 03/09/2003. Próx Cal: 03/09/2006
<i>Optical Table – Steel Honeycomb Core</i>	TMC (<i>Technical Manufacturing Corp.</i>) USA - Model: 78-235-12, N/S: 11882	-

A Fig. 4.6 apresenta o esquema de montagem para a calibração da esfera em potência óptica e a Fig. 4.7 apresenta o esquema para a calibração de linearidade, onde um atenuador ajustável é usado na montagem para determinar níveis de atenuação. Em ambos

foram realizadas medições alternadas no padrão (esfera do IEP) e equipamento sob calibração (esfera *Labsphere*).

Nas Fases II e III de nosso trabalho, como usamos fibras ópticas e não feixes de *laser*, a esfera possui o adaptador óptico FC original acoplado na porta de entrada.

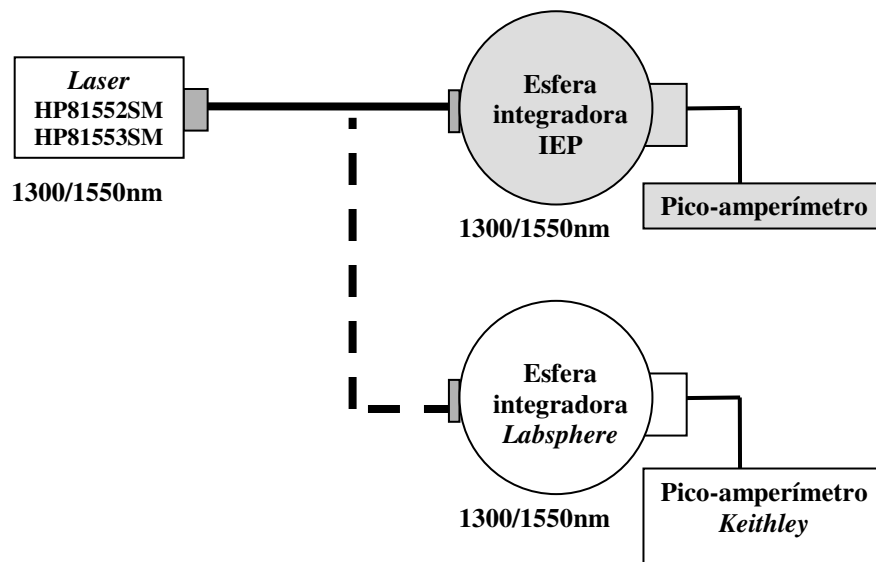


Fig. 4.6 - Esquema para calibração em potência óptica da esfera integradora.

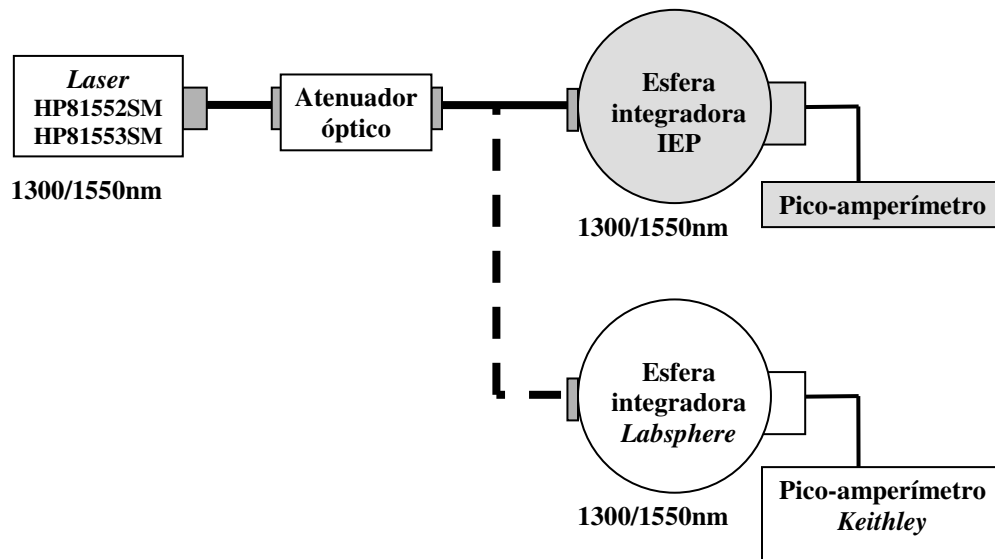


Fig. 4.7 - Esquema para calibração em linearidade da esfera integradora.

A incerteza em linearidade, para os dois comprimentos de onda, foi de $\pm 0,02\text{dB}$. Os resultados relacionados à potência óptica estão na TABELA 4.17. Todos esses valores constam no certificado de calibração emitido pelo IEP [43].

TABELA 4.17 - PRIMEIRA CALIBRAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA

Comprimento de onda	Média das leituras no padrão	Média das leituras na esfera <i>Labsphere</i>	Responsividade	Incerteza de medição $k = 2$ (95%)
[nm]	[μW]	[μA]	[A/W]	$\pm[\text{A/W}]$
1300	1015,20	0,07086	6,980E-05	7,7E-07
1550	1070,59	0,05194	4,852E-05	5,4E-07

As incertezas de medição expressas em porcentagem, chamadas de $u_{ESF,1300,\%}$ e $u_{ESF,1550,\%}$, são calculadas por (22) e (23), onde $u_{CAL,ESF}$ é a incerteza e $resp_{CAL,ESF}$ é a responsividade dada na tabela.

$$u_{ESF,1300,\%} = \left(\frac{u_{CAL,ESF,1300}}{resp_{CAL,ESF,1300}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{7,7 \cdot 10^{-7}}{6,980 \cdot 10^{-5}} \right) \cdot 100 = 1,10\% \quad (22)$$

$$u_{ESF,1550,\%} = \left(\frac{u_{CAL,ESF,1550}}{resp_{CAL,ESF,1550}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{5,4 \cdot 10^{-7}}{4,852 \cdot 10^{-5}} \right) \cdot 100 = 1,11\% \quad (23)$$

4.2.1.2. Segunda Calibração da Esfera

A TABELA 4.18 apresenta os equipamentos usados na segunda calibração da esfera, que foi realizada com a finalidade de mostrar seu comportamento usando fontes de radiação com espectros ópticos ligeiramente diferentes. O padrão de medição também foi o mesmo radiômetro de esfera integradora do IEP. Sua corrente é captada pelo mesmo pico-amperímetro usado anteriormente.

Nesta segunda calibração foram utilizadas duas fontes *laser* sintonizáveis, com um espectro óptico mais estreito e cuja sintonia permite uma pequena varredura em valores de

comprimentos de onda próximos à 1300nm e 1550nm. Essas fontes *laser* são conectadas ao módulo principal *Photonetics*.

TABELA 4.18 - EQUIPAMENTOS PARA A SEGUNDA CALIBRAÇÃO DA ESFERA

Equipamento	Identificação	Certificado
Radiômetro de esfera integradora (~2'') com detector de InGaAs	Esfera 2, LFO960, com detector CA-03723-000/CSTM-DH-050	Cert: 2355, Cal: 25/02/2005.
<i>Picoammeter Type SPO 44ABC – Newport</i>	LFO958, N/S: C328. Leitura de corrente elétrica das esferas	Cert IEP: 0824/2003, Cal: 12/06/03; Próx Cal: 11/06/06.
<i>Wavelength Tunable Laser Diode Source</i>	<i>Photonetics, Tunics-PR</i> , 3642CR00, N/S: 101907	-
<i>Module Photonetics</i>	<i>Tunics 1300</i> , 3642HE13, N/S: 101688	-
<i>Module Photonetics</i>	<i>Tunics 1550</i> , 3642HE15, N/S: 101907	-
<i>Optical Table – Steel Honeycomb Core</i>	TMC (<i>Technical Manufacturing Corp.</i>) USA - Model: 78-235-12, N/S: 11882	-

O esquema da montagem para essa calibração é apresentado na Fig. 4.8. Usando procedimento semelhante ao anterior, também foram tomadas medições alternadas no padrão (esfera IEP) e equipamento sob calibração (esfera *Labsphere*).

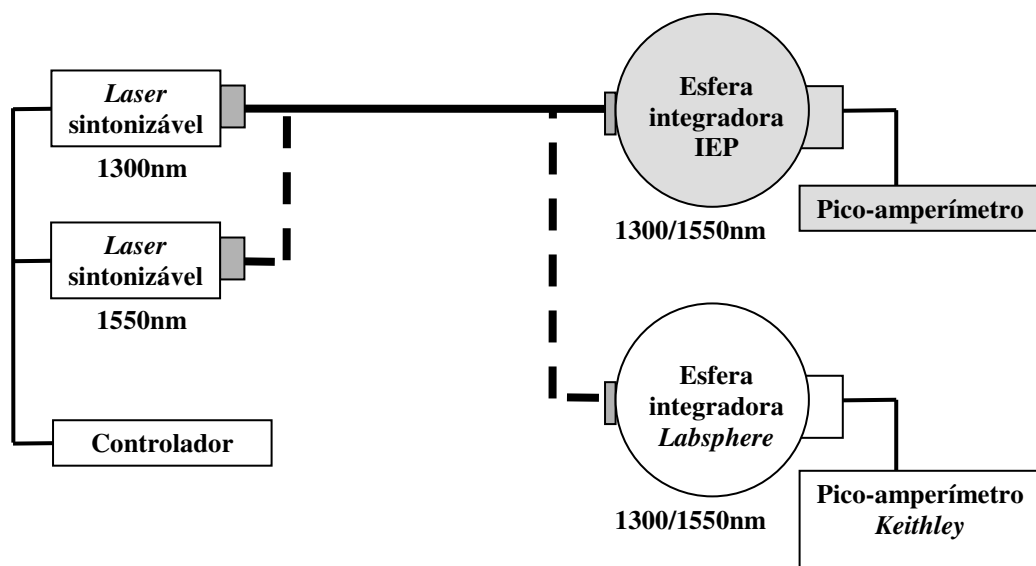


Fig. 4.8 - Esquema para calibração da esfera integradora usando fonte sintonizável.

Os resultados obtidos estão na TABELA 4.19. Todos esses valores constam no certificado de calibração correspondente emitido pelo IEP [44].

TABELA 4.19 - SEGUNDA CALIBRAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA

Comprimento de onda	Média das leituras no padrão	Média das leituras na esfera <i>Labsphere</i>	Responsividade	Incerteza de medição $k = 2$ (95%)
[nm]	[μW]	[μA]	[10^{-5} A/W]	$\pm[10^{-7} \text{ A/W}]$
1290	1001,90	0,06962	6,949	7,681
1300	1005,98	0,06999	6,957	7,681
1310	1002,31	0,06972	6,956	7,681
1320	1000,95	0,06917	6,910	7,681
1490	1147,16	0,04263	3,716	5,381
1540	1102,82	0,05210	4,724	5,381
1550	1093,40	0,05279	4,828	5,381
1560	1090,24	0,05289	4,851	5,381
1610	1020,93	0,03711	3,635	5,381
1620	1019,43	0,03491	3,424	5,381

Os valores de responsividade obtidos nas duas calibrações, utilizando os dois tipos diferentes de *laser*, estão dispostos no gráfico da Fig. 4.9.

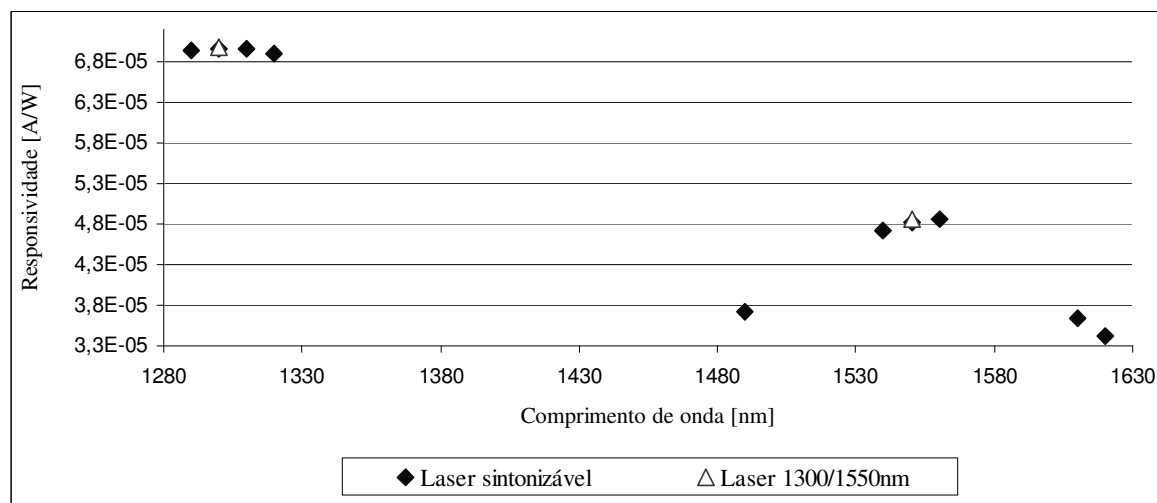


Fig. 4.9 - Responsividades da esfera obtidas nas duas calibrações.

A Fig. 4.10 apresenta o gráfico anterior com escalas diferentes para melhor visualização. Observamos que as responsividades para 1300nm estão muito próximas para os dois tipos de *laser*, inclusive dentro das faixas de incerteza da esfera. A Fig. 4.11 apresenta os valores próximos de 1550nm, comprovando que para esses dois tipos de *laser*, nos dois comprimentos de onda, a esfera possui comportamento semelhante.

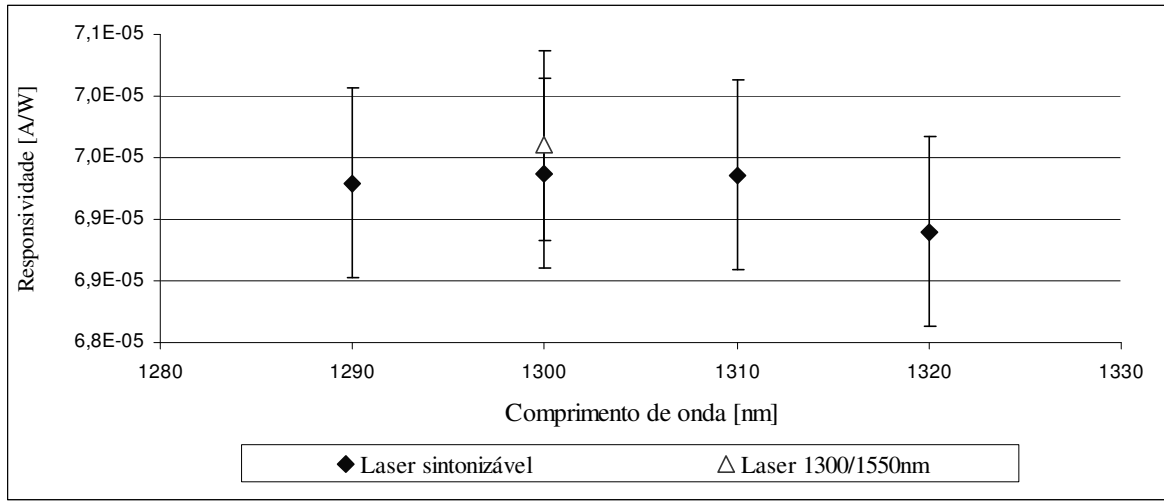


Fig. 4.10 - Responsividades da esfera próximas de 1300nm.

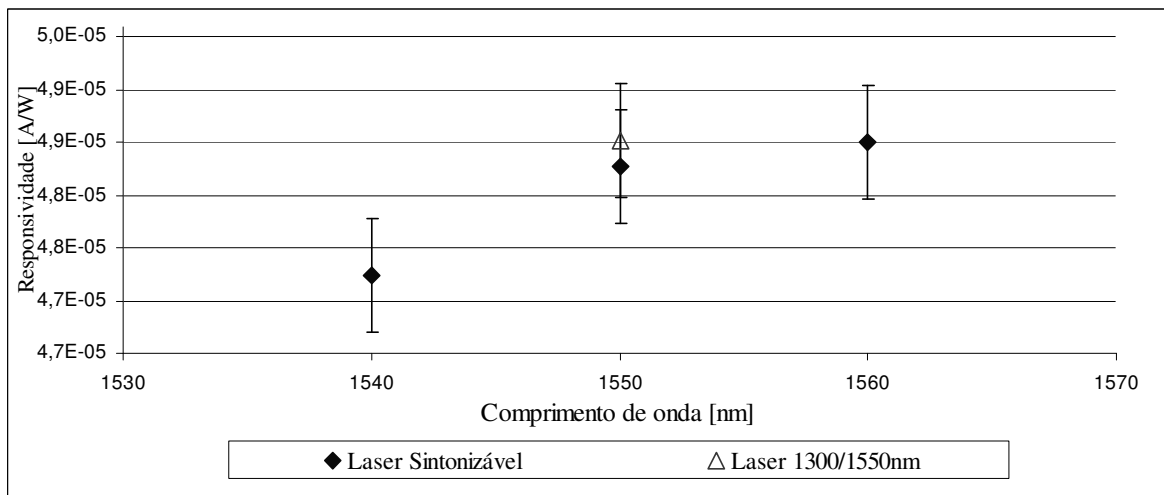


Fig. 4.11 - Responsividades da esfera próximas de 1550nm.

4.2.2. Calibração do Medidor sem Esfera

Conforme explicado anteriormente, no mesmo período da calibração da esfera integradora também foi calibrado um medidor de potência óptica sem esfera, para fins de comparação. Esse equipamento pertence ao Laboratório de Calibração da Fundação CPqD, sendo padrão de calibração desse laboratório. Denominado HP81521B [45], ele também utiliza um detector de germânio, mas não possui esfera integradora acoplada em sua estrutura, isto é, a radiação incide diretamente no elemento sensor.

A calibração desse equipamento foi importante porque tornou possível a comparação dos valores de sua incerteza com a esfera calibrada no mesmo período e laboratório, e também com os mesmos padrões, ou seja, utilizando-se a mesma cadeia de rastreabilidade.

Esse medidor óptico (assim como a esfera integradora) é constituído de módulos interligados, sendo que todos são calibrados como um único conjunto de medição. A radiação é captada pelo sensor óptico (*Optical Head*), que converte a leitura de potência em um sinal elétrico. Este sinal, através da conexão via cabo, aciona o módulo de interface (*Optical Head Interface*) [45], que está conectado ao multímetro óptico (*Lightwave Multimeter*).

Utilizamos as mesmas fontes *laser Fabry-Perot* nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm, ambas conectadas ao módulo principal HP8153A. A linearidade de potência foi estimada usando-se novamente o atenuador óptico HP8156A.

A TABELA 4.20 apresenta os dados referentes ao medidor sem esfera, e a TABELA 4.21 lista os equipamentos usados na calibração do mesmo. O padrão de medição foi novamente o radiômetro de esfera integradora do IEP, tendo a corrente medida pelo mesmo pico-amperímetro *Newport*.

TABELA 4.20 - SISTEMA DE MEDIÇÃO BASEADO NO MEDIDOR SEM ESFERA

Equipamento	Identificação
<i>Optical Head</i>	HP81521B, N/S: 2933G04433
<i>Optical Head Interface</i>	HP81533A, N/S: 2949G02168
<i>Lightwave Multimeter</i>	HP8153A, N/S: 2946G03886

TABELA 4.21 - EQUIPAMENTOS PARA A CALIBRAÇÃO DO DETECTOR SEM ESFERA

Equipamento	Identificação	Certificado
Radiômetro de esfera integradora ($\sim 2^\circ$) com detector de InGaAs	Esfera 2, LFO960, com detector CA-03723-000/CSTM-DH-050	Cert: 2355, Cal: 25/02/2005.
<i>Picoammeter Type SPO 44ABC – Newport</i>	LFO958, N/S: C328. Leitura de corrente elétrica das esferas	Cert IEP: 0824/2003, Cal: 12/06/03; Próx Cal: 11/06/06.
<i>Lightwave Multimeter</i>	HP8153A, N/S: 2946G02421	Cal: 08/08/95, Próx Cal: 07/08/96
<i>Laser Source 1550nm</i>	HP81553SM	-
<i>Laser Source 1300nm</i>	HP81552SM	-
<i>Optical Attenuator, 1300/1550nm, SM, APC</i>	HP8156A, LFO962	IEP. Cal: 03/09/2003. Próx Cal: 03/09/2006
<i>Optical Table – Steel Honeycomb Core</i>	TMC (<i>Technical Manufacturing Corp.</i>) USA - Model: 78-235-12, N/S: 11882	-

A Fig. 4.12 apresenta o esquema de montagem para a calibração em potência óptica do medidor sem esfera e a Fig. 4.13 apresenta o esquema para a calibração de linearidade. Em ambos foram realizadas medições alternadas no padrão (esfera do IEP) e equipamento sob calibração (medidor HP81521B).

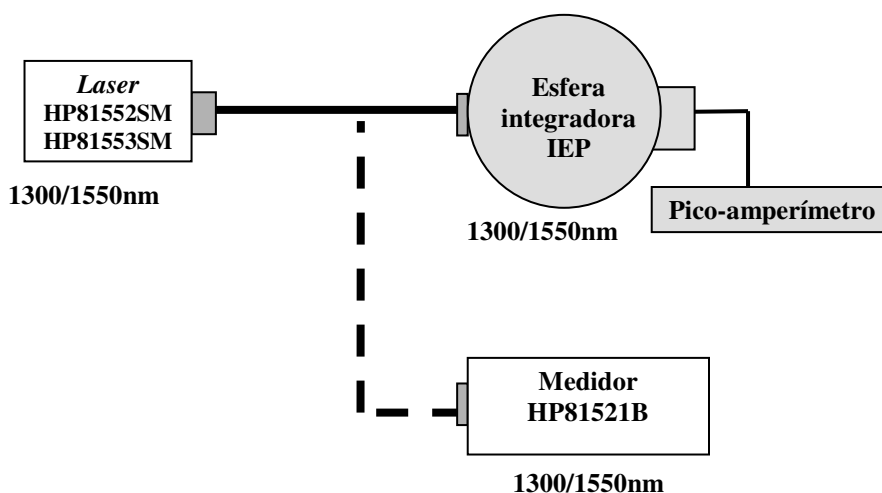


Fig. 4.12 - Esquema para calibração em potência óptica do medidor HP81521B.

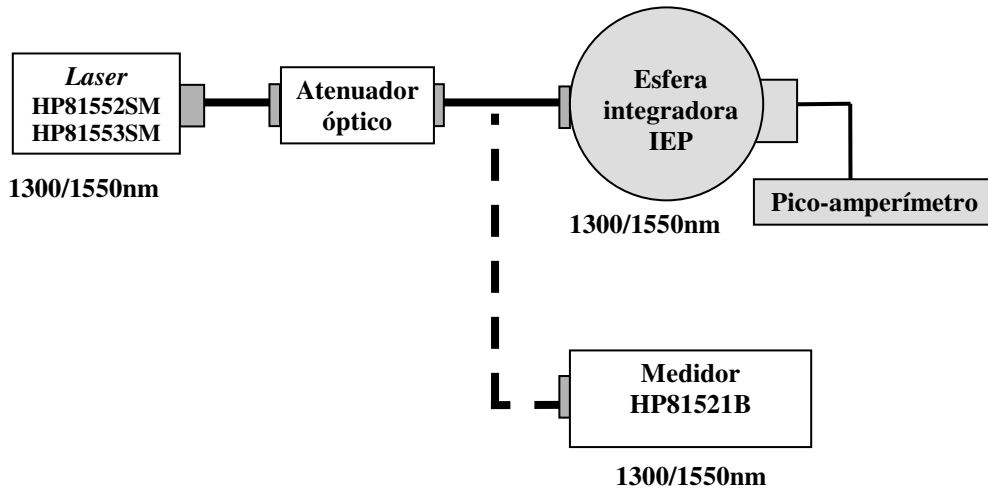


Fig. 4.13 - Esquema para calibração em linearidade do medidor HP81521B.

A incerteza em linearidade foi de $\pm 0,02\text{dB}$ para os dois comprimentos de onda. Os resultados referentes à potência óptica estão na TABELA 4.22. Todos esses valores constam no certificado de calibração emitido pelo IEP [46].

TABELA 4.22 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR HP81521B

Comprimento de onda	Média das leituras no padrão	Média das leituras no medidor HP81521B	Erro de leitura	Fator de correção	Incerteza de medição $k = 2$ (95%)
[nm]	[μW]	[μW]	[μW]	[-]	$\pm[\mu\text{W}]$
1300	1085,47	1140	54	1,05	13
1550	949,33	1016	67	1,07	11

As incertezas de medição expressas em porcentagem, chamadas de $u_{HP,1300,\%}$ e $u_{HP,1550,\%}$, são calculadas por (24) e (25), onde $u_{CAL,HP}$ é a incerteza, e *Padrão* é a média das leituras no medidor padrão dada na tabela.

$$u_{HP,1300,\%} = \left(\frac{u_{CAL,HP,1300}}{Padrão_{1300}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{13}{1085,47} \right) \cdot 100 = 1,20\% \quad (24)$$

$$u_{HP,1550,\%} = \left(\frac{u_{CAL,HP,1550}}{Padr\tilde{a}o_{1550}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{11}{949,33} \right) \cdot 100 = 1,16\% \quad (25)$$

4.3. Fase III – Experimentos Finais

Os experimentos finais aqui relatados foram realizados no Laboratório de Calibração do CPqD.

Foram realizadas duas calibrações em potência óptica de um medidor *Anritsu* MA9301A, que não possui esfera integradora acoplada, e que foi escolhido por possuir características similares à maioria dos equipamentos encontrados no mercado. A calibração em linearidade não precisou ser realizada, pois a calibração em nível de potência já é suficiente para comparações entre os instrumentos.

A primeira calibração foi realizada utilizando-se como padrão o medidor óptico HP81521B, equipamento já consolidado como padrão de medição do laboratório. A outra calibração foi efetuada usando-se o radiômetro com a esfera integradora *Labsphere* LPM-040-SF, com a finalidade de comparar diretamente os resultados, pois ambos foram calibrados na Fase II.

Utilizamos uma fonte com dois *lasers Fabry-Perot* de comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm, com potência de saída próxima de 0dBm (1mW). O procedimento empregado é semelhante ao usado pelo IEP.

O medidor *Anritsu* utilizado é formado por dois módulos interligados, conforme TABELA 4.23, embora as referências a ele sejam somente como *Anritsu* MA9301A, pois está é a denominação do sensor.

TABELA 4.23 - MEDIDOR SEM ESFERA ANRITSU MA9301A

Equipamento	Identificação
<i>Optical Power Sensor</i>	<i>Anritsu</i> MA9301A, N/S M70873
<i>Optical Power Meter</i>	<i>Anritsu</i> ML910B, N/S M96172

4.3.1. Estrutura Laboratorial

O laboratório de calibração do CPqD possui uma ótima estrutura para os experimentos finais, sendo montado em um ambiente especialmente planejado para evitar interferências externas. Seu teto, paredes, bancadas e armários são todos revestidos com materiais especiais para sala limpa visando a não retenção de partículas, além de possuir uma ante-sala e um tapete especial para retirada de sujeira dos calçados dos usuários. O laboratório possui temperatura e umidade controladas por equipamentos calibrados.

A montagem dos equipamentos é realizada sobre bancada antivibratória com tampo de granito, que está localizada no interior de um fluxo laminar formado por dois estágios de filtros e cortina especial antiestática, constituindo um ambiente de sala limpa Classe 100. A sala possui uma linha de distribuição de nitrogênio para a limpeza dos dispositivos ópticos. Os experimentos foram realizados usando-se vestuário apropriado ao ambiente de pesquisa, como luvas, capuz e aventais antiestáticos e calçados especiais.

Toda e qualquer limpeza é realizada com materiais próprios para esses ambientes, como panos de limpeza e cotonetes para sala limpa. Um microscópio está sempre disponível para qualquer análise mais detalhada de algum dispositivo. As anotações foram realizadas diretamente em um microcomputador, ou na ausência deste utilizou-se papel vegetal, que possui fibras longas contribuindo para a eliminação de partículas no ambiente.

Os conectores ópticos de todos os equipamentos e fibras ópticas foram cuidadosamente limpos antes do início das medições. Os equipamentos envolvidos na calibração ficaram ligados em aquecimento pelo tempo recomendado pelo fabricante ou, quando não havia esta especificação, por pelo menos 1 hora. A saída da fonte *laser* permaneceu ativada para estabilização pelo tempo informado pelo fabricante. Não havendo esta indicação no manual, aplicamos o tempo mínimo de 10 minutos. Todas as fibras ópticas utilizadas foram do tipo monomodo com conectores FC/PC.

Para aumentar a estabilidade da radiação incidente nos instrumentos, utilizamos um filtro modal para eliminar os modos não propagantes. Esses modos são campos eletromagnéticos de radiação que não conseguem se propagar pelas fibras que tenham

comprimento superior a 20m. Como a fibra usada nas montagens dessas calibrações é muito curta, esses modos podem se propagar, influenciando as medições.

4.3.2. Calibração do Medidor para Comparação

A Fig. 4.14 apresenta o esquema de montagem para as duas calibrações do medidor *Anritsu* MA9301A. Observa-se os dois padrões no esquema, pois essas calibrações foram realizadas simultaneamente.

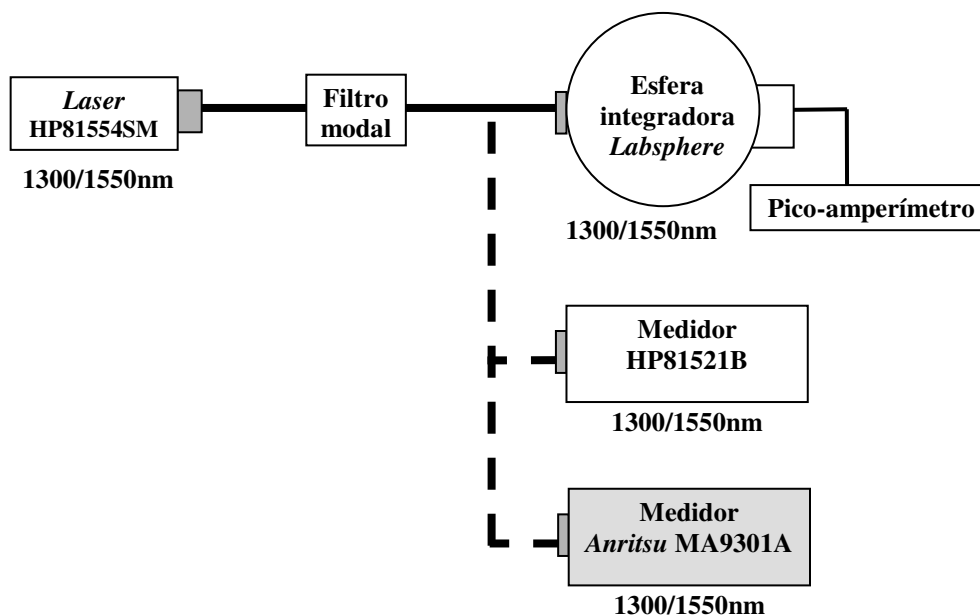


Fig. 4.14 - Esquema para calibração do medidor *Anritsu* MA9301A.

Primeiramente deve-se “zerar” os três instrumentos envolvidos. Os medidores sem esfera possuem procedimento próprio, sempre incluindo o fechamento do conector óptico para evitar entrada de radiação. Para a esfera integradora, fizemos seis leituras de “zero” no pico-amperímetro com a entrada da esfera fechada. Em seguida, foram efetuadas seis leituras alternadas em cada instrumento.

Este procedimento foi repetido para os dois comprimentos de onda, obtendo-se medições em 1300nm (TABELA 4.24) e 1550nm (TABELA 4.25).

TABELA 4.24 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR ANRITSU MA9301A EM 1300nm

“Zero” da esfera	HP81521B padrão	Esfera <i>Labsphere</i> padrão	Anritsu MA9301A
[nA]	[dBm]	[nA]	[dBm]
1,07450	0,005	67,100	-0,16
1,09948	0,005	67,117	-0,16
1,13660	0,003	66,742	-0,16
1,01221	0,003	66,728	-0,16
1,03993	0,003	66,755	-0,16
1,01230	0,004	66,827	-0,16

TABELA 4.25 - CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR ANRITSU MA9301A EM 1550nm

“Zero” da esfera	HP81521B padrão	Esfera <i>Labsphere</i> padrão	Anritsu MA9301A
[nA]	[dBm]	[nA]	[dBm]
1,09205	0,058	47,785	-0,09
1,07271	0,053	47,814	-0,09
1,05296	0,058	47,788	-0,09
1,07242	0,054	47,709	-0,09
1,10134	0,049	47,783	-0,10
1,14491	0,050	47,662	-0,10

4.3.3. Resultados usando Medidor sem Esfera

A TABELA 4.26 apresenta as médias das leituras usando o medidor HP81521B como padrão.

TABELA 4.26 - MÉDIA DAS LEITURAS NA CALIBRAÇÃO COM HP81521B

λ	Padrão HP81521B				<i>Anritsu</i> MA9301A	
	Fator de correção HP81521B	Média das leituras	Média corrigida	Média corrigida	Média das leituras	Média das leituras
[nm]	[-]	[dBm]	[dBm]	[mW]	[dBm]	[mW]
1300	1,05	0,004	-0,208	0,95	-0,16	0,96
1550	1,07	0,054	-0,240	0,95	-0,09	0,98

Os fatores de correção indicados (*Fator*), extraídos do certificado de calibração, foram utilizados para a correção das médias das leituras (*Média*), obtendo-se as médias

corrigidas ($Média_{CORR}$), conforme (26). Os valores em dBm são convertidos para mW usando (27).

$$Média_{CORR} = Média - 10 \cdot \log(Fator) \quad (26)$$

$$[mW] = 10^{\left(\frac{[dBm]}{10}\right)} \quad (27)$$

A TABELA 4.27 apresenta os valores de erro e desvio padrão para a calibração usando o medidor HP81521B como padrão.

TABELA 4.27 - ERRO E DESVIO PADRÃO NA CALIBRAÇÃO COM HP81521B

λ	HP81521B	<i>Anritsu</i> MA9301A				
	Média corrigida	Média das leituras	Erro	Erro	Desvio padrão das leituras	Desvio padrão das leituras
[nm]	[mW]	[mW]	[mW]	[%]	[dB]	[%]
1300	0,95	0,96	0,01	1,11	0,00E+00	0,00E+00
1550	0,95	0,98	0,03	3,44	5,16E-03	1,19E-01

O valor do erro é a diferença entre a média das leituras no *Anritsu* MA9301A e a média corrigida das leituras no HP81521B. Os valores de desvio padrão, calculados com base nas leituras efetuadas no equipamento sob calibração, serão usados posteriormente para o cálculo de incerteza de medição.

4.3.4. Resultados usando Esfera Integradora

A TABELA 4.28 apresenta as médias das leituras usando a esfera integradora como padrão. A média corrigida é obtida das leituras de corrente no pico-amperímetro, tendo subtraído o valor de “zero” da esfera. Dividindo-se o valor da média corrigida pela responsividade (dada no certificado), obtemos a média corrigida em Watts.

TABELA 4.28 - MÉDIA DAS LEITURAS NA CALIBRAÇÃO COM ESFERA

λ	Padrão esfera integradora			<i>Anritsu</i> MA9301A	
	Responsividade	Média corrigida	Média corrigida	Média das leituras	Média das leituras
[nm]	[A/W]	[A]	[mW]	[dBm]	[mW]
1300	6,980E-05	6,58E-08	0,943	-0,16	0,96
1550	4,852E-05	4,67E-08	0,962	-0,09	0,98

A TABELA 4.29 apresenta os valores de erro e desvio padrão para a calibração usando a esfera integradora como padrão.

TABELA 4.29 - ERRO E DESVIO PADRÃO NA CALIBRAÇÃO COM ESFERA

λ	Esfera	<i>Anritsu</i> MA9301A				
	Média corrigida	Média das leituras	Erro	Erro	Desvio padrão das leituras	Desvio padrão das leituras
[nm]	[mW]	[mW]	[mW]	[%]	[dB]	[%]
1300	0,943	0,96	0,02	2,22	0,00E+00	0,00E+00
1550	0,962	0,98	0,02	1,76	5,16E-03	1,19E-01

O valor do erro é a diferença entre a média das leituras no *Anritsu* MA9301A e a média corrigida das leituras na esfera integradora. Os valores de desvio padrão, calculados com base nas leituras efetuadas no equipamento sob calibração, serão usados posteriormente para o cálculo de incerteza de medição.

5. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O cálculo da incerteza de medição utilizado nesse trabalho é baseado no “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição” [47], também denominado ISO GUM, documento adotado mundialmente para a normalização dos trabalhos no campo da metrologia. Como este estabelece regras gerais para a avaliação e expressão da incerteza que podem ser seguidas na maioria dos campos da medição física, também utilizamos o documento “Expressão da Incerteza de Medição na Calibração” [48], tradução do EA-4/02, que é mais específico para medições em laboratórios de calibração.

Antes dos estudos que originaram o ISO GUM, não havia consenso internacional sobre como as incertezas deveriam ser calculadas e apresentadas, dificultando as comparações entre medições realizadas em diversos laboratórios ou por diferentes métodos.

Objetivando a uniformização do cálculo e apresentação de resultados de medições, o *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM) deu início ao desenvolvimento de um guia que estabelecesse regras para o cálculo e a expressão da incerteza de medição aplicável em várias áreas do conhecimento.

Este documento, em nome do BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML, foi publicado pela primeira vez em 1993, intitulado *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, sendo corrigido e reimpresso em 1995. Ele foi traduzido e publicado no Brasil em três edições (1995, 1998 e 2003), com o título de “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”.

Apresentaremos os princípios para a avaliação da incerteza de medição em calibração de maneira simplificada e prática, sendo que informações detalhadas podem ser consultadas nos documentos citados [47][48].

O objetivo de toda medição é determinar o valor do mensurando, ou seja, o valor da grandeza específica submetida à determinada medição [6]. Portanto, uma medição consiste na apropriada especificação do mensurando e do sistema de medição.

A aplicação de procedimentos que descrevem especificamente o conjunto de operações usadas na execução de medições particulares, de acordo com um dado método, resulta na determinação de um valor para o mensurando. O resultado de uma medição é apenas uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando, pois os métodos e procedimentos apresentam imperfeições. Portanto, a medição não estará concluída se esse resultado não estiver acompanhado de uma indicação da qualidade da estimativa.

Essa qualidade é representada por um número que indica, com uma dada probabilidade, os limites em que se pode encontrar o valor verdadeiro do mensurando. Este número é o que se conhece como incerteza de medição, e seu cálculo obedece a certas regras que dependem de sua natureza [49].

As principais etapas para a determinação da incerteza de medição serão explicadas a seguir, tendo como base as publicações apresentadas anteriormente [48][49].

5.1. Considerações Gerais

Os mensurandos são as grandezas particulares submetidas à medição. Em calibrações, geralmente operamos com somente um mensurando ou grandeza de saída Y , que depende de uma série de grandezas de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), de acordo com (28).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (28)$$

Uma estimativa do mensurando Y , a estimativa de saída designada por y , é obtida através de (29) usando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (29)$$

Para uma variável aleatória, a variância de sua distribuição ou a raiz quadrada positiva da variância, chamada de desvio padrão, é utilizada como uma medida da dispersão de valores.

A incerteza padrão de medição associada à estimativa de saída ou resultado de medição y , designado por $u(y)$, é o desvio padrão do mensurando Y . Ela deve ser determinada a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i , e suas incertezas padrão associadas $u(x_i)$. A incerteza padrão associada a uma estimativa possui a mesma dimensão da estimativa. Em alguns casos pode ser mais apropriado utilizar a incerteza padrão relativa de medição, que é a incerteza padrão de medição associada a uma estimativa, dividida pelo módulo desta estimativa, sendo adimensional.

5.2. Avaliação da Incerteza de Medição

A incerteza de medição associada às estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B.

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada.

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico.

5.3. Incerteza Padrão Tipo A

A avaliação do Tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando forem realizadas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição. Haverá uma dispersão ou espalhamento observável nos valores obtidos se houver uma resolução suficiente no processo de medição.

Geralmente, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza Q , para a qual n observações estatisticamente independentes q_j foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética $\bar{q}$ destas n observações, conforme (30).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (30)$$

Uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade fundamental é a variância experimental $s^2(q)$ dos valores de q_j dada por (31).

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (31)$$

O valor positivo da raiz quadrada de $s^2(q)$ é denominado desvio padrão experimental. A melhor estimativa da variância da média aritmética $\bar{q}$ é a variância experimental da média conforme (32).

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (32)$$

O valor positivo da raiz quadrada de $s^2(\bar{q})$ é chamado desvio padrão experimental da média. A incerteza padrão $u(\bar{q})$ associada à estimativa de entrada $\bar{q}$ é o desvio padrão experimental da média de acordo com (33).

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (33)$$

5.4. Incerteza Padrão Tipo B

A avaliação do Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza relacionada com uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i , efetuada por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada pelo

julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . Valores pertencentes a esta categoria podem ser obtidos a partir de:

1. Dados de medições prévias.
2. Experiência ou conhecimento sobre o comportamento do mensurando, dos instrumentos e das técnicas de medição.
3. Especificações do fabricante.
4. Dados informados em certificados de calibração.
5. Incertezas obtidas a partir de manuais ou outras publicações.

Dependendo da origem das componentes de incerteza do Tipo B, teremos tratamentos diferentes para expressar a incerteza de medição correspondente.

Componentes de incerteza provenientes de certificados de calibração precisam ser calculados considerando outros parâmetros informados nos certificados. Supomos que estamos utilizando um equipamento cujo último certificado de calibração declara que a incerteza de medição expandida é $\pm U$, para um nível de confiança de 95% e com um fator de abrangência k igual a 2. A incerteza padrão do Tipo B associada $u(y)$ será o valor da incerteza expandida dividido pelo fator de abrangência k , como mostra (34).

$$u(y) = \frac{U}{k} \quad (34)$$

Os conceitos de nível de confiança, fator de abrangência e incertezas combinadas e expandidas serão discutidos posteriormente.

Quando pode ser suposta uma distribuição de probabilidade para a grandeza X_i , baseada na teoria ou na experiência, então o valor esperado deve ser considerado como a estimativa x_i , e a raiz quadrada da variância desta distribuição deve ser considerada como a incerteza padrão associada $u(x_i)$. Se apenas os limites (superior e inferior, $a+$ e $a-$) podem

ser estimados para o valor de X_i , uma distribuição com densidade de probabilidade constante entre esses limites, ou seja, uma distribuição de probabilidade retangular, deve ser suposta para a possível variabilidade de X_i .

Se a_+ e a_- são simétricos, a amplitude do intervalo pode ser designada por $2a$, sendo o valor estimado dado por (35) e a incerteza padrão dada por (36), segundo o ISO GUM.

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (35)$$

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (36)$$

A distribuição retangular é uma descrição razoável, em termos de probabilidade, do conhecimento inadequado sobre a grandeza de entrada X_i na ausência de qualquer outra informação que não os limites de variabilidade. Na prática laboratorial, é comum encontrarmos componentes do Tipo B que possuem distribuição retangular, como a resolução de instrumentos de indicação digital e os valores importados de especificações de fabricantes, manuais ou outras fontes técnicas ou científicas.

Nos casos onde sabemos que os valores da grandeza em questão, próximos ao centro do intervalo de variabilidade, são mais prováveis do que valores próximos aos limites, uma distribuição triangular ou normal pode ser um modelo melhor, onde a incerteza padrão será dada por (37), segundo o ISO GUM. A incerteza devida à resolução de instrumentos analógicos é um exemplo de componente com distribuição triangular.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (37)$$

Por outro lado, se os valores próximos aos limites são mais prováveis do que valores próximos ao centro, uma distribuição em forma-de-U pode ser mais apropriada. O ISO

GUM informa para esse caso uma incerteza padrão dada por (38). Incerteza de medição devida a fatores de descasamento em circuitos de radiofrequência são exemplos de componentes com distribuição em forma-de-U.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (38)$$

5.5. Incerteza Padrão Combinada

Neste trabalho, as grandezas de entrada não são correlacionadas. Neste caso, o ISO GUM informa que a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ associada com a estimativa de saída y é dada por (39), onde $u_i(y)$ representa as componentes padronizadas de incertezas dos tipos A e B.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (39)$$

5.6. Incerteza Expandida

Consideremos P como a probabilidade de que uma dada afirmativa seja correta e Z o valor verdadeiro de uma quantidade determinada por métodos estatísticos. Quando considerarmos $z_1 \leq Z \leq z_2$ com probabilidade P de ser correta, então o intervalo $[z_1, z_2]$ é chamado de intervalo de confiança P para a quantidade Z , onde P expressa o nível de confiança [49]. O valor do nível de confiança tipicamente utilizado é de 95%.

Uma vez que a incerteza padrão combinada calculada corresponde a um desvio padrão, ou seja, aproximadamente 68% de nível de confiança, torna-se necessário expandi-la para maiores níveis de confiança. A incerteza expandida de medição U é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , conforme (40).

$$U = k u_c(y) \quad (40)$$

Para a determinação do fator de abrangência k , primeiramente estimamos o número de graus de liberdade efetivos v_{eff} da incerteza padrão $u(y)$, associada à estimativa de saída y , a partir da fórmula de *Welch-Satterthwaite*, dada em (41), onde v_i são os graus de liberdade da contribuição da incerteza padrão $u_i(y)$.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (41)$$

Para as componentes obtidas através de uma avaliação do Tipo A, os graus de liberdade $v_{i,TipoA}$ são dados por (42), onde n é o número de amostras. Para as componentes obtidas de uma avaliação do Tipo B, os graus de liberdade $v_{i,TipoB}$ podem ser considerados como em (43), ou seja, infinitos, caso os limites inferior e superior $a+$ e $a-$ forem estabelecidos de forma que a probabilidade da grandeza em questão cair fora desses limites seja extremamente pequena.

$$v_{i,TipoA} = n - 1 \quad (42)$$

$$v_{i,TipoB} \rightarrow \infty \quad (43)$$

De posse do valor de v_{eff} e do nível de confiança desejado, utilizamos a tabela baseada na distribuição-t ou distribuição de *Student*, constante no ISO GUM, para determinar o valor do fator de abrangência k . Para um nível de confiança de 95%, por exemplo, teremos os valores de k presentes na TABELA 5.1, em função dos graus de liberdade efetivos v_{eff} .

O resultado completo de uma medição, consistindo da estimativa y do mensurando e da incerteza expandida associada U , será fornecida como $y \pm U$, devendo ser indicado qual o fator de abrangência k utilizado e o nível de confiança associado.

Um certificado de calibração de um instrumento também informará, quando aplicável, a média das leituras, valor de referência e erro de medição. Para a obtenção da melhor estimativa do valor verdadeiro de um mensurando, devemos subtrair do resultado das medições o erro de medição informado no certificado [6].

TABELA 5.1 - FATORES DE ABRANGÊNCIA k EM FUNÇÃO DE ν_{eff}

Graus de liberdade efetivos ν_{eff}	Fator de abrangência k (nível de confiança = 95%)
1	12,71
2	4,30
3	3,18
4	2,78
5	2,57
6	2,45
7	2,36
8	2,31
9	2,26
10	2,23
11	2,20
12	2,18
13	2,16
14	2,14
15	2,13
16	2,12
17	2,11
18	2,10
19	2,09
20	2,09
25	2,06
30	2,04
35	2,03
40	2,02
45	2,01
50	2,01
100	1,984
>100	1,960

6. ESTUDO DAS INCERTEZAS

Neste capítulo serão apresentados os estudos realizados para a determinação das componentes de incerteza de medição associadas às calibrações do *Anritsu* MA9301A. Essas calibrações foram realizadas com o medidor baseado na esfera integradora *Labsphere* e no medidor sem esfera HP81521B, ambos calibrados no IEP.

Várias podem ser as componentes de incerteza que influenciam um processo de medição, cujo estudo se faz necessário para caracterizar cada uma delas e, caso possível, desprezar aquelas que não causam influências significativas no resultado.

Primeiramente foram selecionadas as componentes de incerteza relacionadas com os sistemas de medição que serão relevantes no processo de medição e que serão caracterizadas, conforme listadas a seguir.

1. Incerteza de medição do equipamento padrão constante em seu certificado de calibração.
2. Linearidade do equipamento padrão constante em seu certificado de calibração.
3. Estabilidade da potência da fonte *laser*.
4. Dependência do medidor padrão quanto ao comprimento de onda da fonte *laser*.
5. Variação da potência da fonte *laser* com a temperatura.
6. Dependência quanto ao tipo de conector óptico.
7. Não-uniformidade espacial do detector.
8. Dependência da polarização óptica.

Serviram de guia para esse estudo as informações da norma internacional IEC 1315 “Calibração de Medidores de Potência em Fibra Óptica” [50] e o “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição” [47], também denominado ISO GUM, em cujos textos são encontrados normalizados e aceitos internacionalmente os fundamentos para os cálculos de incerteza.

Devemos lembrar que a avaliação da incerteza não é um trabalho rotineiro e nem puramente matemático; depende de um conhecimento detalhado da natureza do mensurando e da medição. A qualidade e utilidade da incerteza determinada para o resultado de uma medição depende, em última instância, do entendimento, análise crítica e integridade daqueles que contribuem para a sua determinação [47].

A seguir analisaremos cada uma dessas componentes do Tipo B, especificando cálculos, valores e justificativas. Lembramos que a incerteza de medição é sempre expressa como um intervalo de valores; quando informamos o resultado de um cálculo que resulta em um valor de incerteza, fica subentendido o uso do sinal “ $\pm$ ” para expressar o intervalo. As notações utilizadas nas equações a partir deste capítulo estão simplificadas de forma a facilitar as operações.

6.1. Incerteza do Medidor Padrão

Os padrões de calibração, com e sem esfera integradora acoplada, herdaram uma incerteza de medição do laboratório do IEP que os calibrou, sendo este valor transferido para o equipamento que será calibrado.

Conforme relatado anteriormente, foram realizadas duas calibrações da esfera utilizando duas fontes *laser* distintas: fontes *laser Fabry-Perot* nos dois comprimentos de onda e fontes *laser* sintonizáveis. Como nas calibrações que foram realizadas no laboratório do CPqD na Fase III dos experimentos foram empregadas fontes *laser Fabry-Perot*, optamos pelo uso dos dados do certificado da primeira calibração [43].

Como o certificado informa esses dados com um nível de confiança de aproximadamente 95% e com um fator de abrangência k igual a 2, devemos encontrar as incertezas de medição corrigidas para a esfera integradora conforme (44) e (45).

$$u_{ESF,1300} = \frac{u_{ESF,1300,\%}}{k} = \frac{1,10}{2} = 0,55\% \quad (44)$$

$$u_{ESF,1550} = \frac{u_{ESF,1550,\%}}{k} = \frac{1,11}{2} = 0,56\% \quad (45)$$

Quanto ao medidor sem esfera, o certificado também informa os dados com um nível de confiança de aproximadamente 95% e um fator de abrangência k igual a 2. Portanto, as incertezas de medição para o medidor de potência HP81521B serão dadas por (46) e (47).

$$u_{HP,1300} = \frac{u_{HP,1300,\%}}{k} = \frac{1,20}{2} = 0,60\% \quad (46)$$

$$u_{HP,1550} = \frac{u_{HP,1550,\%}}{k} = \frac{1,16}{2} = 0,58\% \quad (47)$$

6.2. Linearidade do Medidor Padrão

Os padrões calibrados no IEP também herdaram as incertezas associadas à linearidade em medição de potência óptica.

Comparando os certificados da primeira calibração da esfera integradora [43] e do medidor óptico HP81521B [46], notamos que as incertezas de medição para os dois instrumentos, nos dois comprimentos de onda, são iguais à $\pm 0,02\text{dB}$.

Calculando o valor equivalente em porcentagem segundo (48), encontramos a incerteza $u_{L,\%}$ igual a $\pm 0,46\%$.

$$u_{L,\%} = 100 \left(10^{\left(\frac{0,02\text{dB}}{10} \right)} - 1 \right) = 0,46\% \quad (48)$$

Como os certificados informam um nível de confiança de aproximadamente 95% e um fator de abrangência k igual a 2, com (49) calculamos a incerteza de medição u_L associada à linearidade. Esse valor, idêntico para a esfera integradora e para o medidor de potência HP81521B, para os dois comprimentos de onda, é igual a $\pm 0,23\%$.

$$u_L = \frac{u_{L,\%}}{k} = \frac{0,46}{2} = 0,23\% \quad (49)$$

6.3. Estabilidade do *Laser*

A fonte óptica HP81554SM utilizada foi calibrada no IEP na mesma época em que foram calibrados a esfera e o medidor HP81521B. Seu certificado de calibração informa, dentre outros dados, a estabilidade, ou seja, a deriva temporal da potência óptica das fontes de radiação em 1300nm e 1550nm.

Para ambos os comprimentos de onda é dado o valor de 0,003dB/min [42]. Como as medições para a calibração são realizadas de maneira alternada (demorando alguns segundos cada uma), consideramos um tempo não maior que 1 minuto para a conclusão das medições em cada comprimento de onda. Portanto, temos uma incerteza de medição de $\pm 0,003\text{dB}$, equivalendo ao valor em porcentagem ($u_{E,\%}$) de $\pm 0,07\%$, conforme conversão dada por (50).

$$u_{E,\%} = 100 \left(10^{\left(\frac{0,003\text{dB}}{10} \right)} - 1 \right) = 0,07\% \quad (50)$$

Como essa incerteza é declarada no certificado de calibração na forma expandida, ou seja, com um nível de confiança de aproximadamente 95%, devemos calcular esta incerteza agora com um nível de confiança de 68%. Portanto, dividimos $u_{E,\%}$ pelo fator de abrangência k informado no certificado, conforme (51), obtendo a incerteza de medição associada à estabilidade da fonte *laser* (u_E) igual a $\pm 0,03\%$.

$$u_E = \frac{u_{E,\%}}{k} = \frac{0,07}{2} = 0,03\% \quad (51)$$

6.4. Comprimento de Onda do *Laser*

A dependência do medidor padrão em relação ao comprimento de onda do *laser* foi pesquisado na literatura [51], sendo tomados os valores referentes ao medidor HP81521B, por ser o mesmo equipamento que utilizamos como padrão. Como o detector acoplado na esfera integradora também é de germânio, usamos os mesmos valores para ambos os equipamentos. Para o comprimento de onda de 1300nm é indicado o valor de 0,1% / nm e para 1550nm é informado o valor de 1% / nm.

Considerando uma distribuição retangular para o dado informado na literatura técnica, temos, para um nível de confiança de 68%, uma incerteza de medição devido à dependência do comprimento de onda do *laser* nos comprimentos de onda de 1300nm ($u_{\lambda,1300}$) e 1550nm ($u_{\lambda,1550}$) de acordo com (52) e (53).

$$u_{\lambda,1300} = \frac{0,1\%}{\sqrt{3}} = 0,06\% \quad (52)$$

$$u_{\lambda,1550} = \frac{1\%}{\sqrt{3}} = 0,58\% \quad (53)$$

6.5. Variação do *Laser* com a Temperatura

A componente de incerteza devido à variação da potência do *laser* com a mudança de temperatura e/ou umidade relativa do ambiente precisou ser estudada, cuja contribuição à incerteza total é significativa devido à idade avançada da fonte óptica utilizada. Para este fim foram realizados alguns ensaios climáticos dos padrões ópticos do Laboratório de Calibração do CPqD.

Os equipamentos utilizados no experimento foram aqueles calibrados no IEP: o medidor sem esfera integradora HP81521B e a fonte *laser* HP81554SM, que foram interligados com fibras ópticas monomodo.

Foi notado que a variação de umidade relativa não influencia consideravelmente as medições, mas a variação de temperatura tem efeito considerável. Isso ocorre

principalmente porque a fonte óptica utilizada já não é um equipamento novo, o que já havia sido notado em estudos anteriores [52], onde uma pequena variação em seu comprimento de onda ao longo do tempo foi verificada, embora com influência desprezível.

Fizemos a montagem conforme a Fig. 6.1, dentro da câmara climática com temperatura e umidade relativa controladas. Os equipamentos foram controlados via GPIB por software (*LABView/National Instruments*), evitando contato com o ambiente interno da câmara. Consideramos suficiente realizar testes somente em um comprimento de onda, sendo escolhido o de 1550nm.

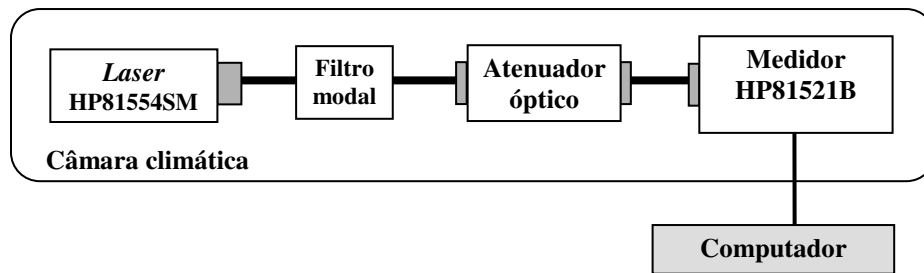


Fig. 6.1 - Montagem para os ensaios ópticos na câmara climática.

Os equipamentos utilizados no experimento e listados na TABELA 6.1 são os padrões utilizados nas calibrações de rotina do laboratório de calibração do CPqD, e que foram calibrados no IEP. O software foi programado para capturar leituras do medidor de potência óptica continuamente, sendo que o intervalo entre essas amostras foi de 2s.

TABELA 6.1 - EQUIPAMENTOS SOB ENSAIO CLIMÁTICO

Equipamento	Identificação	Certificado
<i>Laser Source</i>	HP81554SM, N/S: 2949G00585	IEP – 20051695, Val: dez/07
<i>Optical Head Interface</i>	HP81533A, N/S: 2949G02168	IEP – 20051693, Val: dez/07
<i>Optical Head</i>	HP81521B, N/S: 2933G04433	IEP – 20051693, Val: dez/07
<i>Lightwave Multimeter</i>	HP8153A, N/S: 2946G03886	IEP – 20051693, Val: dez/07
<i>Optical Attenuator</i>	HP8157A, N/S: 2942G02502	IEP – 20051694, Val: dez/07

Foram realizados dois experimentos:

1. Variação de umidade relativa e variação da temperatura em 10°C.
2. Variação de temperatura em 4°C.

6.5.1. Variação da Temperatura em 10°C

Primeiramente fizemos as medições com uma variação de temperatura de 10°C e depois usamos uma variação de 4°C. Para as medições com variação de 10°C usamos o roteiro esquematizado na TABELA 6.2, onde também existe uma variação controlada da umidade relativa.

Foram selecionados períodos de 1h por ser o tempo médio aproximado necessário para a calibração de medidores de potência.

TABELA 6.2 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM 10°C

Tempo (h)	Temperatura	Umidade Relativa
0:00 – 1:00	Elevação da temperatura de 19°C a 28°C	35%
1:00 – 2:00	Temperatura constante em 28°C	
2:00 – 3:00	Diminuição da temperatura de 28°C a 19°C	
3:00 – 4:00	Elevação da temperatura de 19°C a 28°C	65% a 70%
4:00 – 5:00	Temperatura constante em 28°C	
5:00 – 6:00	Diminuição da temperatura de 28°C a 19°C	

Na Fig. 6.2 vemos a variação de temperatura ao longo do tempo, tomada por um termohigrógrafo devidamente calibrado e disposto no interior da câmara climática, onde ficaram registradas as temperaturas atingidas.

A Fig. 6.3 apresenta a variação de umidade relativa ao longo do tempo tomada pelo mesmo termohigrógrafo.

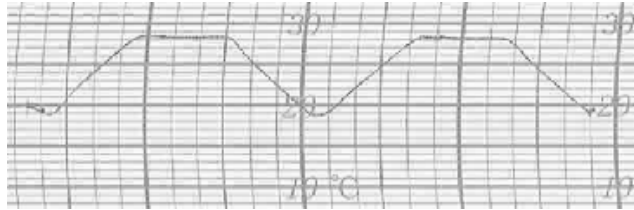


Fig. 6.2 - Registro do tempo (h) x temperatura (°C) para a variação de 10°C.

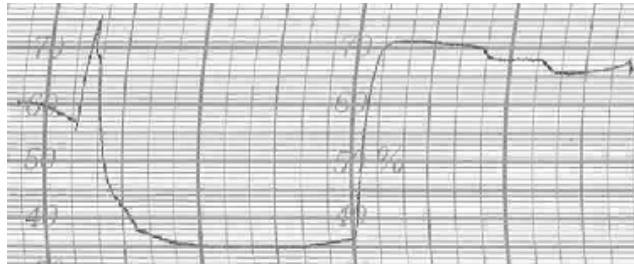


Fig. 6.3 - Registro do tempo (h) x umidade relativa (%) para a variação de 10°C.

Os dados coletados podem ser visualizados na Fig. 6.4, onde é mostrado a variação da potência óptica (dBm) em função do tempo (s).

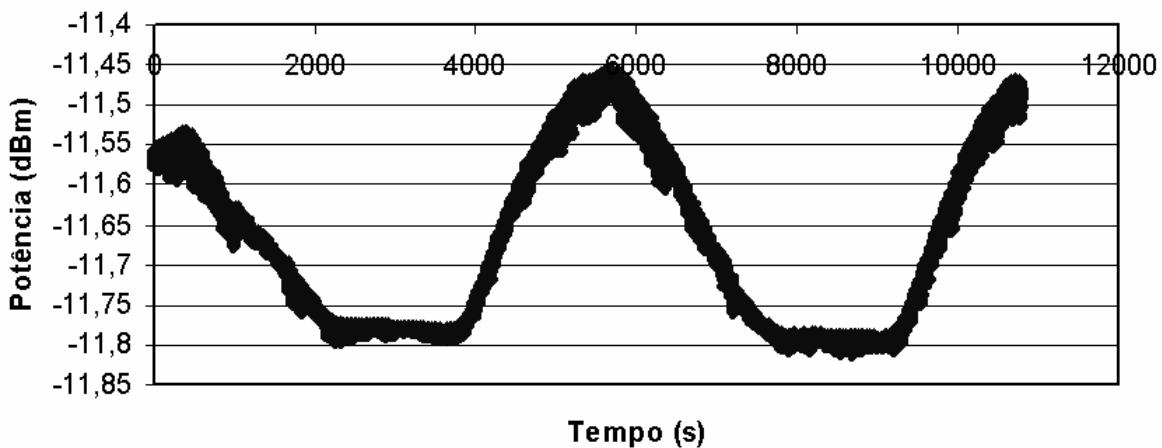


Fig. 6.4 - Potência óptica em função do tempo para a variação de 10°C.

Podemos observar que a variação de potência óptica ocorrida devido à variação de umidade relativa do ambiente não é significativa, enquanto que a variação de temperatura influencia diretamente nas leituras. O aumento de temperatura provoca a diminuição na

leitura do medidor de potência óptica, ocorrendo o inverso no caso da diminuição da temperatura.

Na variação de 10°C ocorrida neste experimento, medimos uma potência óptica máxima de -11,459dBm e mínima de -11,810dBm.

6.5.2. Variação da Temperatura em 4°C

Considerando um melhor controle das condições climáticas do laboratório e que o controle de temperatura poderia ser mais preciso, repetimos o experimento com uma variação de temperatura de 4°C. A variação da umidade relativa foi tomada como não necessariamente controlada, pois constatamos que sua mudança não influenciaria as medições de potência, conforme concluído no primeiro experimento.

Como a variação da umidade relativa não foi considerada importante dessa vez, o experimento consistiu apenas de uma fase, conforme observado na TABELA 6.3.

TABELA 6.3 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA EM 4°C

Tempo (h)	Temperatura
0:00 – 1:00	Elevação da temperatura de 19°C a 23°C
1:00 – 2:00	Temperatura constante em 23°C
2:00 – 3:00	Diminuição da temperatura de 23°C a 19°C

Na Fig. 6.5 observamos a variação de temperatura ao longo do tempo, tomada pelo mesmo termohigrógrafo devidamente calibrado e disposto no interior da câmara climática, onde ficaram registradas as temperaturas atingidas.

Na Fig. 6.6 vemos a variação de umidade relativa ao longo do tempo tomada pelo mesmo termohigrógrafo, onde notamos que não houve preocupação com a variação de umidade, já que foi notado no experimento anterior que sua influência é desprezível.

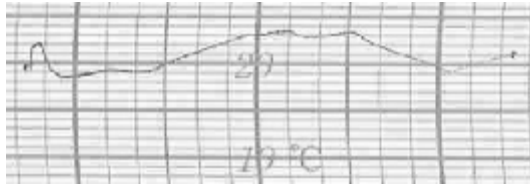


Fig. 6.5 - Registro do tempo (h) x temperatura (°C) para a variação de 4°C.

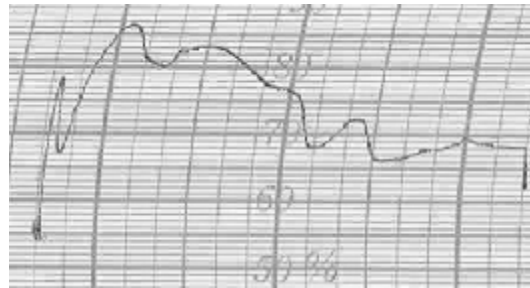


Fig. 6.6 - Registro do tempo (h) x umidade relativa (%) para a variação de 4°C.

Os dados coletados podem ser visualizados na Fig. 6.7, onde é mostrado a variação da potência óptica (dBm) em função do tempo (s).

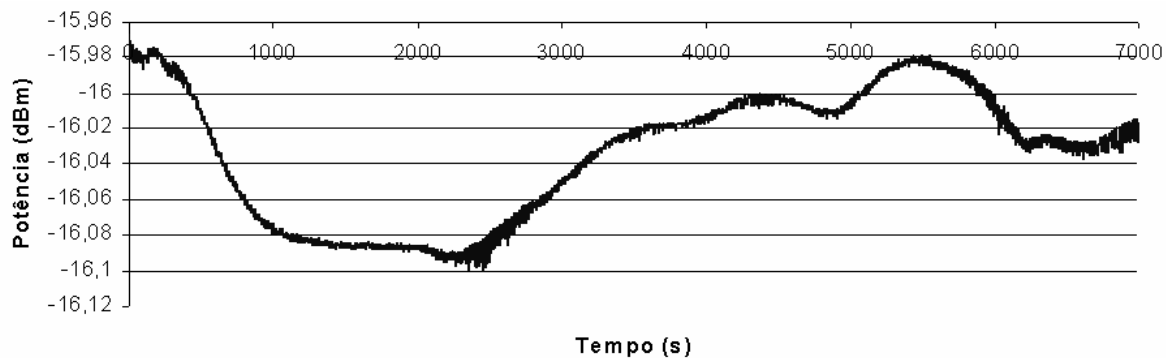


Fig. 6.7 - Potência óptica em função do tempo para a variação de 4°C.

Novamente observamos que a variação de temperatura influencia nas leituras do sensor óptico. Na variação de 4°C ocorrida neste segundo e conclusivo experimento, encontramos os dados da TABELA 6.4.

TABELA 6.4 - RESULTADOS OBTIDOS NO SEGUNDO EXPERIMENTO

Leitura máxima	Leitura mínima	Média das leituras	Desvio padrão	Variação máxima (Var_{MAX})	
[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[%]
0,0253	0,0245	0,0249	0,0002	0,000763	3,06

Considerando uma distribuição retangular para o dado obtido experimentalmente, temos, para um nível de confiança de 68%, uma incerteza de medição u_T devido à variação do *laser* com a temperatura de $\pm 1,77\%$, de acordo com (54).

$$u_T = \frac{Var_{MAX}}{\sqrt{3}} = \frac{3,06\%}{\sqrt{3}} = 1,77\% \quad (54)$$

6.6. Dependência do Tipo de Conector

Pesquisas foram realizadas para determinar a dependência das medições quanto ao tipo de conector óptico utilizado.

Estes experimentos, realizados no mesmo laboratório do IEP, mostram o comportamento das medições quando são utilizados conectores ópticos de vários tipos, como FC/PC (*Fiber Connector / Physical Contact*) e FC/APC (*Fiber Connector / Angled Physical Contact*).

A maioria dos conectores atuais baseia-se no uso de *ferrules*, que são cilindros fabricados em material metálico, plástico ou cerâmico, com um orifício de precisão onde é instalada a fibra [14]. Também foi avaliado o comportamento dos resultados quando os conectores usavam *ferrule* de metal ou cerâmica.

Os equipamentos utilizados são os listados na TABELA 6.5. Utilizamos uma fonte *laser* HP81554SM para medições com várias fibras ópticas monomodo, que foram conectadas em 4 medidores distintos, denominados Esfera IEP-1, Esfera IEP-2, Esfera *Labsphere* e Medidor HP.

TABELA 6.5 - EQUIPAMENTOS PARA EXPERIMENTOS COM CONECTORES

Medidor	Descrição	Identificação	Certificado
Esfera IEP-1	Radiômetro de esfera integradora (~2'') com detector de InGaAs	Esfera 1, LFO959, com detector CA-03723-000/CSTM-DH-050	Cert: 2354, Cal: 25/02/2005.
Esfera IEP-2	Radiômetro de esfera integradora (~2'') com detector de InGaAs	Esfera 2, LFO960, com detector CA-03723-000/CSTM-DH-050	Cert: 2355, Cal: 25/02/2005.
	<i>Picoammeter Type SPO 44ABC – Newport</i>	LFO958, N/S: C328. Leitura de corrente elétrica das esferas	Cert IEP: 0824/2003, Cal: 12/06/03; Próx Cal: 11/06/06.
Esfera <i>Labsphere</i>	Esfera integradora	<i>Labsphere</i> 4'' – CPqD033471	<i>Labsphere</i> ID# 41011, Report# 41011-1-1, Data cal: 22/12/2003
	Detector de germânio	GDA-050-U	<i>Labsphere</i> ID# 41011, Report# 41011-1-1, Data cal: 22/12/2003
	Pico-amperímetro	<i>Keithley</i> 6485, N/S: 0975780	Cert: DKD-K-01901-7382, Data cal: jan/2004
Medidor HP	<i>Optical Head</i>	HP81521B, N/S: 2933G04433	Cert IEP M-2005-1693, Cal: 01/12/05.
	<i>Optical Head Interface</i>	HP81533A, N/S: 2949G02168	Cert IEP M-2005-1693, Cal: 01/12/05.
	<i>Lightwave Multimeter</i>	HP8153A, N/S: 2946G03886	Cert IEP M-2005-1693, Cal: 01/12/05.
Fonte	<i>Laser Source</i> 1300/1550nm	HP81554SM, N/S: 2949G00585	Cert IEP M-2005-1696, Cal: 01/12/05.
Bancada	<i>Optical Table – Steel Honeycomb Core</i>	TMC (<i>Technical Manufacturing Corp.</i>) USA - Model: 78-235-12, N/S: 11882	-

As fibras ópticas possuem um conector FC/PC em uma das extremidades, para conexão com a fonte. Cada fibra, em sua outra extremidade, possui um tipo de conector conforme listado na TABELA 6.6.

TABELA 6.6 - TIPOS DE CONECTORES ÓPTICOS AVALIADOS

Tipo	Material do ferrule	Identificação
FC/PC	Cerâmico	IEP
FC/PC	Metálico	CPqD
FC/PC	Cerâmico e metálico	IEP
FC/APC	Cerâmico	IEP
FC/APC	Metálico	IEP

Cada fibra óptica, com seu correspondente conector óptico, foi conectada entre a fonte *laser* e cada um dos 4 medidores, sendo efetuadas 3 leituras para cada montagem. O esquema das montagens é apresentado na Fig. 6.8. Foram obtidas as médias das medições para os comprimentos de onda de 1300nm (TABELA 6.7) e 1550nm (TABELA 6.8).

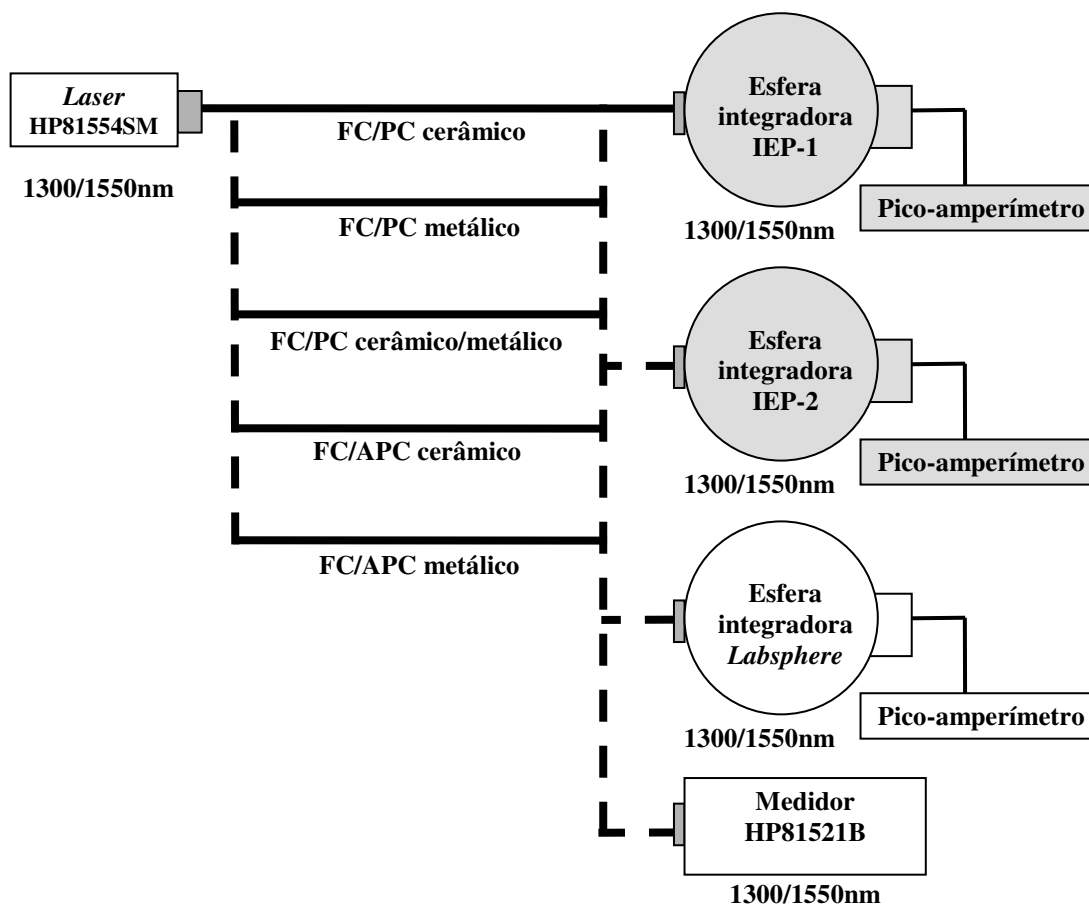


Fig. 6.8 - Esquema das montagens para medições com diferentes conectores.

As leituras originais nas esferas integradoras já estão corrigidas através do uso dos valores de responsividade obtidos nos seus respectivos certificados de calibração. O fator de correção do medidor HP, proveniente de seu certificado, também foi utilizado para correção dos valores apresentados.

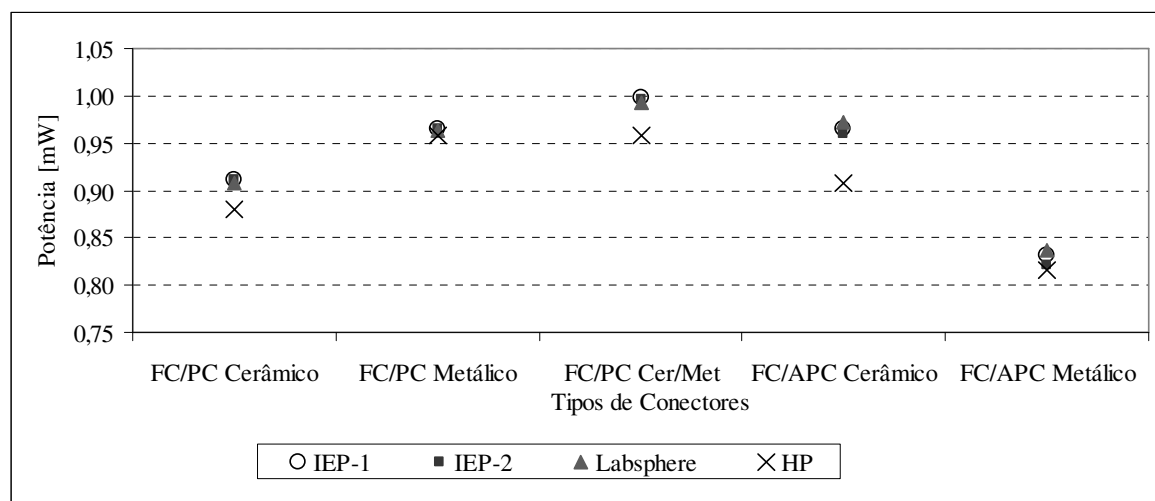
TABELA 6.7 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES COM CONECTORES DIFERENTES EM 1300nm

Conector	Média das medições [mW]			
	Esfera IEP-1	Esfera IEP-2	Esfera <i>Labsphere</i>	Medidor HP
FC/PC cerâmico	0,91	0,91	0,91	0,88
FC/PC metálico	0,96	0,97	0,96	0,96
FC/PC cerâmico e metálico	1,00	1,00	0,99	0,96
FC/APC cerâmico	0,96	0,96	0,97	0,91
FC/APC metálico	0,83	0,82	0,84	0,82

TABELA 6.8 - MÉDIA DAS MEDIÇÕES COM CONECTORES DIFERENTES EM 1550nm

Conector	Média das medições [mW]			
	Esfera IEP-1	Esfera IEP-2	Esfera <i>Labsphere</i>	Medidor HP
FC/PC cerâmico	0,93	0,94	0,94	0,86
FC/PC metálico	1,01	1,02	1,02	0,95
FC/PC cerâmico e metálico	1,04	1,04	1,03	0,95
FC/APC cerâmico	1,02	1,02	1,03	0,91
FC/APC metálico	0,81	0,81	0,82	0,76

Observando esses valores dispostos no gráfico da Fig. 6.9, notamos que as medições obtidas a partir das esferas integradoras possuem valores próximos, enquanto os valores resultantes do medidor sem esfera apresentam diferenças visíveis em relação aos primeiros medidores. Este comportamento também é observado em 1550nm, conforme Fig. 6.10.

**Fig. 6.9 - Média das medições com conectores diferentes em 1300nm.**

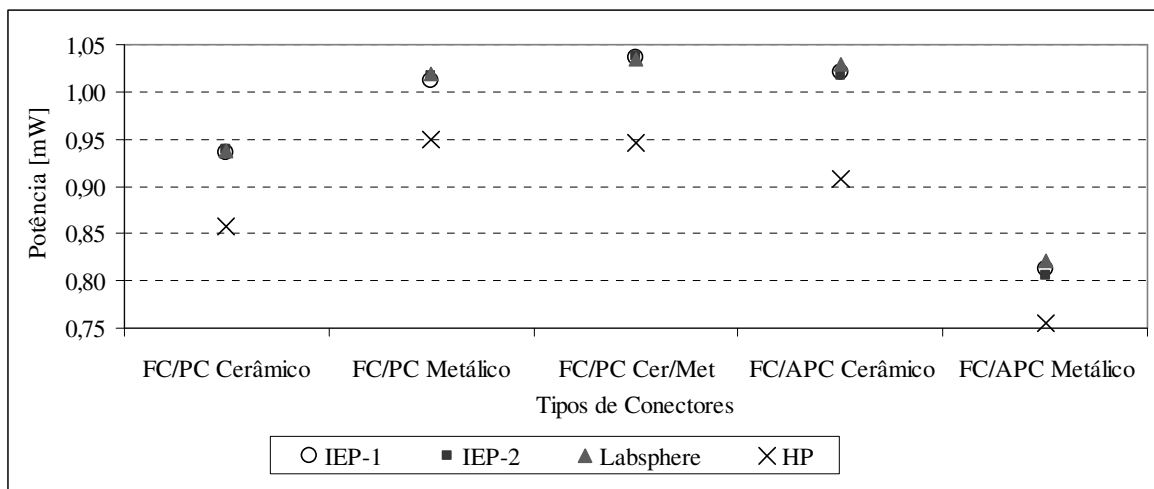


Fig. 6.10 - Média das medições com conectores diferentes em 1550nm.

Os mesmos valores encontrados também foram normalizados tendo como referência a esfera IEP-1, de forma a evidenciar a superioridade das esferas integradoras em relação ao medidor sem esfera, conforme observado na Fig. 6.11.

Quando fazemos medições com as esferas e mudamos os conectores, os resultados são muito semelhantes. Para medições realizadas com o medidor HP, se mudarmos os conectores, ocorrem variações entre os resultados. Este comportamento é mais notável em 1550nm, conforme Fig. 6.12.

Logo, as medições com instrumentos que possuem esfera integradora são menos dependentes do tipo de conector óptico instalado na fibra. Isto é muito interessante para os usuários desses equipamentos, pois o uso de vários conectores diferentes no laboratório ocorre com frequência.

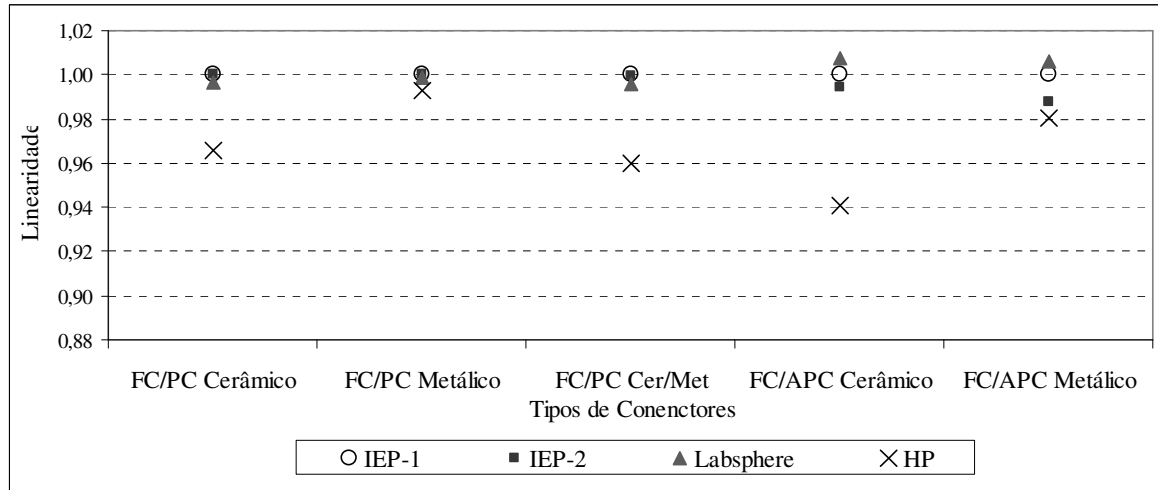


Fig. 6.11 - Comparação entre os conectores em 1300nm.

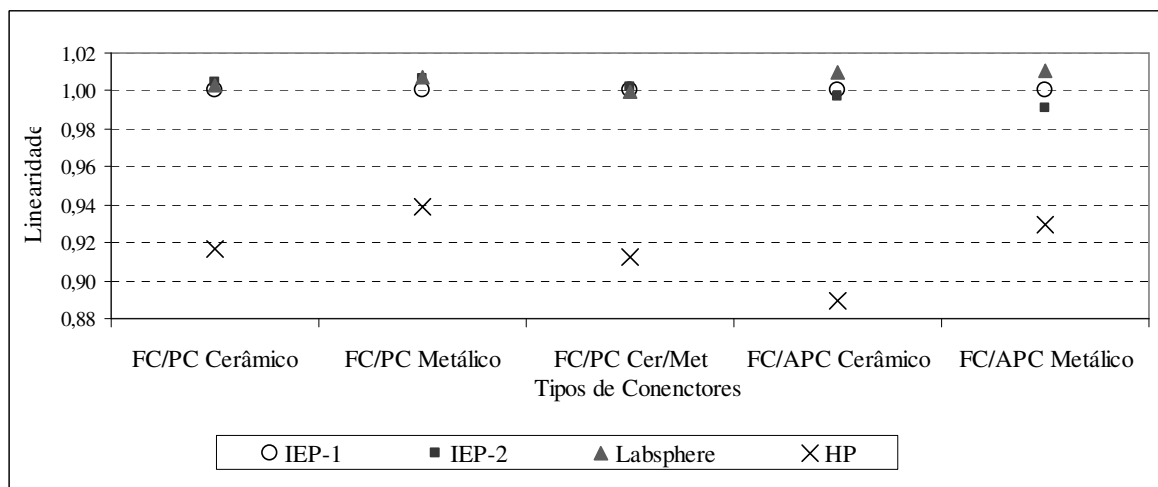


Fig. 6.12 - Comparação entre os conectores em 1550nm.

Estamos interessados na determinação das incertezas de medição para a esfera *Labsphere* e para o medidor HP. Como foram realizadas 3 leituras para cada fibra conectada em cada um desses medidores, foi possível calcular quais foram as variações máximas (diferença entre os valores máximo e mínimo) para cada conjunto de leituras, em relação aos valores médios de cada conjunto. Foram obtidos resultados para 1300nm (TABELA 6.9) e 1550nm (TABELA 6.10).

TABELA 6.9 - VARIAÇÕES NAS LEITURAS COM CONECTORES EM 1300nm

Conector	Variação máxima nas leituras [%]	
	Esfera <i>Labsphere</i>	Medidor HP
FC/PC cerâmico	0,10	0,02
FC/PC metálico	0,09	0,08
FC/PC cerâmico e metálico	0,03	0,03
FC/APC cerâmico	0,09	0,06
FC/APC metálico	0,21	0,15

TABELA 6.10 - VARIAÇÕES NAS LEITURAS COM CONECTORES EM 1550nm

Conector	Variação máxima nas leituras [%]	
	Esfera <i>Labsphere</i>	Medidor HP
FC/PC cerâmico	0,30	0,08
FC/PC metálico	0,25	0,09
FC/PC cerâmico e metálico	0,21	0,24
FC/APC cerâmico	0,09	0,10
FC/APC metálico	0,26	0,05

Para uma estimativa conservadora da incerteza, escolhemos a maior variação ocorrida durante as leituras em cada medidor. Como estes números foram obtidos experimentalmente, consideramos uma distribuição retangular e um nível de confiança de 68%.

Logo, a incerteza de medição devido à dependência do tipo de conector óptico ($u_{C,HP,1300}$) para o medidor HP81521B no comprimento de onda de 1300nm é de $\pm 0,09\%$, conforme (55). Para 1550nm, a incerteza correspondente ($u_{C,HP,1550}$) é de $\pm 0,14\%$, de acordo com (56).

$$u_{C,HP,1300} = \frac{0,15\%}{\sqrt{3}} = 0,09\% \quad (55)$$

$$u_{C,HP,1550} = \frac{0,24\%}{\sqrt{3}} = 0,14\% \quad (56)$$

Para a esfera integradora *Labsphere*, temos uma incerteza ($u_{C,ESF,1300}$) no comprimento de onda de 1300nm de $\pm 0,12\%$, de acordo com (57).

Em 1550nm, a incerteza correspondente ($u_{C,ESF,1550}$) é de $\pm 0,17\%$, conforme (58).

$$u_{C,ESF,1300} = \frac{0,21\%}{\sqrt{3}} = 0,12\% \quad (57)$$

$$u_{C,ESF,1550} = \frac{0,30\%}{\sqrt{3}} = 0,17\% \quad (58)$$

O motivo de encontrarmos estas incertezas levemente maiores para a esfera não foi estudado, pois os baixos valores das outras componentes contribuem para a redução da incerteza final, sendo alcançado o objetivo proposto pelo trabalho.

6.7. Uniformidade Espacial do Detector

Sabemos que os detectores ópticos possuem uma não-uniformidade da responsividade em relação a sua superfície, ou seja, cada ponto da sua superfície possui uma responsividade diferente. Isto se torna complicado se considerarmos também que o feixe de radiação, possuindo ainda uma geometria muitas vezes variável, pode entrar no detector com alinhamentos irregulares e atingir o detector em pontos diferentes a cada medição.

Para a estimativa da influência da não-uniformidade do detector sobre as medições usando o medidor HP81521B, consultamos uma literatura especializada [53], que informa uma incerteza de $\pm 0,20\%$ para o equipamento similar. Considerando uma distribuição retangular para esta informação, temos, para um nível de confiança de 68%, uma incerteza de medição devido à não-uniformidade espacial ($u_{U,HP}$) do medidor HP81521B de $\pm 0,12\%$, de acordo com (59).

$$u_{U,HP} = \frac{0,20\%}{\sqrt{3}} = 0,12\% \quad (59)$$

O sistema de medição que contém a esfera integradora não apresenta dependência quanto à não-uniformidade do detector, conforme estudado anteriormente [28]. Isto acontece porque a esfera captura radiação proveniente de suas paredes internas, fazendo com que o alinhamento ou o ângulo de incidência da radiação, bem como a geometria do feixe, não influenciem as medições. Portanto, consideramos a incerteza de medição devido à não-uniformidade espacial ($u_{U,ESF}$) do detector no caso da esfera igual a zero.

6.8. Dependência da Polarização

Para a estimativa da influência da polarização óptica nas leituras do detector sem a esfera integradora, pesquisamos várias publicações técnicas e tomamos como referência aquela que é mais adequada ao nosso medidor HP81521B [53], onde é informada uma incerteza de medição de $\pm 0,50\%$.

Considerando uma distribuição retangular e um nível de confiança de 68%, temos uma incerteza de medição devida à dependência da polarização óptica ($u_{P,HP}$) para o medidor sem esfera de $\pm 0,29\%$, conforme (60).

$$u_{P,HP} = \frac{0,50\%}{\sqrt{3}} = 0,29\% \quad (60)$$

As leituras de potência realizadas na esfera integradora são insensíveis à polarização da radiação [54], pois o detector não captura o feixe do *laser* diretamente, mas através da esfera. Isso faz com que sua incerteza de medição associada à polarização óptica ($u_{P,ESF}$) seja igual a zero, destacando mais uma vantagem para medições com esse dispositivo.

7. CÁLCULO DA INCERTEZA

Neste capítulo serão calculadas as incertezas de medição para o medidor *Anritsu* MA9301A, que foi calibrado com o medidor HP81521B e a esfera *Labsphere*. As componentes de incerteza encontradas no capítulo anterior para 1300nm (TABELA 7.1) e 1550nm (TABELA 7.2) foram organizadas para facilitar as comparações.

TABELA 7.1 - COMPONENTES DE INCERTEZA PARA O MEDIDOR HP81521B

Componente de incerteza	1300nm $\pm[\%]$		1550nm $\pm[\%]$	
Incerteza do medidor padrão	$u_{HP,1300}$	0,60	$u_{HP,1550}$	0,58
Linearidade do medidor padrão	u_L	0,23	u_L	0,23
Estabilidade do <i>laser</i>	u_E	0,03	u_E	0,03
Comprimento de onda do <i>laser</i>	$u_{\lambda,1300}$	0,06	$u_{\lambda,1550}$	0,58
Variação do <i>laser</i> com a temperatura	u_T	1,77	u_T	1,77
Dependência do tipo de conector	$u_{C,HP,1300}$	0,09	$u_{C,HP,1550}$	0,14
Uniformidade espacial do detector	$u_{U,HP}$	0,12	$u_{U,HP}$	0,12
Dependência da polarização	$u_{P,HP}$	0,29	$u_{P,HP}$	0,29

TABELA 7.2 - COMPONENTES DE INCERTEZA PARA A ESFERA INTEGRADORA

Componente de incerteza	1300nm $\pm[\%]$		1550nm $\pm[\%]$	
Incerteza do medidor padrão	$u_{ESF,1300}$	0,55	$u_{ESF,1550}$	0,56
Linearidade do medidor padrão	u_L	0,23	u_L	0,23
Estabilidade do <i>laser</i>	u_E	0,03	u_E	0,03
Comprimento de onda do <i>laser</i>	$u_{\lambda,1300}$	0,06	$u_{\lambda,1550}$	0,58
Variação do <i>laser</i> com a temperatura	u_T	1,77	u_T	1,77
Dependência do tipo de conector	$u_{C,ESF,1300}$	0,12	$u_{C,ESF,1550}$	0,17
Uniformidade espacial do detector	$u_{U,ESF}$	0,00	$u_{U,ESF}$	0,00
Dependência da polarização	$u_{P,ESF}$	0,00	$u_{P,ESF}$	0,00

Algumas componentes de incerteza foram consideradas desprezíveis como, por exemplo, a dependência do medidor padrão quanto à faixa espectral da fonte *laser*,

conforme indicado na literatura especializada [53].

A resolução do equipamento padrão utilizado na calibração não fez parte do cálculo da incerteza combinada, pois durante a calibração do padrão no IEP, sua incerteza devida à resolução já foi considerada. Como o padrão foi calibrado em sua resolução mais alta, e ele será usado na calibração de outros equipamentos também nesta mesma resolução, não podemos contabilizar a mesma incerteza duas vezes. Isto se aplica para o medidor sem esfera e para aquele com esfera integradora.

Quando estudamos o comportamento dos medidores quanto ao tipo de conector óptico empregado, notamos que as esferas possuem vantagens em relação ao medidor HP. Na determinação da incerteza de medição, temos que considerar a variação entre as leituras para um determinado conector. Como essas variações de leitura, durante os experimentos realizados, foram maiores para a esfera *Labsphere*, então suas incertezas $u_{C,ESF,1300}$ e $u_{C,ESF,1550}$ resultaram em valores maiores que o medidor sem esfera.

Estes valores piores para a esfera não constituem desvantagem, pois as incertezas de medição oriundas de seu certificado de calibração ($u_{ESF,1300}$ e $u_{ESF,1550}$) são menores que o outro padrão. Além disso, suas componentes relativas à uniformidade espacial do detector ($u_{U,ESF}$) e dependência da polarização ($u_{P,ESF}$) são nulas, enquanto que para o medidor HP ocorrem valores expressivos. Demais componentes calculadas são idênticas para os dois instrumentos.

Para encontrar as incertezas combinadas, devemos calcular as incertezas combinadas parciais e as incertezas dependentes do equipamento sob calibração.

7.1. Incertezas Combinadas Parciais

As incertezas combinadas parciais para o medidor HP81521B ($u_{CBP,HP,1300}$ e $u_{CBP,HP,1550}$) nos comprimentos de onda 1300nm e 1550nm são dadas, respectivamente, por (61) e (62), onde os valores estão expressos em porcentagem.

$$\begin{aligned}
u_{CBP,HP,1300} &= \sqrt{(u_{HP,1300})^2 + (u_L)^2 + (u_E)^2 + (u_{\lambda,1300})^2 + (u_T)^2 + (u_{C,HP,1300})^2 + (u_{U,HP})^2 + (u_{P,HP})^2} \\
&= \sqrt{(0,60)^2 + (0,23)^2 + (0,03)^2 + (0,06)^2 + (1,77)^2 + (0,09)^2 + (0,12)^2 + (0,29)^2} = 1,91\% \quad (61)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{CBP,HP,1550} &= \sqrt{(u_{HP,1550})^2 + (u_L)^2 + (u_E)^2 + (u_{\lambda,1550})^2 + (u_T)^2 + (u_{C,HP,1550})^2 + (u_{U,HP})^2 + (u_{P,HP})^2} \\
&= \sqrt{(0,58)^2 + (0,23)^2 + (0,03)^2 + (0,58)^2 + (1,77)^2 + (0,14)^2 + (0,12)^2 + (0,29)^2} = 1,99\% \quad (62)
\end{aligned}$$

As incertezas combinadas parciais para a esfera integradora *Labsphere* ($u_{CBP,ESF,1300}$ e $u_{CBP,ESF,1550}$) nos comprimentos de onda 1300nm e 1550nm são dadas, respectivamente, por (63) e (64), onde os valores também estão expressos em porcentagem.

$$\begin{aligned}
u_{CBP,ESF,1300} &= \sqrt{(u_{ESF,1300})^2 + (u_L)^2 + (u_E)^2 + (u_{\lambda,1300})^2 + (u_T)^2 + (u_{C,ESF,1300})^2 + (u_{U,ESF})^2 + (u_{P,ESF})^2} \\
&= \sqrt{(0,55)^2 + (0,23)^2 + (0,03)^2 + (0,06)^2 + (1,77)^2 + (0,12)^2 + (0,00)^2 + (0,00)^2} = 1,87\% \quad (63)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{CBP,ESF,1550} &= \sqrt{(u_{ESF,1550})^2 + (u_L)^2 + (u_E)^2 + (u_{\lambda,1550})^2 + (u_T)^2 + (u_{C,ESF,1550})^2 + (u_{U,ESF})^2 + (u_{P,ESF})^2} \\
&= \sqrt{(0,56)^2 + (0,23)^2 + (0,03)^2 + (0,58)^2 + (1,77)^2 + (0,17)^2 + (0,00)^2 + (0,00)^2} = 1,96\% \quad (64)
\end{aligned}$$

A TABELA 7.3 resume as combinações parciais. Notamos que os valores para a esfera integradora são menores que para o medidor HP.

TABELA 7.3 - COMBINAÇÕES PARCIAIS DE INCERTEZAS PARA CADA PADRÃO

Padrão	1300nm ±[%]		1550nm ±[%]	
Medidor HP81521B	$u_{CBP,HP,1300}$	1,91	$u_{CBP,HP,1550}$	1,99
Esfera integradora <i>Labsphere</i>	$u_{CBP,ESF,1300}$	1,87	$u_{CBP,ESF,1550}$	1,96

7.2. Incertezas do Equipamento sob Calibração

Devemos agora computar as componentes de incertezas relacionadas diretamente com o medidor sob calibração, ou seja, o *Anritsu* MA9301A. São duas componentes consideradas: resolução do instrumento sob calibração e a incerteza Tipo A, referente às leituras obtidas no medidor *Anritsu*.

O medidor *Anritsu* MA9301A foi calibrado em sua melhor resolução, ou seja, 0,01dB, equivalente a 0,23%, conforme (65).

$$res_{\%} = 100 \left(10^{\left(\frac{0,01dB}{10} \right)} - 1 \right) = 0,23\% \quad (65)$$

A incerteza u_R referente à resolução do equipamento sob calibração é dada pela metade da melhor resolução dividida pela raiz quadrada de três, de acordo com (66), pois é considerada uma distribuição retangular e um nível de confiança de 68%. O valor encontrado para u_R é de $\pm 0,07\%$.

$$u_R = \frac{\left(\frac{res_{\%}}{2} \right)}{\sqrt{3}} = 0,07\% \quad (66)$$

Quando descrevemos os procedimentos para a calibração do *Anritsu* MA9301A, calculamos o desvio padrão para cada conjunto de leituras. A partir destes valores, calculamos as incertezas Tipo A (u_A) de acordo com (67), onde n é o número de amostras e $s(\bar{q})$ é o desvio padrão das amostras. Como foram realizadas 6 leituras, temos $n = 6$.

$$u_A = \frac{s(\bar{q})}{\sqrt{n}} = \frac{s(\bar{q})}{\sqrt{6}} \quad (67)$$

A TABELA 7.4 lista as incertezas Tipo A para cada calibração do *Anritsu* MA9301A, onde os valores nulos ocorrem porque todas as leituras foram idênticas.

TABELA 7.4 - INCERTEZAS TIPO A PARA CALIBRAÇÃO DO ANRITSU MA9301A

Padrão	1300nm ±[%]		1550nm ±[%]	
Medidor HP81521B	$u_{A,HP,1300}$	0,00	$u_{A,HP,1550}$	0,05
Esfera integradora <i>Labsphere</i>	$u_{A,ESF,1300}$	0,00	$u_{A,ESF,1550}$	0,05

7.3. Incertezas Combinadas

As incertezas combinadas para o *Anritsu* MA9301A calibrado com o medidor HP81521B ($u_{CB,HP,1300}$ e $u_{CB,HP,1550}$) são calculadas conforme (68) e (69).

$$u_{CB,HP,1300} = \sqrt{(u_{CBP,HP,1300})^2 + (u_R)^2 + (u_{A,HP,1300})^2} = \sqrt{(1,91)^2 + (0,07)^2 + (0,00)^2} = 1,91\% \quad (68)$$

$$u_{CB,HP,1550} = \sqrt{(u_{CBP,HP,1550})^2 + (u_R)^2 + (u_{A,HP,1550})^2} = \sqrt{(1,99)^2 + (0,07)^2 + (0,05)^2} = 1,99\% \quad (69)$$

As incertezas combinadas para o *Anritsu* MA9301A calibrado com a esfera integradora *Labsphere* ($u_{CB,ESF,1300}$ e $u_{CB,ESF,1550}$) são calculadas conforme (70) e (71).

$$u_{CB,ESF,1300} = \sqrt{(u_{CBP,ESF,1300})^2 + (u_R)^2 + (u_{A,ESF,1300})^2} = \sqrt{(1,87)^2 + (0,07)^2 + (0,00)^2} = 1,87\% \quad (70)$$

$$u_{CB,ESF,1550} = \sqrt{(u_{CBP,ESF,1550})^2 + (u_R)^2 + (u_{A,ESF,1550})^2} = \sqrt{(1,96)^2 + (0,07)^2 + (0,05)^2} = 1,96\% \quad (71)$$

7.4. Incertezas Expandidas

Primeiramente calculamos o número de graus de liberdade efetivos v_{eff} de cada incerteza combinada obtida. Como visto anteriormente, para as incertezas Tipo B teremos graus de liberdade considerados infinitos. Para as incertezas Tipo A, os graus de liberdade $v_{i,TipoA}$ são dados conforme (72), sendo n igual ao número de leituras.

$$v_{i,TipoA} = n - 1 = 6 - 1 = 5 \quad (72)$$

Usando a fórmula de *Welch-Satterthwaite*, notamos que os graus de liberdade efetivos v_{eff} para os dois padrões, nos dois comprimentos de onda, serão maiores do que 100. Consultando a tabela de fatores de abrangência k em função dos graus de liberdade efetivos, para um nível de confiança de 95%, encontramos o valor de k igual a 1,96.

Portanto, utilizamos o mesmo fator k para calcular as incertezas expandidas do equipamento *Anritsu* nas calibrações, conforme (73), (74), (75) e (76).

$$U_{ANRITSU,HP,1300} = k \cdot u_{CB,HP,1300} = 1,96 \cdot 1,91 = 3,74\% \quad (73)$$

$$U_{ANRITSU,HP,1550} = k \cdot u_{CB,HP,1550} = 1,96 \cdot 1,99 = 3,90\% \quad (74)$$

$$U_{ANRITSU,ESF,1300} = k \cdot u_{CB,ESF,1300} = 1,96 \cdot 1,87 = 3,67\% \quad (75)$$

$$U_{ANRITSU,ESF,1550} = k \cdot u_{CB,ESF,1550} = 1,96 \cdot 1,96 = 3,85\% \quad (76)$$

8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados das duas calibrações do medidor *Anritsu* MA9301A, tendo como padrões o medidor HP81521B e a esfera integradora *Labsphere* LPM-040-SF, podem ser visualizados a seguir para 1300nm (TABELA 8.1) e 1550nm (TABELA 8.2). As planilhas completas utilizadas para todos esses cálculos estão apresentadas em anexo.

TABELA 8.1 - CALIBRAÇÃO DO ANRITSU MA9301A COM O MEDIDOR HP81521B

Parâmetro	Unidade	1300nm	1550nm
Medição (Padrão)	[mW]	0,95	0,95
Medição (<i>Anritsu</i>)	[mW]	0,96	0,98
Erro de medição	[%]	1,11	3,44
Incerteza combinada parcial	$\pm$ [%]	1,91	1,99
Incerteza associada à resolução	$\pm$ [%]	0,07	0,07
Incerteza Tipo A (leituras)	$\pm$ [%]	0,00	0,05
Incerteza combinada	$\pm$ [%]	1,91	1,99
Incerteza expandida $k=1,96$ (95%)	$\pm$ [%]	3,74	3,90

TABELA 8.2 - CALIBRAÇÃO DO ANRITSU MA9301A COM A ESFERA INTEGRADORA

Parâmetro	Unidade	1300nm	1550nm
Medição (Padrão)	[mW]	0,94	0,96
Medição (<i>Anritsu</i>)	[mW]	0,96	0,98
Erro de medição	[%]	2,22	1,76
Incerteza combinada parcial	$\pm$ [%]	1,87	1,96
Incerteza associada à resolução	$\pm$ [%]	0,07	0,07
Incerteza Tipo A (leituras)	$\pm$ [%]	0,00	0,05
Incerteza combinada	$\pm$ [%]	1,87	1,96
Incerteza expandida $k=1,96$ (95%)	$\pm$ [%]	3,67	3,85

As incertezas expandidas apresentadas nestas tabelas são resultados exclusivos para o equipamento específico que foi calibrado. Como o mesmo equipamento *Anritsu* MA9301A foi calibrado com os dois padrões, os valores apresentados são válidos para comparação.

As incertezas combinadas parciais, por serem dependentes exclusivamente das características dos padrões de calibração, são também chamadas de melhor capacidade de medição, quando multiplicadas pelo fator k igual a 1,96. Esta melhor capacidade é definida como a menor incerteza de medição que um laboratório pode atingir quando realiza calibrações rotineiras de instrumentos de medição próximos do ideal, projetados para a medição daquela grandeza [48].

Em nosso caso, as incertezas referentes aos padrões utilizados (melhor capacidade de medição) predominam sobre as outras duas fontes de incerteza (resolução e Tipo A). Como essas últimas são características do equipamento sob calibração, teremos incertezas com valores muito próximos para todos os equipamentos semelhantes ao *Anritsu* MA9301A que serão calibrados com os mesmos padrões.

No comprimento de onda de 1550nm, o menor erro de medição ocorre utilizando-se a esfera, mas em 1300nm seu erro é maior que o obtido com o HP81521B. Este fato não é relevante neste caso, pois todos esses valores de erros estão dentro das faixas de valores determinadas pelas incertezas de medição associadas. Além disso, as medições realizadas com o instrumento *Anritsu* podem ser facilmente corrigidas, subtraindo das leituras o valor do erro, para a determinação dos valores corretos.

As incertezas de medição expandidas para o medidor *Anritsu* MA9301A, nos dois comprimentos de onda, são realmente menores quando usamos a esfera integradora como padrão de calibração.

9. CONCLUSÕES

O objetivo proposto para este trabalho foi o de apresentar um procedimento prático e de utilidade para a escolha de um novo padrão de referência de laboratório, utilizando-se equipamentos e recursos limitados. O trabalho serve como um roteiro na determinação da eficiência desse novo padrão, das componentes de incerteza que influenciam as medições e como pode ser validado o sistema, fazendo uso de comparações com outros equipamentos já reconhecidos como padrões de medição.

Primeiramente estudamos as principais propriedades da esfera integradora (*Labsphere* LPM-040-SF) e fizemos experimentos de teste e desempenho. Calibramos a esfera estudada e um medidor sem esfera (HP81521B) em um laboratório europeu reconhecido internacionalmente, e os utilizamos para realizar uma calibração em um laboratório brasileiro, para uma comparação que fosse a mais realista possível. O equipamento escolhido para calibração foi um medidor de potência óptica com características típicas de um instrumento comercial largamente utilizado no laboratório (*Anritsu* MA9301A).

A calibração do medidor *Anritsu* com os dois padrões foi realizada seguindo o mesmo procedimento, inclusive com a mesma fonte óptica configurada para aproximadamente 0dBm, pois esta esfera disponível para os experimentos não é otimizada para medições de baixa potência.

Foram realizados estudos que permitiram determinar quais são as componentes de incerteza que influenciam as medições de ambos os padrões. As incertezas de medição para as duas calibrações do medidor *Anritsu* foram calculadas tomando como base informações da norma internacional aplicável [50] e o “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição” [47].

As incertezas de medição obtidas para o *Anritsu* MA9301A são realmente menores quando empregamos a esfera como padrão de calibração, comprovando que sua utilização é totalmente viável e vantajosa.

A diferença de valores parece pequena, mas as incertezas da esfera certamente serão reduzidas se forem empregados equipamentos mais novos. O *laser* utilizado na calibração do medidor de potência óptica *Anritsu*, por exemplo, mostrou em estudos anteriores [52] uma pequena variação em seu comprimento de onda ao longo do tempo, o que poderia ser minimizado caso outro *laser* mais novo e equivalente estivesse disponível para substituí-lo.

Para um laboratório onde as condições climáticas possam ser controladas com melhor precisão, as incertezas referentes à variação do *laser* com a temperatura também teriam valores mais baixos.

A incerteza da esfera integradora aqui estudada ainda pode ser menor, caso forem utilizados equipamentos de qualidade superior, e outros tipos de instrumentos para realização de estudos de componentes de incerteza com melhor precisão, que não estavam disponíveis para a realização deste trabalho. Alguns laboratórios internacionais detentores de equipamentos mais sofisticados apresentam incertezas menores do que 1% para medidores com esfera [55], embora os valores aqui encontrados, considerando-se os recursos disponíveis, também possam ser considerados excelentes.

Concluimos que a esfera integradora em radiômetro é uma ótima solução como um padrão de referência para calibração de medidores de potência óptica. Apresentando características fundamentais para um bom padrão de medição, ela elimina problemas relacionados com alinhamento, variações angulares do feixe do *laser* e a não-uniformidade do detector [28], pois a radiação é integrada pela esfera antes de atingir o sensor. Além dessas vantagens, os medidores que usam esfera integradora são menos dependentes do tipo de conector óptico instalado na fibra.

Para trabalhos futuros, sugerimos o estudo de novas componentes de incerteza, de preferência usando instrumentos mais sofisticados. Pesquisando mais detalhadamente algumas componentes aqui descritas, talvez seja possível uma melhor estimativa de suas influências, vindo diminuir substancialmente o valor de algumas delas.

Essa melhoria contínua faz parte da metrologia e não deve ser entendida como uma pesquisa incompleta, e sim como a primeira etapa de um processo contínuo, cujo progresso depende muito do metrologista.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Yehia. “Critérios para análise dos resultados apresentados em um certificado de calibração”. ENQUALAB - Encontro para a Qualidade de Laboratórios. 5 p. São Paulo, 2004.
- [2] ISO. “ISO/IEC 17025:1999 - General requirements for the competence of testing and calibration laboratories”. 1. ed. 1999.
- [3] ABNT. “NBR ISO/IEC 17025:2005 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração”. 2. ed. 31 p. Rio de Janeiro, 2005.
- [4] ABNT. “ABNT ISO/IEC Guia 25:1993 - Requisitos gerais para capacitação de laboratórios de calibração e de ensaios”. 1. ed. 7 p. Rio de Janeiro, 1993.
- [5] H. H. Bertan, Y. Iano. “Análise de Desempenho da Esfera Integradora para Calibração de Medidores de Potência Óptica”. Revista Científica Periódica - Telecomunicações – INATEL. v. 9, n. 2, p. 7-12. 2007.
- [6] INMETRO. “Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia - VIM”. 3. ed. 75 p. Rio de Janeiro, 2003.
- [7] A. C. Parr. “A National Measurement System for Radiometry, Photometry, and Pyrometry Based upon Absolute Detectors”, (version 1.0). Disponível em: <<http://physics.nist.gov/Pubs/TN1421/contents.html>>. Acesso em 09/02/2006. National Institute of Standards and Technology - NIST, Gaithersburg, MD. Publicação original: NIST Technical Note 1421, 1996.
- [8] J. M. Houston, D. J. Livigni. “Comparison of Two Cryogenic Radiometers at NIST”. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. v. 106, n. 4, p. 641–647. 2001.
- [9] A. P. Cunha et al. “Radiômetro criogênico: referência primária do Inmetro para medidas de radiação óptica”. Metrologia. 2003.
- [10] L-1 Standards and Technology, Inc. “Cryogenic Radiometer CryoRad II”. 2 p. Ijamsville, USA, 2004.

- [11] Cambridge Research & Instrumentation, Inc. “Cryogenic Radiometer User’s Manual”. 178 p. Boston, USA, [s.d.].
- [12] K. M. Nield, J. F. Clare, J. D. Hamlin, A. Bittar. “Calibration of a trap detector against a cryogenic radiometer”. *Metrologia*. v. 35, p. 581–586. 1998.
- [13] M. Simões et al. “Montagem e caracterização de detectores padrão do tipo armadilha óptica”. *Metrologia*. 2003.
- [14] W. F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman. “Fibras Ópticas: tecnologia e projeto de sistemas”. 1. ed. Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.
- [15] J. L. Gardner. “Transmission trap detectors”. *Applied Optics*. v. 33, n. 25, p. 5914–18. 1994.
- [16] J. H. Lehman, C. L. Cromer. “Optical trap detector for calibration of optical fiber powermeters: coupling efficiency”. *Applied Optics*. v. 41, n. 31, p. 6531–36. 2002.
- [17] E. F. Zalewski, J. Geist. “Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration”. *Applied Optics*. v. 19, p. 1214–19. 1980.
- [18] E. F. Zalewski, C. R. Duda. “Silicon photodiode with 100% external quantum efficiency”. *Applied Optics*. v. 22, p. 2867–73. 1983.
- [19] N. P. Fox, “Trap detectors and their properties”. *Metrologia*. v. 28, p. 197–202. 1991.
- [20] A. Lassila et al. “Intercomparison of cryogenic radiometers using silicon trap detectors”. *Meas. Sci. Technol.* v. 8 p. 123–127. 1997.
- [21] A. M. Melo. “Radiometria com sensores de banda larga para a faixa THz”. 108 p. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.
- [22] V. O. C. Concha. “Conversor de energia luminosa em elétrica para dispositivos de baixa potência utilizando o efeito piroelétrico do polímero PVDF”. 83 p. Dissertação (mestrado). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

- [23] R. Ulbricht. "Photometer for Mean Spherical Candle-Power". *Electrotech. Zeit.* v.21, p. 595-597. 1900.
- [24] D. K. Edwards, J. T. Gier, K. E. Nelson, R. D. Roddick. "Integrating Sphere for Imperfectly Diffuse Samples". *J. Opt. Soc. Am.* v. 51, p. 1279-1288. 1961.
- [25] R. T. Neher, D. K. Edwards, "Far Infrared Reflectometer for Imperfectly Diffuse Specimens". *Applied Optics.* v. 4, p. 775-780. 1965.
- [26] A. H. Taylor. "The Measurement of Diffuse Reflection Factors and a New Absolute Reflectometer". *J. Opt. Soc. Am.* v. 4, p. 9-23. 1920.
- [27] A. H. Taylor. "Errors in Reflectometry". *J. Opt. Soc. Am.* v. 25, p. 51-56. 1935.
- [28] Labsphere, Inc. "A Guide to Integrating Sphere Radiometry and Photometry". 26 p. North Sutton, 2003.
- [29] J. A. Jacquez, H. F. Kuppenheim. "Theory of the Integrating Sphere". *J. Opt. Soc. Am.* v. 45, n. 6, p. 460-470. 1955.
- [30] M. W. Finkel. "Integrating Sphere Theory". *Opt. Commun.* v. 2, p. 25-28. 1970.
- [31] Labsphere, Inc. "A Guide to Integrating Sphere Theory and Applications". 19 p. North Sutton, 2003.
- [32] D. G. Goebel. "Generalized Integrating-Sphere Theory". *Applied Optics.* v. 6, n. 1, p. 125-128. 1967.
- [33] R. L. Lucke. "Lambertian radiance and transmission of an integrating sphere". *Applied Optics.* v. 46, n. 28, p. 6966-70. 2007.
- [34] K. A. Snail, L. M. Hanssen. "Integrating Sphere Designs with Isotropic Throughput". *Applied Optics.* v. 28, p. 1793. 1959.
- [35] L. M. Hanssen. "Effects of restricting the detector field of view when using integrating spheres". *Applied Optics.* v. 28, n. 11, p. 2097-2103. 1989.
- [36] A. Ducharme, A. Daniels, E. Grann, G. Boreman. "Design of an Integrating Sphere as a Uniform Illumination Source". *IEEE Transactions on Education.* v. 40, n. 2, p. 131-134. 1997.

- [37] Labsphere, Inc. “LPM-040-SF Instruction Manual - SX-01673-000, Rev. 0”. 6 p. North Sutton, 2003.
- [38] Keithley Instruments, Inc. “Keithley Model 6485 Picoammeter Instruction Manual - 6485-901-01 Rev. A”. 312 p. Cleveland, 2001.
- [39] Labsphere, Inc. “A Guide to Reflectance Coatings and Materials”. 25 p. North Sutton, 2003.
- [40] Labsphere, Inc. “Calibration Certificate n°: 41011-1-1, LPM-040, Laser Power Meter”. 2 p. North Sutton, 2003.
- [41] Hewlett-Packard GmbH. “Operating and Programming Manual - HP 8153A Lightwave Multimeter - HP Part N° 08153-90011”. 3. ed. 288 p. Boeblingen, Germany, 1999.
- [42] Instituto Electrotécnico Português. “Certificado de Calibração n°: M-2005-1696 - Fontes Ópticas”. 4 p. Porto, Portugal, 2005.
- [43] Instituto Electrotécnico Português. “Certificado de Calibração n°: M-2005-1695.00 - Medidor de Potência Óptica com Esfera Integradora”. 3 p. Porto, Portugal, 2005.
- [44] Instituto Electrotécnico Português. “Certificado de Calibração n°: M-2005-1695.01 - Medidor de Potência Óptica com Esfera Integradora”. 3 p. Porto, Portugal, 2005.
- [45] Hewlett-Packard GmbH. “Users Guide - HP 81533B Optical Head Interface Module, HP 81520A, HP 81521B, HP 81524A, and HP 81525A Optical Heads - HP Part N° 81533-90014”. 4. ed. Boeblingen, Germany, 1994.
- [46] Instituto Electrotécnico Português. “Certificado de Calibração n°: M-2005-1693 – Medidor de Potência Óptica”. 3 p. Porto, Portugal, 2005.
- [47] ABNT, INMETRO. “Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM)”. 3.ed. 120 p. Rio de Janeiro, 2003.
- [48] INMETRO, ABNT, SBM. “Expressão da Incerteza de Medição na Calibração”. 1. ed. brasileira em língua portuguesa do documento EA-4/02. 34 p. Rio de Janeiro, 1999.

- [49] C. P. Saraiva, N. E. Venturini. “Simplificando o cálculo da incerteza de medição em ensaios e calibrações rotineiras”. ENQUALAB - Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia. 4 p. São Paulo, 2004.
- [50] Comissão Eletrotécnica Internacional. “IEC 1315 - Calibração de medidores de potência em fibra óptica”. 1ª ed. 60 p. Genebra, 1995.
- [51] C. Hentschel, W. Radermacher. “Optical Power Measurement: Unconventional Solutions of Common Problems”. Hewlett-Packard Company. Böblingen, Germany, 1990.
- [52] C. P. Saraiva, H. H. Bertan, M. Morais, Y. Iano. “Um estudo sobre a reprodutibilidade de técnica espectrométrica de alta resolução para sistemas DWDM”. ENQUALAB - Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia. 5 p. São Paulo, 2006.
- [53] C. Hentschel. “Setting up a Calibration System for Fiber-Optic Power Meters - A Recommendation”. Hewlett-Packard GmbH. Böblingen, Germany, 1995.
- [54] E. Bucher, W. Stumpf. “Investigation and Simulation of the Optical Properties of Doped Silicon”. University of Constance, 2001.
- [55] J. Envall, P. Kärhä, E. Ikonen. “Measurements of fibre optic power using photodiodes with and without an integrating sphere”. Metrologia. v. 41, p. 353–358. 2004.

11. ANEXO

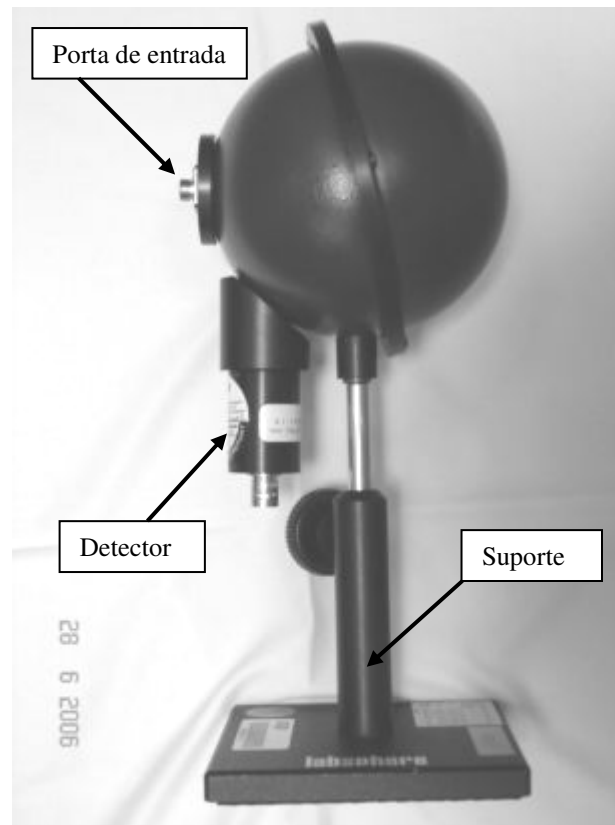


Fig. 11.1 - Esfera integradora.



Fig. 11.2 - Esfera integradora em três vistas.



Fig. 11.3 - Radiômetro criogênico.

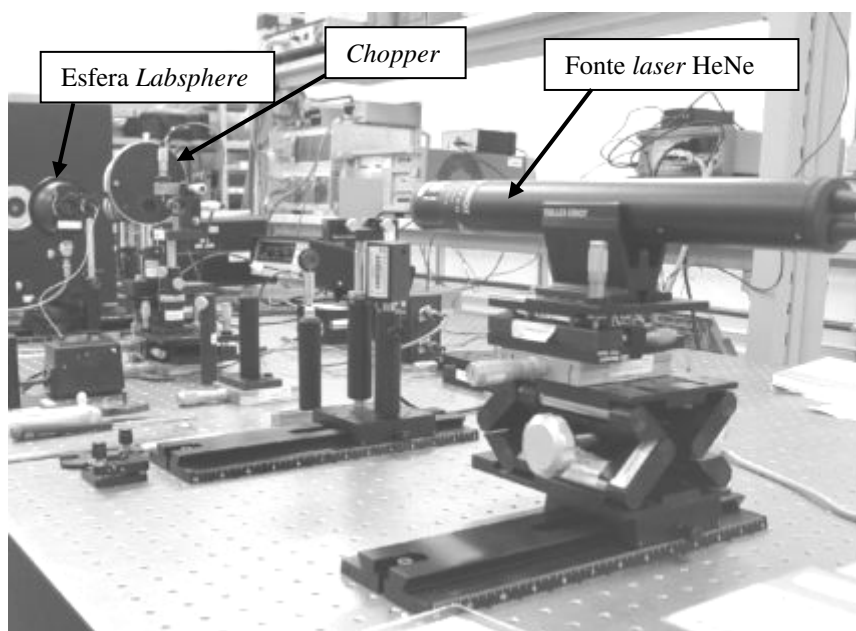


Fig. 11.4 - Montagem para verificação da esfera integradora.

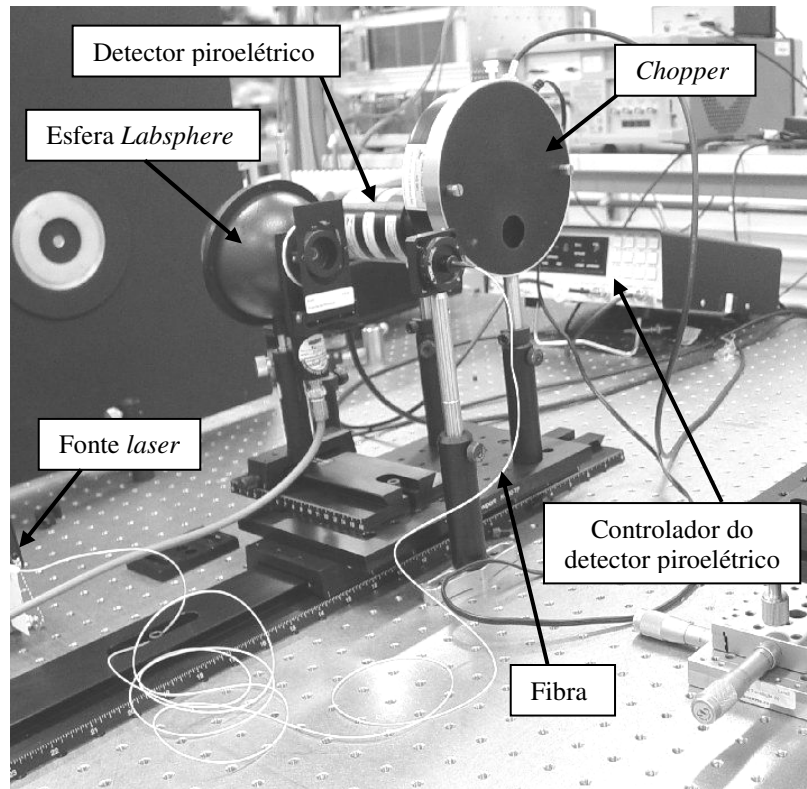


Fig. 11.5 - Esfera integradora e detector piroelétrico.

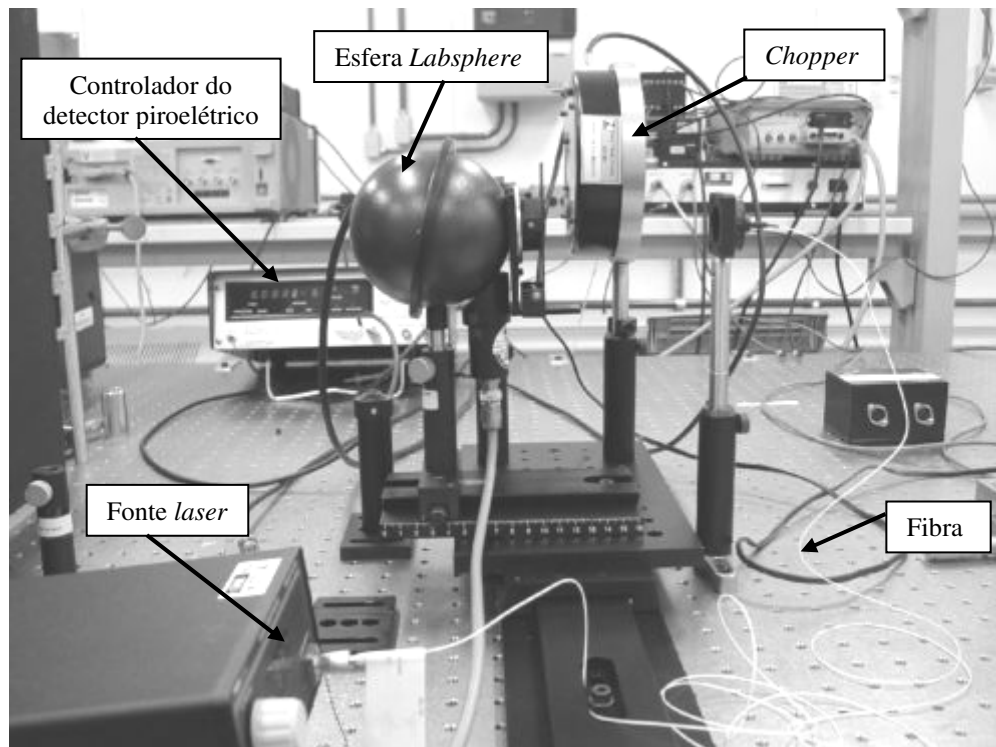


Fig. 11.6 - Esfera integradora e detector piroelétrico em vista de perfil.

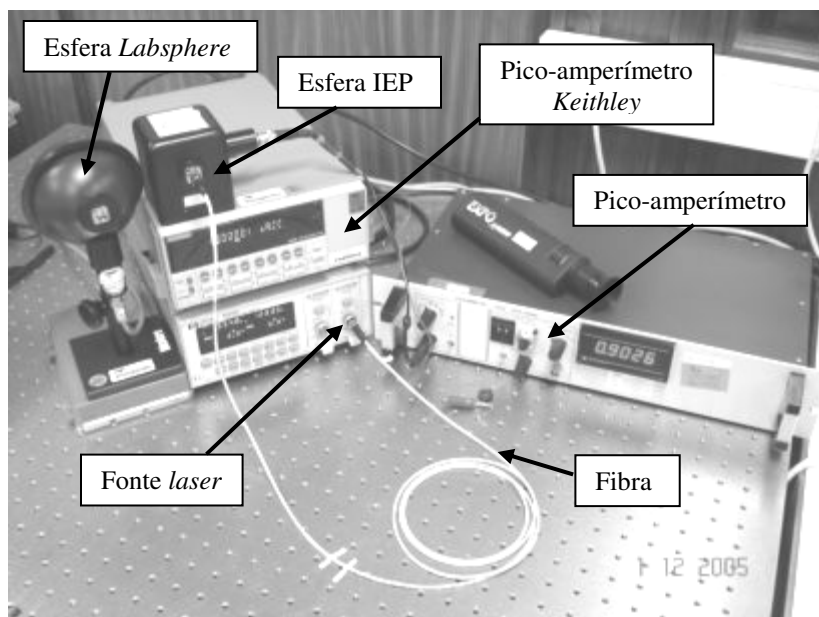


Fig. 11.7 - Montagem para primeira calibração da esfera integradora.

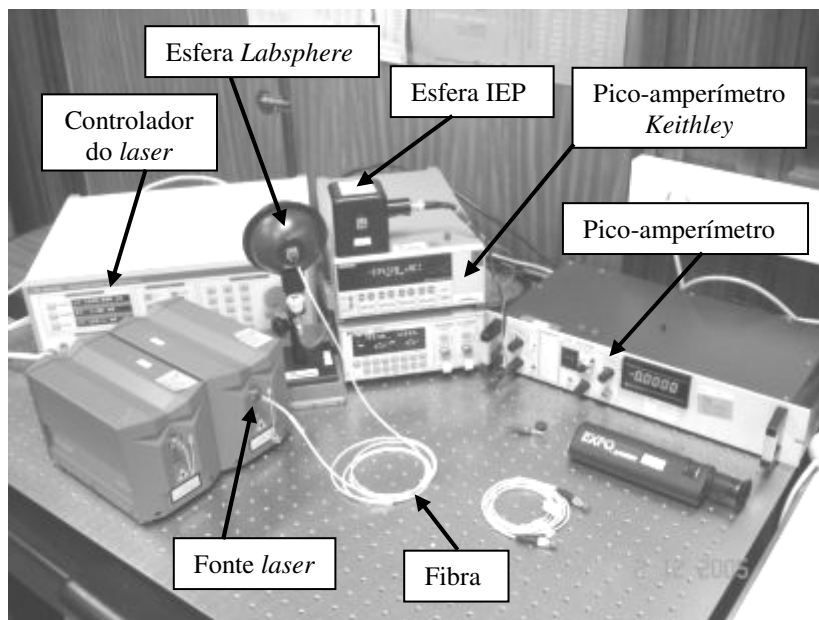


Fig. 11.8 - Montagem para segunda calibração da esfera integradora.

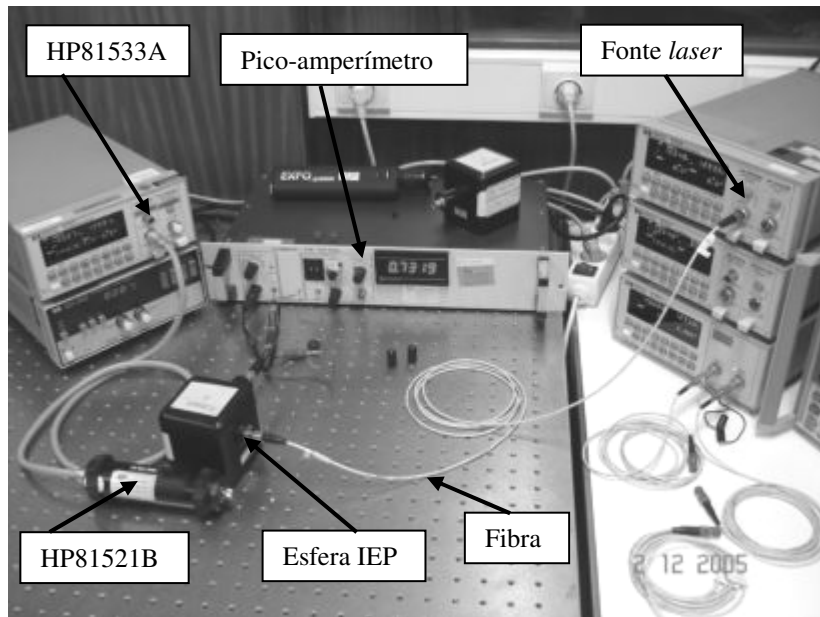


Fig. 11.9 - Montagem para calibração em potência óptica do medidor sem esfera.

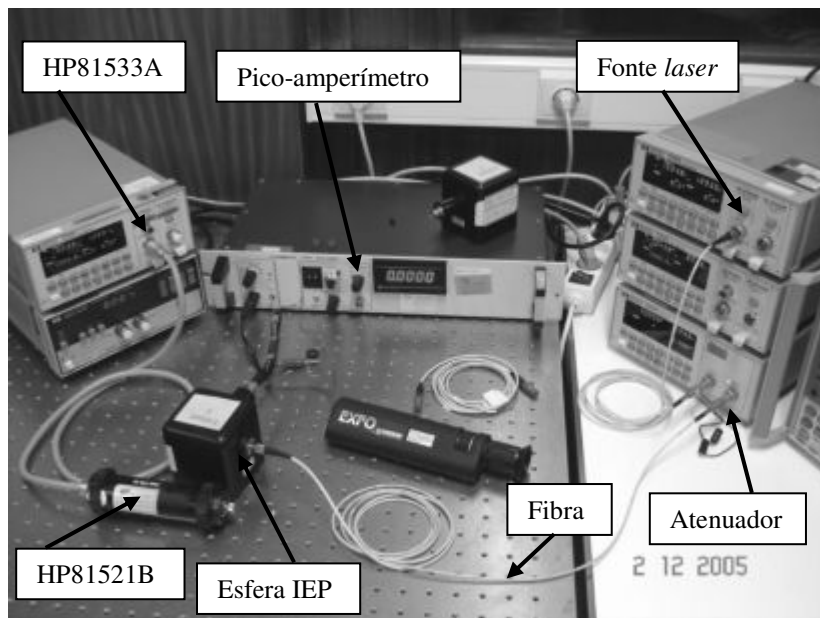


Fig. 11.10 - Montagem para calibração em linearidade do medidor sem esfera.

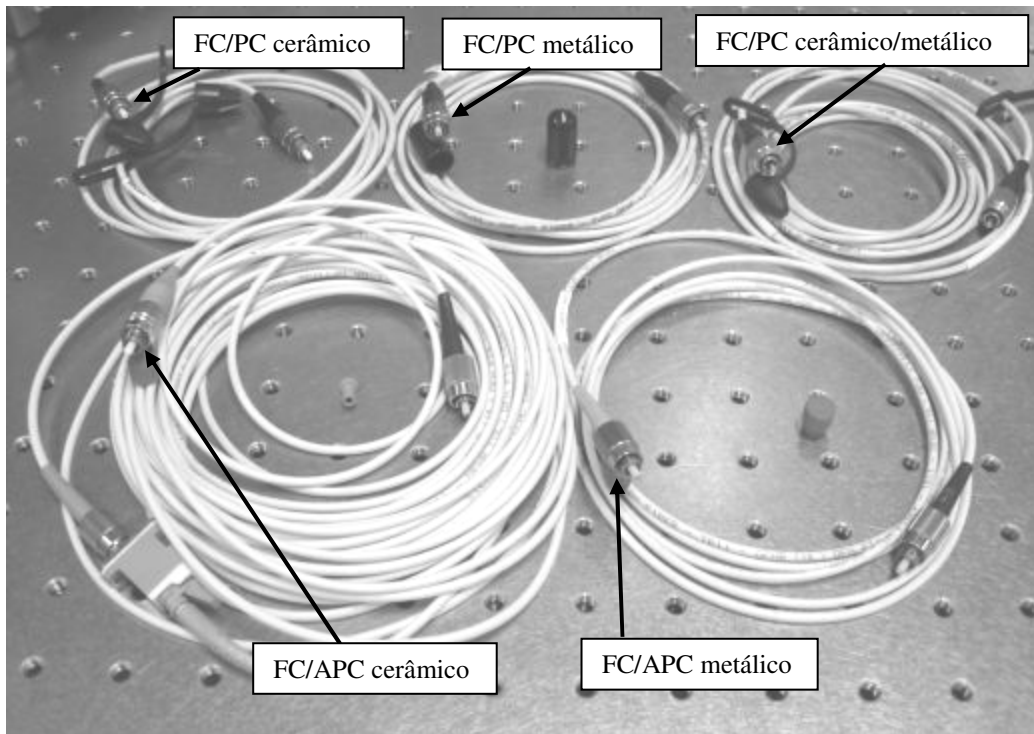


Fig. 11.11 - Conectores ópticos avaliados.

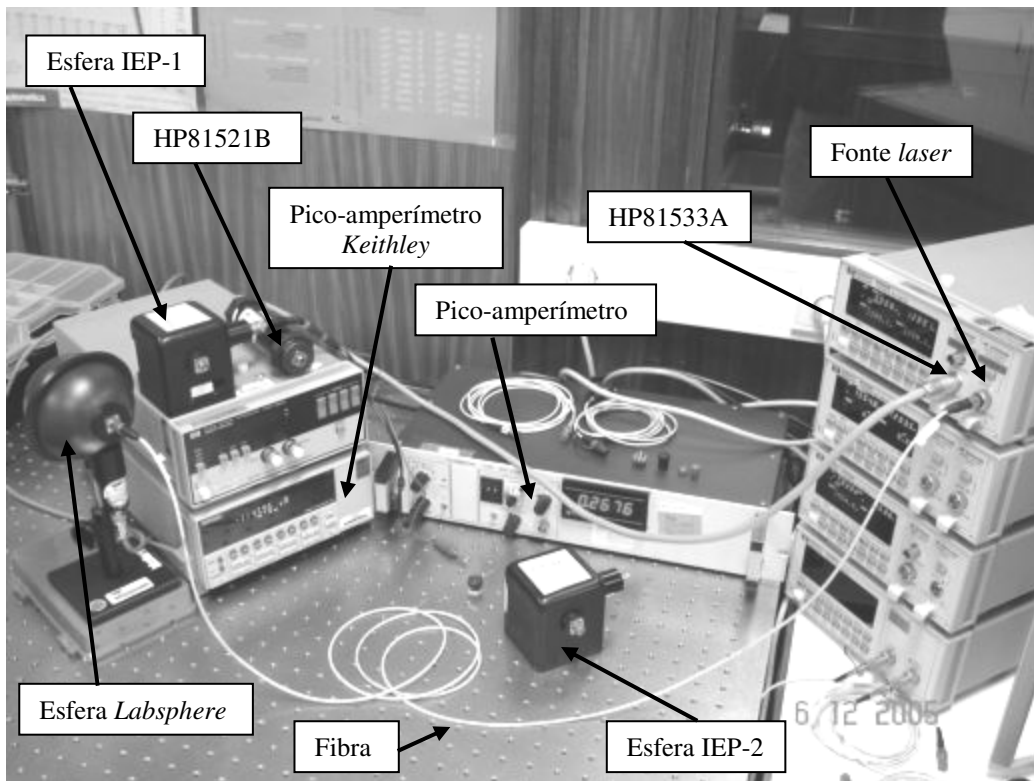


Fig. 11.12 - Montagem para medições com diferentes conectores.



Fig. 11.13 - Esfera integradora e pico-amperímetro.

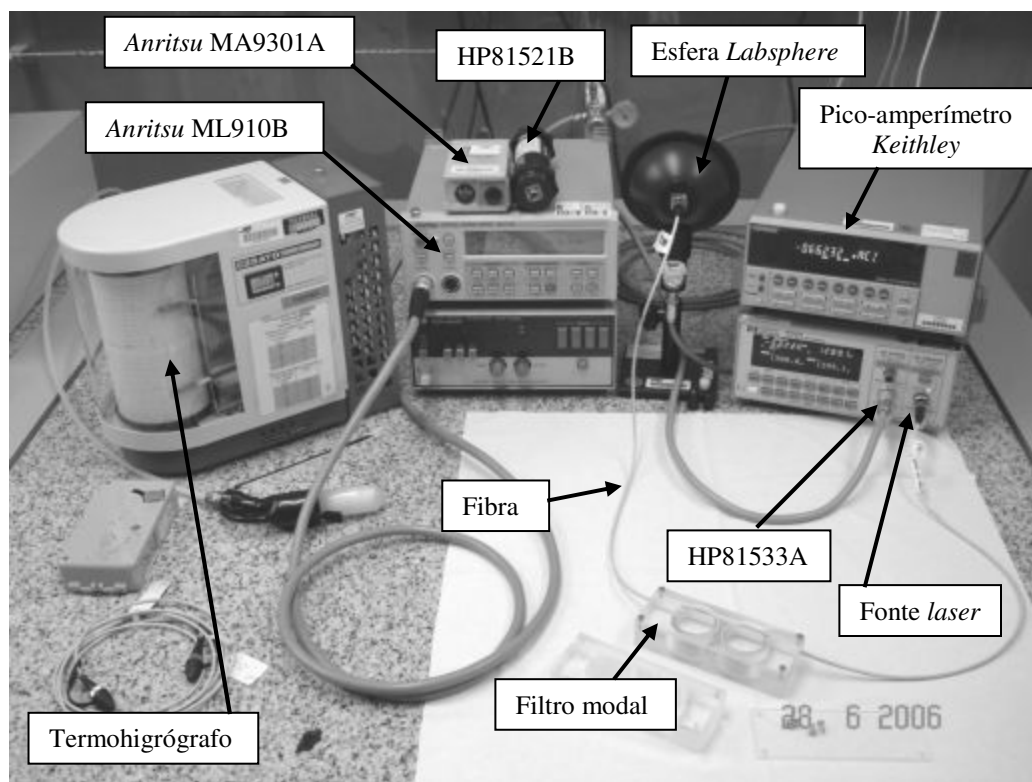


Fig. 11.14 - Montagem para calibração do medidor *Anritsu* MA9301A.

Esfera Integradora Labsphere

Certificado de Calibração do fabricante:

Número: 41011-1-1

Data: 22/12/2003

Laboratório de Calibração: Labsphere, Inc., Optical Calibration Laboratory

Documentos aplicáveis: QP-14038-000 Spectral Responsivity Calibration Procedure for Silicon Based Photodiode Systems

Temperatura ambiente: 21 $\pm$ 2°C.

National laboratory traceable standard(s):

Standard detector of spectral responsivity GDA-B, OCL-69 (NIST & NPL)

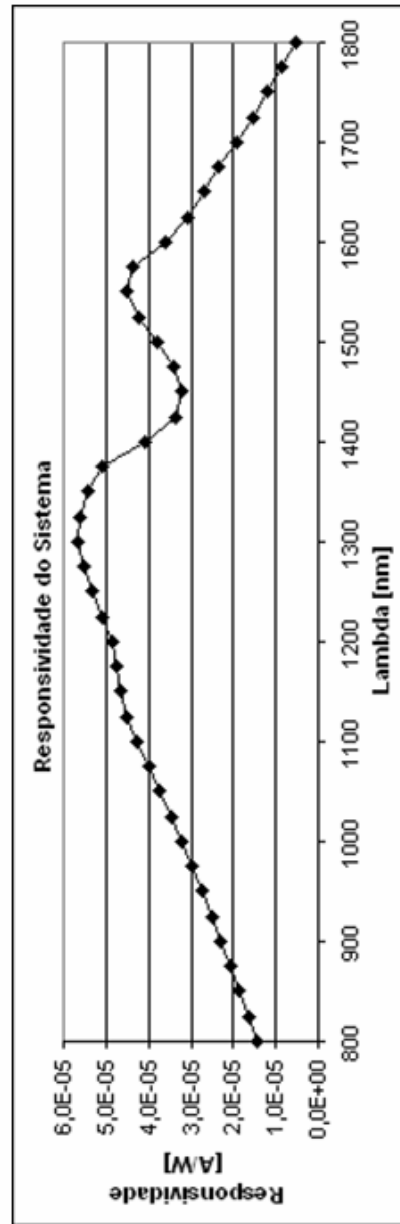
Responsividade do Sistema

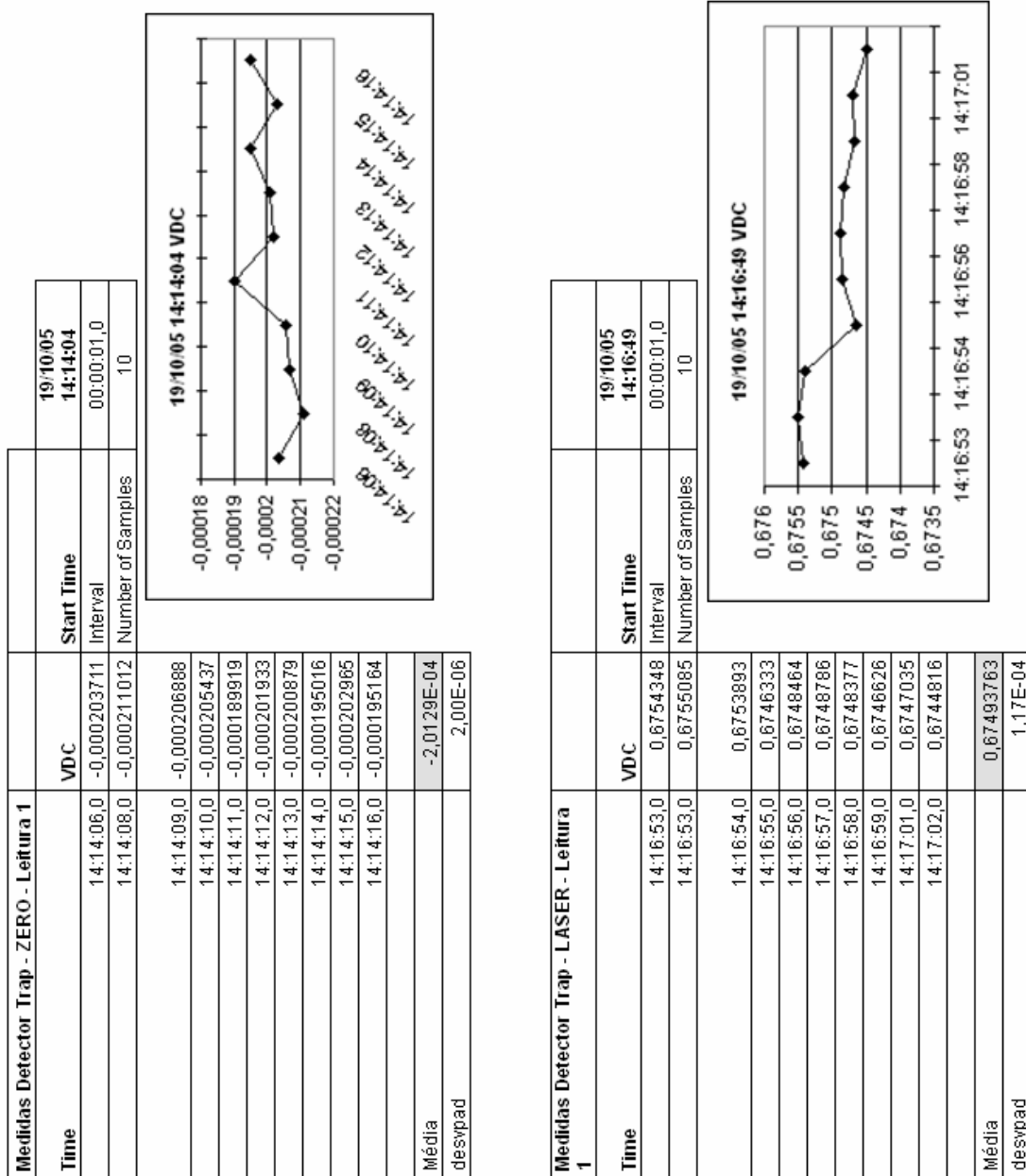
Lambda [nm]	Responsividade [A/W]
800	1,46E-05
825	1,65E-05
850	1,85E-05
875	2,08E-05
900	2,30E-05
925	2,52E-05
950	2,74E-05
975	2,96E-05
1000	3,20E-05
1025	3,44E-05
1050	3,74E-05

1075	4,00E-05
1100	4,27E-05
1125	4,51E-05
1150	4,65E-05
1175	4,77E-05
1200	4,83E-05
1225	5,09E-05
1250	5,33E-05
1275	5,53E-05
1300	5,65E-05
1325	5,63E-05

1350	5,43E-05
1375	5,10E-05
1400	4,09E-05
1425	3,34E-05
1450	3,21E-05
1475	3,40E-05
1500	3,81E-05
1525	4,23E-05
1550	4,50E-05
1575	4,37E-05
1600	3,60E-05

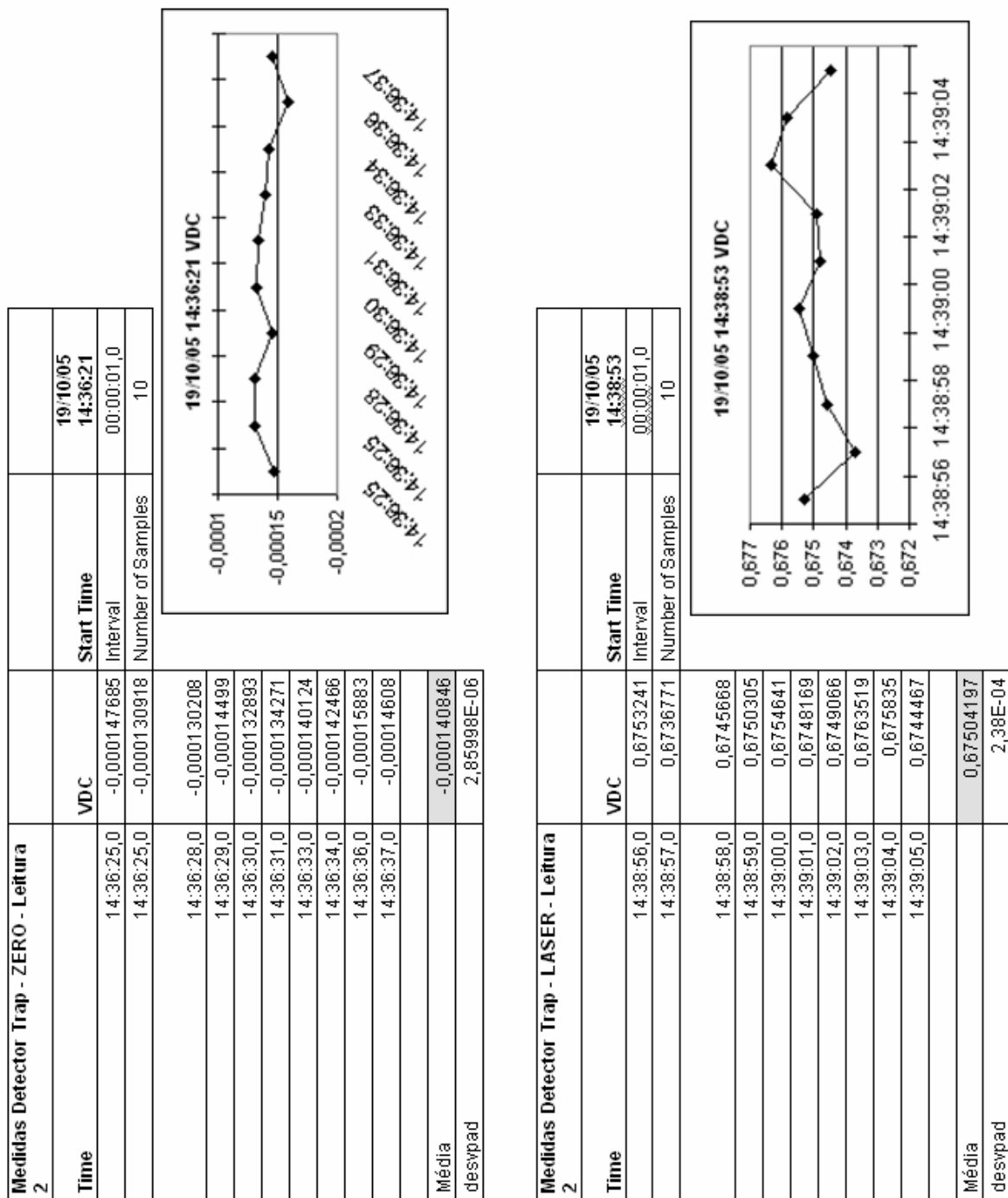
1625	3,05E-05
1650	2,70E-05
1675	2,37E-05
1700	1,90E-05
1725	1,52E-05
1750	1,19E-05
1775	8,71E-06
1800	5,52E-06

**Fig. 11.15 - Dados enviados pelo fabricante da esfera integradora.**

Fig. 11.16 - Primeira medição do detector *trap* na verificação do detector piroelétrico.

Medidas do Detector Piroelétrico		Medidas do Detector Piroelétrico	
MEDIAS DO LASER		Zero	
Leituras	1,402E-05 1,403E-05 1,404E-05 1,401E-05 1,408E-05 1,409E-05 1,410E-05 1,403E-05 1,404E-05 1,401E-05	Leituras	1,19E-06 1,20E-06 1,21E-06 1,21E-06 1,22E-06 1,19E-06 1,17E-06 1,20E-06 1,20E-06 1,19E-06
Media	1,405E-05	media	1,20E-06
desvpad	1,046E-08	dsypad	4,27E-09

Fig. 11.17 - Medição na verificação do detector piroelétrico.

Fig. 11.18 - Segunda medição do detector *trap* na verificação do detector piroelétrico.

Calibração do Detector Piroelétrico
Padrão: Fotodetector Trap rastreado ao Radiômetro Criogênico,
Certificado Inmetro/DIMC1 1741/2005 (LARAD), cal: 02/06/2005, val: 02/06/06
Laser: Milles Griot, estabilizado, HeNe, 632,8nm

Local: Inmetro/Larad
Data: 19/10/2005
Temp: 20C

λ (nm)	Leitura 1			Teste (Piroelétrico) [Watt]			Leitura 2		
	Padrão (Trap Larad) [Volt]			zero	medidas	Δ	zero	medidas	Padrão (Trap Larad) [Volt]
632,8	-2,013E-04	0,6749	6,751E-01	1,198E-06	1,405E-05	1,2847E-05	-1,408E-04	0,6750	6,752E-01
MEDIA	1,996E-06	1,169E-04	1,169E-04	4,271E-09	1,046E-08	1,130E-08	2,860E-06	2,384E-04	2,384E-04
DESVPED									
Transimpedância setada para: 1E+05									média final Trap V 6,752E-01
									média final Trap A 6,752E-06
Consta no Cert do Aplif De transimpedância: Para ganho "1E-5":									Responsividade Trap Extrai do Certificado AAW 0,4799
1,00E+05 trans 1,00E-05 A 1,000E-05 A									média final Trap W 1,407E-05
1 V									Erro do Piroelétrico W -1,222E-06
									% -8,68

Fig. 11.19 - Resumo das medições na verificação do detector piroelétrico.

Calibração do Detector Ge
Padrão: Detector Piroelétrico
Laser: ThorLabs 1550 nm

Local: ImmetroLarad
 Data: 21/10/2005
 Temp: 20°C

λ (nm)	Leitura 1			Teste (Detector Ge) [A]			Leitura 2			Responsividade Teste (Detector Ge) [A/W]
	zero	medidas	A	zero	medidas	A	zero	medidas	A	
1550	0,000E+00	1,004E-03	1,004E-03	4,2423E-10	9,2623E-04	9,2623E-04	0,000E+00	1,005E-03	1,005E-03	0,8496
	0,000E+00	1,005E-03	1,005E-03	3,7917E-10	9,2626E-04	9,2626E-04	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	
	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	3,6301E-10	9,2607E-04	9,2607E-04	0,000E+00	1,000E-03	1,000E-03	
	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	4,0105E-10	9,2486E-04	9,2486E-04	0,000E+00	1,006E-03	1,006E-03	
	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	4,1407E-10	9,2655E-04	9,2655E-04	0,000E+00	1,004E-03	1,004E-03	
	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	3,5410E-10	9,2883E-04	9,2883E-04	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	
	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	4,1185E-10	9,2443E-04	9,2443E-04	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	
	0,000E+00	1,002E-03	1,002E-03	3,6877E-10	9,2528E-04	9,2528E-04	0,000E+00	1,004E-03	1,004E-03	
	0,000E+00	1,000E-03	1,000E-03	4,1416E-10	9,2637E-04	9,2637E-04	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	
	0,000E+00	1,005E-03	1,005E-03	4,6834E-10	9,2634E-04	9,2634E-04	0,000E+00	1,004E-03	1,004E-03	
Médias	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	3,999E-10	9,261E-04	9,261E-04	0,000E+00	1,003E-03	1,003E-03	
DesvPad	0,000E+00	1,524E-06	1,524E-06	3,445E-11	1,194E-06	1,194E-06	0,000E+00	1,751E-06	1,751E-06	

média final piroelétr	W
1,003E-03	W
Erro do Piroelétrico do experimento anterior	% da leitura
-8,68	
Erro em W	W
-8,706E-05	W
média final do piroelétrico corrigido	W
1,090E-03	W

Fig. 11.20 - Medições na verificação do detector da esfera integradora.

Calibração do Detector Ge acoplado na esfera integradora

Padrão: Detector Piroelétrico

Laser: ThorLabs 1550 nm

Local: ImetroLarad

Data: 21/10/2005

Temp: 20°C

λ (nm)	Leitura 1				Teste (Detector Ge na esfera) [A]				Leitura 2				Responsividade c/ Esfera Teste (Detector Ge) [AW]
	Padrão (Pir oelétrico) [W]				zero				Padrão (Pir oelétrico) [W]				
	zero	medidas	A		zero	medidas	A		zero	medidas	A		
1550	0,000E+00	1,141E-03	1,141E-03		2,6850E-11	5,2482E-08	5,2455E-08		0,000E+00	1,140E-03	1,140E-03		4,227E-05
	0,000E+00	1,143E-03	1,143E-03		7,3150E-11	5,2447E-08	5,2374E-08		0,000E+00	1,134E-03	1,134E-03		
	0,000E+00	1,140E-03	1,140E-03		3,1250E-11	5,2353E-08	5,2322E-08		0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03		
	0,000E+00	1,140E-03	1,140E-03		1,0901E-10	5,2503E-08	5,2394E-08		0,000E+00	1,138E-03	1,138E-03		
	0,000E+00	1,142E-03	1,142E-03		2,3800E-11	5,2587E-08	5,2563E-08		0,000E+00	1,138E-03	1,138E-03		
	0,000E+00	1,143E-03	1,143E-03		4,2020E-11	5,2227E-08	5,2185E-08		0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03		
	0,000E+00	1,141E-03	1,141E-03		4,3800E-12	5,2335E-08	5,2331E-08		0,000E+00	1,136E-03	1,136E-03		
	0,000E+00	1,140E-03	1,140E-03		3,0900E-12	5,2183E-08	5,2180E-08		0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03		
	0,000E+00	1,139E-03	1,139E-03		8,2120E-11	5,2218E-08	5,2136E-08		0,000E+00	1,135E-03	1,135E-03		
	0,000E+00	1,140E-03	1,140E-03		2,9270E-11	5,2272E-08	5,2243E-08		0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03		
	0,000E+00	1,141E-03	1,141E-03		4,249E-11	5,236E-08	5,232E-08		0,000E+00	1,137E-03	1,137E-03		
	0,000E+00	1,370E-06	1,370E-06		3,470E-11	1,383E-10	1,348E-10		0,000E+00	1,663E-06	1,663E-06		
Médias													
DesvPad													
média final piroelé. 1,139E-03													
Erro do Piroelétrico do experimento anterior -8,68 % da leitura													
Erro em W -9,886E-05 W													
média final do piroelétrico corrigido 1,238E-03 W													

Fig. 11.21 - Medições na verificação da esfera integradora.

1300nm Responsividade Labsphere [AWW] 6,97991E-05	IEP1	IEP2	Labsphere	HP81521B	Esf	HP
	[µA]	[µA]	[nA]	[µW]		
	6,730	6,713	63,387	923,9		
	6,730	6,713	63,330	923,8		
1300nm Responsividade IEP1 [AWW] 0,007389	6,731	6,710	63,394	923,7	DesvMaximo nA %	DesvMaximo uW %
	media	media	63,370	923,800		
	910,9	911,1	907,9	879,8		
	7,130	7,113	67,327	1006,0		
1300nm Responsividade IEP2 [AWW] 0,007367	7,130	7,112	67,264	1006,6	nA %	uW %
	7,131	7,112	67,282	1005,8		
	media	media	67,291	1006,133		
	965,0	965,4	964,1	958,2		
Fator HP 1300nm 1,05	7,370	7,345	69,340	1005,8	nA %	uW %
	7,371	7,344	69,364	1005,9		
	7,371	7,345	69,346	1005,6		
	media	media	69,350	1005,767		
FC/APC Cerâmico IEP	997,5	997,0	993,6	957,9	nA %	uW %
	7,129	7,070	67,881	953,6		
	7,129	7,069	67,820	953,0		
	7,131	7,070	67,859	953,1		
FC/APC Metálico IEP	media	media	67,853	953,233	0,06	0,09
	964,9	959,6	972,1	907,8		
	6,144	6,049	58,395	856,7		
	6,143	6,051	58,321	855,5		
FC/APC Metálico IEP	6,140	6,049	58,443	855,4	nA %	uW %
	media	media	58,386	855,867		
	831,3	821,2	836,5	815,1		
	0,12	0,21	1,30	0,15		

Fig. 11.22 - Leituras com diferentes conectores em 1300nm.

1550nm Responsividade Labsphere [AWV] 4,85153E-05	Conectores 1550nm	IEP1	IEP2	Labsphere	HP81521B	Esf	HP
		[µA]	[µA]	[nA]	[µW]		
		6,976	7,063	45,484	916,3		
		6,976	7,063	45,415	916,6		
		6,979	7,062	45,552	917,0		
1550nm Responsividade IEP1 [AWV] 0,007463	FC/PC Cerâmico IEP	media		45,484	916,633	DesvMaximo nA	DesvMaximo uW
		934,8	938,9	937,5	856,7		
		7,548	7,656	49,477	1016,3		
		7,548	7,656	49,379	1015,4		
		7,549	7,651	49,355	1015,8		
1550nm Responsividade IEP2 [AWV] 0,007522	FC/PC Metálico CP&D	media		49,404	1015,833	nA	0,90
		1011,4	1017,6	1018,3	949,4		
		7,732	7,809	50,143	1012,6		
		7,729	7,809	50,246	1011,5		
		7,730	7,808	50,240	1010,2		
Fator HP 1550nm 1,07	FC/PC Cer/Met IEP	media		50,210	1011,433	0,10	0,24
		1035,8	1038,1	1034,9	945,3		
		7,611	7,656	49,973	971,2		
		7,623	7,655	49,992	971,3		
		7,612	7,653	49,946	970,3		
FC/APC Cerâmico IEP	FC/APC Cerâmico IEP	media		49,970	970,933	0,05	1,00
		1020,4	1017,6	1030,0	907,4		
		6,069	6,055	39,862	808,6		
		6,066	6,055	39,874	808,2		
		6,061	6,060	39,771	808,2		
FC/APC Metálico IEP	FC/APC Metálico IEP	media		39,836	808,333	0,10	0,40
		812,7	805,2	821,1	755,5		

Fig. 11.23 - Leituras com diferentes conectores em 1550nm.

±	1300nm	Esferas Integradoras			Sensor
		IEP-1	IEP-2	Labsphere	
		[mW]	[mW]	[mW]	[mW]
	Conectores				
	FC/PC Cerâmico	0,91	0,91	0,91	0,88
	FC/PC Metálico	0,96	0,97	0,96	0,96
	FC/PC CerMet	1,00	1,00	0,99	0,96
	FC/APC Cerâmico	0,96	0,96	0,97	0,91
	FC/APC Metálico	0,83	0,82	0,84	0,82

±	1550nm	Esferas Integradoras			Sensor
		IEP-1	IEP-2	Labsphere	
		[mW]	[mW]	[mW]	[mW]
	Conectores				
	FC/PC Cerâmico	0,93	0,94	0,94	0,86
	FC/PC Metálico	1,01	1,02	1,02	0,95
	FC/PC CerMet	1,04	1,04	1,03	0,95
	FC/APC Cerâmico	1,02	1,02	1,03	0,91
	FC/APC Metálico	0,81	0,81	0,82	0,76

Normalizado em relação à IEP-1					
±	1300nm	Esferas Integradoras			Sensor
		IEP-1	IEP-2	Labsphere	
		[-]	[-]	[-]	[-]
	Conectores				
	FC/PC Cerâmico	1,00	1,00	1,00	0,97
	FC/PC Metálico	1,00	1,00	1,00	0,99
	FC/PC CerMet	1,00	1,00	1,00	0,96
	FC/APC Cerâmico	1,00	0,99	1,01	0,94
	FC/APC Metálico	1,00	0,99	1,01	0,98

Normalizado em relação à IEP-1					
±	1550nm	Esferas Integradoras			Sensor
		IEP-1	IEP-2	Labsphere	
		[-]	[-]	[-]	[-]
	Conectores				
	FC/PC Cerâmico	1,00	1,00	1,00	0,92
	FC/PC Metálico	1,00	1,01	1,01	0,94
	FC/PC CerMet	1,00	1,00	1,00	0,91
	FC/APC Cerâmico	1,00	1,00	1,01	0,89
	FC/APC Metálico	1,00	0,99	1,01	0,93

Fig. 11.24 - Resumo das medições com diferentes conectores.

Incerteza para ESFERA e HP (MCM)
HP

Lâmbda	Leituras no padrão IEP	Leituras no Padrão HP81521B	Erro de leitura HP81521B	Fator de correção HP81521B	Incerteza Cert HP81521B	Incerteza Cert HP81521B	Linearidade HP (Cert)	Linearidade HP (Cert)
[nm]	[μV]	[μV]	[μV]	[.]	[μV]	[.]	[dB]	[.]
1300	1085,47	1140	54	1,05	13	0,60	0,02	0,23
1550	949,33	1016	67	1,07	11	0,58	0,02	0,23

ESFERA

Lâmbda	Leituras no padrão IEP	Leituras no Padrão ESFERA	Erro de leitura ESFERA	Fator de correção ESFERA	Incerteza Cert ESFERA	Incerteza Cert ESFERA (6)	Linearidade Esfera (Cert)	Linearidade Esfera (Cert)
[nm]	[μV]	[μV]	[μV]	[μV]	[μV]	[.]	[dB]	[.]
1550	1015,2	0,07086	-	6,980E-05	7,7E-07	0,55	0,02	0,23
1550	1070,59	0,05194	-	4,85153E-05	5,4E-07	0,56	0,02	0,23

HP (cont.)

Cert laser estabilidade (tempo)	Cert Laser estabilidade 68 %	Dependência do Padrão quanto ao lâmbda do laser	Varição laser com temp	Dependência tipo Conector	Não-uniformidade do detector	Dependência da Polarização	Incerteza Combinada 68 %	Incerteza Combinada 95 % k = 1,960
[dB]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]
0,003	0,03	0,06	1,767	0,088	0,12	0,29	1,91	3,74
0,003	0,03	0,58	1,767	0,137	0,12	0,29	1,99	3,90

ESFERA (cont.)

Cert laser estabilidade (tempo)	Cert Laser estabilidade 68 %	Dependência do Padrão quanto ao lâmbda do laser	Varição laser com temp	Dependência tipo Conector	Não-uniformidade do detector	Dependência da Polarização	Incerteza Combinada 68 %	Incerteza Combinada 95 % k = 1,960
[dB]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]	[.]
0,003	0,03	0,06	1,767	0,121	0,00	0,00	1,87	3,67
0,003	0,03	0,58	1,767	0,174	0,00	0,00	1,96	3,85

Fig. 11.25 - Cálculo das incertezas de medição para a esfera *Labsphere* e HP81521B.

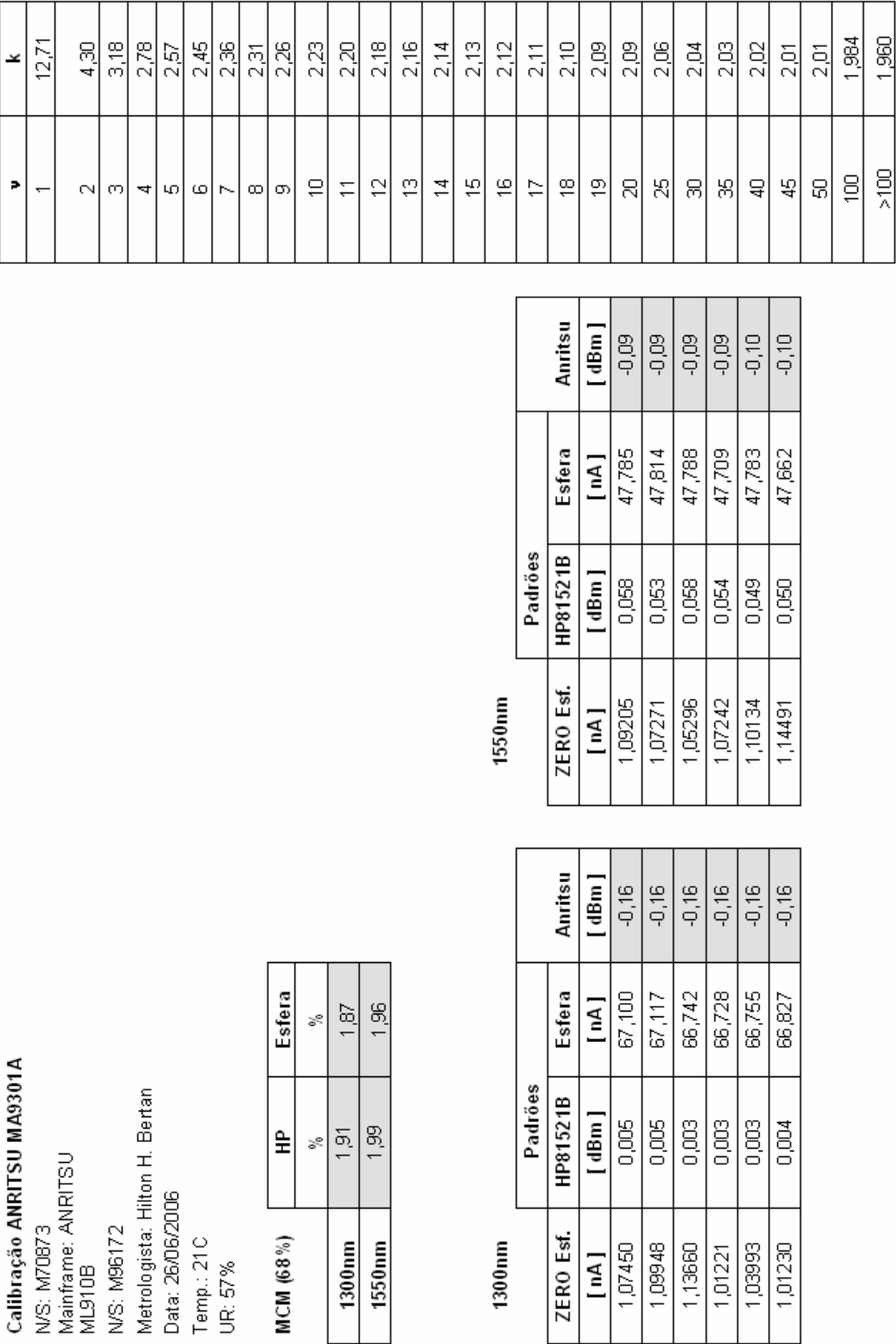


Fig. 11.26 - Leituras para calibração do medidor Anritsu MA9301A.

Incerteza para o Anritsu utilizando Padrão HP81521B										
λ	Fator de Correção	Média das Leituras no Padrão s/ correção	Valor Medido no Padrão corrigido	Valor Medido no equip. sob cal.	Valor Medido no Padrão corrigido	Valor Medido no equip. sob cal.	Erro	Desvio Padrão da Amostra	Desvio Padrão da Amostra	MCM Padrão [68%]
[nm]	[-]	[dBm]	[dBm]	[dBm]	[mW]	[mW]	[%]	[dB]	[%]	[%]
1300	1,05	0,004	-0,208	-0,16	0,95	0,96	0,01	0,00E+00	0,00E+00	1,91
1550	1,07	0,054	-0,240	-0,09	0,95	0,98	0,03	5,16E-03	1,19E-01	1,99
Incerteza para o Anritsu utilizando Padrão ESFERA										
λ	Respons. Cert	Média das Leituras no Padrão corrigido	Valor Medido no Padrão corrigido	Valor Medido no equip. sob cal.	Valor Medido no Padrão corrigido	Valor Medido no equip. sob cal.	Erro	Desvio Padrão da Amostra	Desvio Padrão da Amostra	MCM Padrão [68%]
[nm]	[AWG]	[A]	[W]	[dBm]	[mW]	[mW]	[%]	[dB]	[%]	[%]
1300	6,980E-05	6,58E-08	9,43E-04	-0,16	0,943	0,96	0,02	0,00E+00	0,00E+00	1,87
1550	4,852E-05	4,67E-08	9,62E-04	-0,09	0,962	0,98	0,02	5,16E-03	1,19E-01	1,96
Incerteza utilizando Padrão HP81521B (cont.)										
Resolução da USC	Incerteza de Resolução da USC [68%]	Incerteza Combinada [68%]	Graus de Liberdade Efetivos	k	Incerteza de Medição [95%]					
[dB]	[%]	[%]	[v]	[-]	$\pm$ [%]					
0,01	2,31E-01	6,65E-02	>100	1,96	3,74					
0,01	2,31E-01	6,65E-02	>100	1,96	3,90					
Incerteza utilizando Padrão ESFERA (cont.)										
Resolução da USC	Incerteza de Resolução da USC [68%]	Incerteza Combinada [68%]	Graus de Liberdade Efetivos	k	Incerteza de Medição [95%]					
[dB]	[%]	[%]	[v]	[-]	$\pm$ [%]					
0,01	2,31E-01	6,65E-02	>100	1,96	3,67					
0,01	2,31E-01	6,65E-02	>100	1,96	3,85					

Fig. 11.27 - Incertezas de medição do medidor Anritsu MA9301A.