

A Esfera Integradora como Padrão de Referência para medição de Potência Óptica no Laboratório de Calibração

Hilton H. Bertan

Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

hiltonbertan@yahoo.com.br

Yuzo Iano

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

yuzo@decom.fee.unicamp.br

RESUMO

A esfera integradora e suas propriedades foram estudadas para sua aplicação como um padrão de referência em medição de potência óptica. A esfera foi comparada com o medidor de potência óptica padrão do Laboratório de Calibração do CPqD (Campinas - Brasil). Os resultados indicaram que a esfera integradora, possuindo uma incerteza de medição menor, pode ser usada como padrão de referência. Este trabalho também tem como finalidade mostrar que é possível um procedimento para a escolha de um novo equipamento padrão utilizando recursos e equipamentos limitados disponíveis no laboratório.

PALAVRAS CHAVES

Esfera Integradora, Metrologia, Potência Óptica.

ABSTRACT

We have studied the integrating sphere and its properties for application as a reference standard in optical power measurement. We have compared the sphere with the standard optical power meter of CPqD Calibration Laboratory (Campinas - Brazil). The results indicate that the

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

KEYWORD

Integrating Sphere, Metrology, Optical Power.

INTRODUÇÃO

A medição de potência óptica sempre foi de grande importância para as telecomunicações, tendo cada vez mais relevância à medida que equipamentos mais sofisticados são projetados e colocados em operação em todo o mundo.

Sendo crescente a necessidade de instrumentos com incertezas de medição cada vez menores para mensurar diversas grandezas, dentre estas a potência óptica, tornou-se necessário uma rápida evolução dos métodos para tais medições.

Os radiômetros criogênicos 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 [1].

Seu princípio de funcionamento 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 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 precisamente medida aquece o detector a mesma temperatura, sendo então comparadas às potências óptica e elétrica.

Embora o radiômetro criogênico possua incerteza de medição muito baixa e, por esta razão, são os padrões primários da maioria dos institutos nacionais de metrologia, incluindo o Inmetro, sua operação é complexa e custosa o bastante para tornar seu uso muito restrito, impossibilitando sua operação como padrão de trabalho em um laboratório de calibração onde um uso diário muitas vezes ocorre.

Devido à complexidade na operação do radiômetro criogênico, são utilizados padrões de transferência, que são padrões utilizados como intermediários para comparar padrões [2], dentre eles destacando-se os detectores do tipo armadilha óptica, também chamados de detectores *trap* (armadilha) [3]. Nesses detectores, os sensores são dispostos de forma a formar uma armadilha para a radiação, onde possíveis reflexões que ocorrem na superfície de um fotodiodo são capturadas por outro, minimizando os erros na medição.

Diferentemente do radiômetro citado, baseado na medição de diferença de temperatura ocasionada pela absorção da radiação, os fotodetectores são construídos de forma que a energia dos fótons incidentes no semicondutor é usada para retirar os elétrons da banda de valência levando-os à banda de condução. Através desta fotoionização, os fótons geram portadores de carga que, antes que se recombinem no interior do dispositivo, são colocados em movimento através de um campo elétrico gerando a corrente elétrica que será objeto de medição [4].

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 [5][6][7]. Esses detectores tipo armadilha óptica são muito usados como padrões de transferência para comparações de radiômetros criogênicos entre laboratórios de diferentes institutos do mundo [8].

Os detectores tipo *Trap* podem ser usados como padrões de transferência para calibrar os padrões que serão utilizados rotineiramente nos laboratórios de calibração, onde muitas vezes são utilizados medidores de potência óptica otimizados para medições em comprimentos de onda mais utilizados em telecomunicações ópticas. O Silício 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 [4].

ESFERA INTEGRADORA

Embora esses medidores de potência óptica baseados em fotodetectores de Germânio ou InGaAs sejam largamente empregados como padrões de referência em um dado laboratório, existe a possibilidade do emprego de radiômetros baseados em esfera integradora, que possuem uma estrutura esférica com entrada para a radiação e outra abertura onde é acoplado o fotodetector. O fotodetector acoplado a esta esfera captura a luz refletida pelo interior da esfera e gera a fotocorrente que será medida.

No final do século 19 o engenheiro alemão Ulbricht [9] foi o primeiro a descrever o modelo da esfera integradora, sendo hoje também aplicável para comprimentos de onda de interesse em telecomunicações. Possuindo interior recoberto por um material especial que reflete e difunde a luz incidente de maneira uniforme em todas as direções, representando dessa forma uma superfície com reflexão difusa perfeita, também denominada superfície Lambertiana, a esfera integradora 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 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 [2].

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 medidas materializadas, instrumentos de medição ou materiais de referência [2].

TEORIA

A teoria de funcionamento da esfera integradora é baseada no princípio da troca de radiação entre superfícies difusoras [10]. Consideremos a troca de radiação entre dois elementos diferenciados de uma superfície difusora, conforme Figura 1.

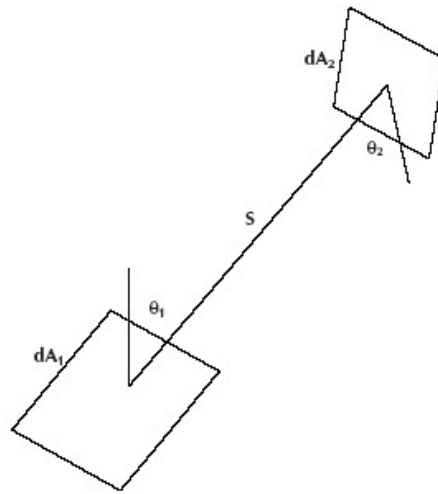


Figura 1 – Troca de radiação entre duas superfícies difusoras

A fração da energia que parte de dA_1 e incide sobre dA_2 é denominada fator de troca dF_{d1-d2} , dado pela Equação 1, onde θ_1 e θ_2 são ângulos medidos em relação as normais da superfície:

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

Consideremos dois elementos diferenciais dA_1 e dA_2 situados dentro de uma esfera com superfície interna difusora, conforme Figura 2.

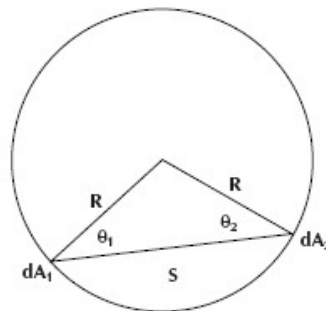


Figura 2 – Esfera com superfície interna difusora

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

Como S é dado pela Equação 2, então dF_{d1-d2} obedece a Equação 3:

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

Podemos observar que o resultado é independente dos ângulos θ e das distâncias entre os elementos dA_1 e dA_2 , fazendo com que a fração do fluxo luminoso recebido por dA_2 é 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 A_2 , teremos a Equação 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 independe de dA_1 , temos a Equação 5.

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

A_S representa a área interna total da esfera e a fração do fluxo radiante recebido por A_2 é a razão entre A_2 e A_S .

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

A radiância (densidade de fluxo por unidade de ângulo sólido) da esfera é dada pela Equação 6, onde ρ é a reflectância, A é a área iluminada e π é o ângulo sólido total projetado da superfície [10]:

$$L = \frac{\Phi_i \rho}{\pi A_S} \quad (6)$$

Na prática, a esfera possui aberturas para a entrada do feixe e saída para o detector conforme Figura 3, sendo que essas aberturas, além de não refletoras, absorvem a luz que nelas incidem, fazendo com que a Equação 6 seja alterada incluindo essa correção.

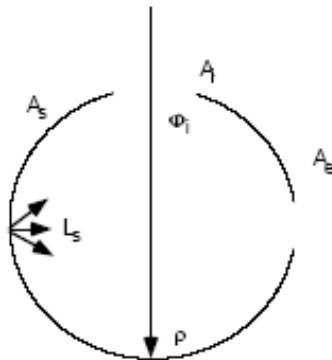


Figura 3 – Esfera integradora mostrando suas aberturas

O fluxo de radiação incidente é perfeitamente difundido na reflexão inicial, e depois de n reflexões no interior da estrutura, o fluxo total incidente na superfície da esfera é maior que o fluxo de entrada devido a múltiplas reflexões dentro da cavidade, resultando em uma radiância na superfície dada pela Equação 7, onde f , dado pela Equação 8, é a relação entre a soma das áreas das aberturas da estrutura e a área total.

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

$$f = \frac{A_i + A_e}{A_s} \quad (8)$$

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 nanossegundos até dezenas de nanossegundos [10].

EXPERIMENTOS

O sistema de medição é constituído de uma esfera integradora Labsphere LPM-040-SF de 4 polegadas e duas aberturas, sendo uma delas para o fotodetector de germânio, e um picoamperímetro Keithley 6485 utilizado para as medições de corrente da ordem de nanoampéres. Foram realizados experimentos no Laboratório de Radiometria do Inmetro de forma a estudar o comportamento do detector óptico isoladamente e acoplado à esfera integradora, sendo obtidos resultados satisfatórios que motivaram a continuação dos estudos e a calibração desse sistema de medição no Laboratório de Fibras Ópticas do Instituto Electrotécnico Português (IEP), em Porto/Portugal.

O sistema formado pelo picoamperímetro, detector de germânio e esfera integradora foi calibrado no IEP utilizando-se *laser* no comprimento de onda de 1300nm e 1550nm e esfera integradora calibrada com rastreabilidade a organismos europeus reconhecidos pelo Inmetro. Foram

fornecidos os valores de responsividade do sistema e as respectivas incertezas de medição para cada comprimento de onda.

Na mesma oportunidade também foi calibrado o medidor de potência óptica HP81521B, com detector também de germânio e que não utiliza esfera integradora incorporada em sua estrutura. Esse último é padrão de medição do Laboratório de Calibração da Fundação CPqD.

No laboratório do CPqD, cuja estrutura é formada por ambiente Sala Limpa classe 100, bancada anti-vibratória e temperatura/umidade controladas, foi realizada a calibração de um medidor de potência óptica Anritsu MA9301A, que não possui esfera integradora acoplada, e que possui características similares à maioria dos equipamentos encontrados no mercado.

Esta calibração foi realizada utilizando-se como padrão o HP81521B, equipamento já consolidado como padrão de medição do Laboratório, e a Esfera Integradora Labsphere LPM-040-SF, com a finalidade de comparar diretamente os resultados.

INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Foram realizados estudos que permitiram determinar quais são as componentes de incerteza de medição que influenciam as medições de ambos os medidores, tomando como base informações da norma internacional aplicável [11] e o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [12].

Para a determinação da incerteza devido à variação da potência do *laser* com a mudança de temperatura/umidade foram utilizados uma câmara climática do Laboratório do CPqD e o próprio medidor HP81521B.

Para o cálculo da incerteza devido à dependência do tipo de conector óptico, foram utilizados os resultados do programa internacional de comparação interlaboratorial realizado entre o CPqD e o IEP, ocorrido no mesmo período em que foram realizadas as calibrações dos equipamentos HP e Labsphere. Nessa comparação interlaboratorial, dentre outros resultados, foram obtidos aqueles que mostram o comportamento das medições quando são utilizados conectores ópticos de vários tipos, como FC/PC, FC/APC, fabricados em material cerâmico ou metálico.

A Tabela 1 mostra as componentes de incerteza de medição calculadas, já excluídas as consideradas desprezíveis, para o medidor HP81521B, que não utiliza esfera integradora em sua estrutura, e o sistema que utiliza a esfera integradora Labsphere.

Tabela 1– Incertezas de medição para o detector HP e a esfera Labsphere

Componente de Incerteza	Componentes de Incerteza [%]			
	Padrão			
	HP81521B		Esfera Labsphere	
	1310nm	1550nm	1310nm	1550nm
Certificado do Padrão	0,60	0,58	0,55	0,56
Linearidade do Padrão (Certificado)	0,23	0,23	0,23	0,23
Estabilidade <i>Laser</i> - Tempo (Certificado)	0,03	0,03	0,03	0,03
Dependência quanto ao Lambda do <i>Laser</i>	0,06	0,58	0,06	0,58
Variação do <i>Laser</i> com temperatura	1,77	1,77	1,77	1,77
Dependência do tipo de Conector	0,09	0,14	0,12	0,17
Não-uniformidade do detector (Dependência da Geometria/Alinhamento do Feixe)	0,12	0,12	0,00	0,00
Dependência da Polarização	0,29	0,29	0,00	0,00
Incerteza Combinada	1,91	1,99	1,87	1,96
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	3,74	3,90	3,67	3,85

A Tabela 2 mostra resumidamente os resultados comparativos entre a calibração do medidor Anritsu utilizando o padrão HP e utilizando o padrão esfera integradora Labsphere, onde notamos que a incerteza de medição referente ao padrão utilizado predomina sobre as outras fontes de incerteza.

Tabela 2– Resultado da calibração do medidor Anritsu em aproximadamente 0dBm

Parâmetro	Unidade	Padrão			
		HP81521B		Esfera Labsphere	
		1310nm	1550nm	1310nm	1550nm
Medição (Padrão)	[mW]	0,953	0,946	0,943	0,962

Medição (Anritsu)	[mW]	0,96	0,98	0,96	0,98
Erro	[%]	1,11	3,44	2,22	1,76
Incerteza Tipo A (Leituras)	[%]	0,00	0,05	0,00	0,05
Incerteza Resolução	[%]	0,07	0,07	0,07	0,07
Incerteza Combinada (Padrão)	[%]	1,91	1,99	1,87	1,96
Incerteza Combinada	[%]	1,91	1,99	1,87	1,96
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	[%]	3,74	3,90	3,67	3,85

CONCLUSÕES

Esse trabalho mostra o procedimento para a escolha de um novo equipamento padrão de referência do laboratório utilizando recursos e equipamentos limitados, servindo como um roteiro na determinação de sua eficiência, das componentes de incerteza que influenciam as medições e como pode ser validado o sistema através de comparações com outros equipamentos já reconhecidos como padrões de medição.

A esfera integradora tem mostrado ser uma ótima solução como um padrão de referência em calibração de medidores de potência óptica, por apresentar características teóricas fundamentais para um bom padrão de medição, eliminando problemas com alinhamento e variações angulares do feixe, e também por eliminar a questão da não-uniformidade do detector [10], pois a radiação é integrada pela esfera antes de atingir o sensor.

Através dos experimentos realizados, observa-se que a incerteza de medição da esfera é ligeiramente inferior que a obtida usando o medidor tradicional HP do laboratório, mostrando que sua utilização é totalmente viável e vantajosa, sendo que esta incerteza ainda pode ser menor caso forem utilizados equipamentos novos e de qualidade superior e outros equipamentos para realização de estudos de componentes de incerteza com melhor precisão [13], que não estavam disponibilizados para a realização desse trabalho. O *laser* utilizado na calibração do medidor de potência óptica Anritsu, por exemplo, mostrou em estudos anteriores [14] uma pequena variação em seu comprimento de onda ao longo do tempo, o que poderia ser minimizado caso outro *laser* equivalente estivesse disponível para substituí-lo.

A calibração do medidor Anritsu foi realizada objetivando a comparação do medidor HP e a esfera integradora Labsphere durante uma calibração rotineira, demonstrando claramente que os valores de incerteza calculados estão muito próximos, sendo o obtido com a esfera levemente menor.

Foi evidenciado também que os valores de erro do equipamento Anritsu medidos usando o padrão HP ou o padrão esfera estão muito próximos, dentro da faixa de incerteza correspondente, embora a esfera utilizada nesse trabalho não mostre ser eficiente para medições de baixas potências, apresentando valores que obviamente devem ser desconsiderados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng. Celso P. Saraiva, responsável técnico pelo Laboratório de Calibração da Fundação CPqD, o Eng. Modesto de Moraes, responsável pelo Laboratório de Fibras Ópticas do Instituto Electrotécnico Português, ao Tecnologista Augusto P. da Cunha, pesquisador do Laboratório da Radiometria do Inmetro, e a todos que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CUNHA, Augusto Poças et al. *Radiômetro criogênico: referência primária do Inmetro para medidas de radiação óptica*. Metrologia, 2003.
- [2] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *VIM - Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. Duque de Caxias, 1995. 52 p.
- [3] SIMÕES, Maurício et al. *Montagem e caracterização de detectores padrão do tipo armadilha óptica*. Metrologia, 2003.
- [4] GIOZZA, William Ferreira; CONFORTI, Evandro; WALDMAN, Hélio. *Fibras Ópticas: tecnologia e projeto de sistemas*. 1. ed. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

- [5] ZALEWSKI, Edward F.; GEIST, J. *Silicon photodiode absolute spectral response self-calibration*. Applied Optics. v. 19, p. 1214–19. 1980.
- [6] ZALEWSKI, Edward F.; DUDA, C. Richard. *Silicon photodiode with 100% external quantum efficiency*. Applied Optics. v. 22, p. 2867–73. 1983.
- [7] FOX, N. P. *Trap detectors and their properties Metrologia*. v. 28, p. 197–202. 1991.
- [8] LASSILA, A. et al. *Intercomparison of cryogenic radiometers using silicon trap detectors*. Meas. Sci. Technol, 1997. v. 8 p. 123–127.
- [9] ULBRICHT, R. *Das Kugelphotometer*. Verlag R. Oldenbourg, Berlin, München. 1920.
- [10] LABSPHERE, INC. *A guide to integrating sphere radiometry and photometry*. North Sutton, 2003. 26 p.
- [11] COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL. IEC 1315 - *Calibração de medidores de potência em fibra óptica*. 1ª ed. Genebra, 1995-04. 60 p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. *Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM)*. Rio de Janeiro, 3ª ed Brasileira, 2003. 120 p.
- [13] ENVALL, J.; KÄRHÄ, P.; IKONEN, E. *Measurements of fibre optic power using photodiodes with and without an integrating sphere*. Metrologia, 2004. v. 41, p. 353–358.
- [14] SARAIVA, Celso P.; BERTAN, Hilton H.; MORAIS, Modesto; IANO, Yuzo. *Um estudo sobre a reprodutibilidade de técnica espectrométrica de alta resolução para sistemas DWDM*. ENQUALAB - Congresso e Feira da Qualidade em Metrologia. São Paulo, 2006.