

Análise de Desempenho da Esfera Integradora para Calibração de Medidores de Potência Óptica

Hilton Henrique Bertan & Yuzo Iano

Abstract—We have studied the integrating sphere for application as a standard in optical power measurement. This work was developed using resources and equipment commonly available in a laboratory. We have compared the sphere with the standard optical power meter of calibration laboratory and the results indicate that the measurement uncertainty of the integrating sphere is smaller.

Index Terms— Integrating Sphere, Measurement Uncertainty, Optical Power.

Resumo—A esfera integradora foi estudada para sua aplicação como um padrão em medição de potência óptica. Este trabalho foi desenvolvido utilizando recursos e equipamentos limitados disponíveis no laboratório. A esfera foi comparada com o medidor de potência óptica padrão do laboratório de calibração e os resultados indicaram que a incerteza de medição da esfera integradora é menor.

Palavras chave—Esfera Integradora, Incerteza de Medição, Potência Óptica.

I. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia está permitindo o desenvolvimento de técnicas mais precisas 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.

Esses equipamentos necessitam de calibração com incertezas de medição muito baixas, o que é conseguido utilizando uma cadeia de rastreabilidade formada por equipamentos confiáveis e cujas propriedades garantem um ótimo desempenho.

Os métodos de medição de potência óptica evoluíram com o tempo, chegando a equipamentos como o radiômetro

criogênico.

A. Radiômetro Criogênico

O funcionamento do radiômetro criogênico é baseado no método da substituição elétrica, onde são comparadas a potência da radiação incidente no dispositivo e a potência elétrica de referência. O detector do radiômetro sofre um aquecimento devido à incidência da radiação e essa diferença de temperatura é medida. Quando é interrompida a radiação, uma corrente elétrica de referência, com intensidade precisamente medida, aquece o detector a mesma temperatura que a causada pela radiação, permitindo que sejam comparadas as potências óptica e elétrica.

Diversos institutos nacionais de metrologia, que são os responsáveis pela regulamentação e manutenção da rastreabilidade em medições, possuem o radiômetro criogênico como padrão primário, pois este possui incerteza de medição extremamente baixa [1]. O Inmetro, Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, possui um radiômetro desse tipo com o objetivo de garantir a rastreabilidade dos laboratórios brasileiros ao que há de melhor em medição óptica.

Embora detentor dessas vantagens relativas à precisão, o radiômetro possui uma operação muito complexa que dificulta seu uso em operações rotineiras, tornando impraticável sua utilização como padrão de trabalho em um laboratório que exige um uso constante.

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* ou detectores de armadilha óptica [3].

B. Detectores de Armadilha Óptica

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.

Esta configuração tipo armadilha possui as vantagens de reduzir os efeitos do coeficiente de temperatura, da

Manuscrito recebido em 29 de novembro de 2006; revisado em 26 de fevereiro de 2007.

H. H. Bertan (hiltonbertan@yahoo.com.br) e Y. Iano (yuzo@decom.fee.unicamp.br) pertencem ao Departamento de Comunicações da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas – FEEC/UNICAMP. Av. Albert Einstein, 400 - Cidade Universitária Zeferino Vaz – Campinas – SP – Brasil - 13083-852.

reflectância e da influência da não-uniformidade dos detectores [1]. Laboratórios de diferentes institutos do mundo utilizam esses detectores como padrões de transferência para comparações de entre seus radiômetros criogênicos [4].

O radiômetro criogênico funciona segundo o princípio da medição de diferença de temperatura ocasionada pela absorção da radiação incidente. No caso dos detectores do tipo armadilha, os fotodetectores instalados em seu interior são construídos de forma que a energia dos fótons que incidem no semiconductor 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 a 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 [5].

Os detectores tipo armadilha 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 de 1300nm e 1550nm, principalmente. O Silício (Si) é o material geralmente utilizado na primeira janela de transmissão (850nm), mas nas segunda e terceira janelas, 1300nm e 1550nm, respectivamente, são utilizados o Germânio (Ge) ou InGaAs.

II. A ESFERA INTEGRADORA

Os radiômetros de Germânio ou InGaAs citados são utilizados sem uma esfera integradora acoplada, ou seja, a radiação incidente atinge diretamente o fotodetector. Estes são muito empregados como padrões de referência em laboratórios de calibração, mas um radiômetro usando a esfera integradora pode ser utilizado e trazer algumas vantagens.

A. Estrutura

A esfera integradora é uma estrutura de forma esférica com no mínimo duas aberturas, sendo uma para a entrada da radiação e outra para a instalação do fotodetector. Este fotodetector recebe a luz refletida pelo interior da esfera e origina a corrente que pode ser medida por um equipamento apropriado. A estrutura esférica possui o interior revestido com um material especial que reflete e difunde a luz que entra por sua abertura de maneira uniforme em todas as direções, representando dessa maneira uma superfície com reflexão difusa perfeita. 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 [6].

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. 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].

B. Teoria

A esfera integradora tem seu funcionamento baseado no princípio da troca de radiação entre superfícies difusoras [6]. Vamos considerar a troca de radiação entre dois elementos diferenciais de uma superfície difusora denominados de dA_1 e dA_2 , separados por uma distância S . A fração da energia que parte de dA_1 e incide sobre dA_2 é denominada fator de troca dF_{d1-d2} , dado por (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 esses dois elementos diferenciais situados dentro de uma esfera com superfície interna difusora, conforme Figura 1.

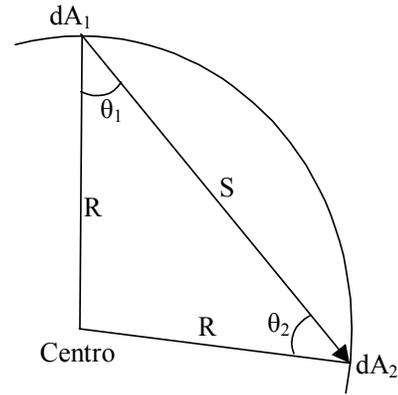


Fig. 1. Esfera com dois elementos trocando radiação

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 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 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 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 luz 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 cavidade, o fluxo total incidente na superfície da esfera é maior que o fluxo de entrada devido a múltiplas reflexões dentro da estrutura, resultando em uma radiância (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 π é o ângulo sólido total projetado da superfície [6]. A esfera possui uma entrada para o feixe e uma saída para o detector, sendo que essas aberturas, além de não refletirem radiação, absorvem a luz que nelas incidem, fazendo com que em (6) tenhamos a variável f que representa a relação entre a soma das áreas das aberturas da estrutura e a área total.

$$L = \frac{\Phi_i}{\pi A_S} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (6)$$

III. ESTUDOS REALIZADOS

Definimos um sistema de medição formado por um picoamperímetro do fabricante Keithley modelo 6485, utilizado para as medições de corrente da ordem de nanoampéres, e uma esfera integradora do fabricante Labsphere modelo LPM-040-SF de 4 polegadas de diâmetro e duas aberturas circulares, sendo uma delas para o fotodetector de germânio.

A. Verificações

Aproveitando a boa infra-estrutura do Laboratório de Radiometria (Larad) do Inmetro, 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 e motivaram a continuação dos trabalhos. Utilizamos primeiramente um detector tipo armadilha óptica calibrado em 632,8nm para calibrar um detector piroelétrico, tendo como fonte óptica um *laser* HeNe estabilizado em 632,8nm montado em uma bancada antivibratória especial para seu perfeito alinhamento. Como o detector piroelétrico possui intrinsecamente responsividade espectral uniforme, e este utilizado é especificado pelo fabricante para medições com erro menor que 1% em comprimentos de onda que abrangem a faixa de 600nm à 1550nm, o mesmo tornou-se nosso padrão de calibração também para os comprimentos de onda de interesse, ou seja, 1300nm e 1550nm. Portanto, este detector foi utilizado como padrão para verificar o desempenho da esfera integradora.

Foi realizada a verificação do detector de germânio da esfera integradora isoladamente e também acoplado ao sistema, incluindo o picoamperímetro para as leituras de corrente elétrica gerada. Esta 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, indicando que o método utilizado estava correto e o detector em bom funcionamento, o que motivou a calibração do sistema de medição no Laboratório de Fibras Ópticas do Instituto Electrotécnico Português (IEP), localizado na cidade do Porto (Portugal).

B. Calibração do Sistema

O sistema formado pelo picoamperímetro, detector de germânio e esfera integradora foi calibrado no laboratório do IEP utilizando-se *laser* nos comprimentos de onda de 1300nm e 1550nm. Foi utilizado como padrão uma esfera integradora calibrada com rastreabilidade a organismos europeus reconhecidos pelo Inmetro.

O certificado de calibração emitido forneceu os valores de responsividade do sistema e as respectivas incertezas de medição para cada comprimento de onda calibrado. Todo o sistema foi calibrado como uma unidade, ou seja, os valores de incerteza pertencem à esfera, seu detector e picoamperímetro funcionando em conjunto.

No mesmo período também foi calibrado o medidor de potência óptica padrão do Laboratório de Calibração da Fundação CPqD. Este equipamento, denominado HP81521B, 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 puderam ser comparados os 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.

C. Experimentos Finais

A conclusão dos estudos foi realizada no Laboratório de Calibração do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – Fundação CPqD. Este laboratório 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 material especial para sala limpa visando a não retenção de partículas, além de possuir uma ante-sala e um tapete especial para retirada de sujeira do calçado. 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 dessa forma um ambiente de sala limpa Classe 100. A sala possui uma linha de nitrogênio para a limpeza dos dispositivos e os

experimentos foram realizados usando-se vestuário apropriado constituído de aventais, capuz e luvas antiestáticos e sapato especial.

Toda e qualquer limpeza é realizada com materiais próprios para esses ambientes, como panos de limpeza e cotonetes para sala limpa. Um microscópio estava 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.

Foi realizada no laboratório do CPqD a calibração de um medidor de potência óptica do fabricante Anritsu modelo MA9301A, que possui características similares à maioria dos equipamentos encontrados no mercado e não possui esfera integradora acoplada. 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. O experimento foi montado conforme esquemas das Figuras 2 e 3.

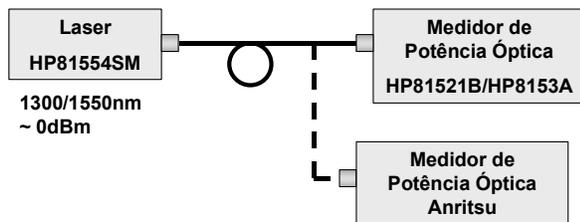


Fig. 2. Montagem para calibração do medidor Anritsu com o HP81521B.

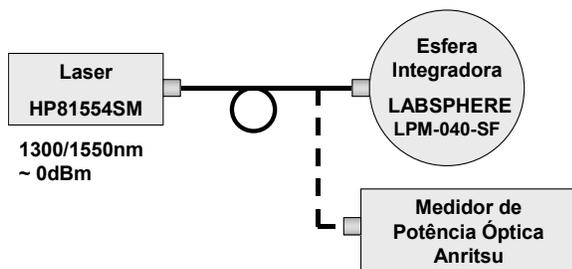


Fig. 3. Montagem para calibração do medidor Anritsu com a Esfera.

IV. AS COMPONENTES DE INCERTEZA

Algumas pesquisas foram realizadas para determinar quais são as componentes de incerteza de medição que precisam ser consideradas durante as medições de ambos os medidores. As informações da norma internacional IEC 1315 [7] e o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição [8], também conhecido como GUM, foram seguidos.

A. Temperatura

Uma das componentes relevantes que precisou ser determinada foi aquela devido à variação da potência do laser

com a mudança de temperatura e/ou umidade relativa do ambiente. Foi projetado um experimento realizado em uma câmara climática do CPqD, com temperatura e umidade relativa controladas, onde os equipamentos permaneceram sob testes controlados via GPIB por software (LABView/National Instruments).

Os equipamentos utilizados no experimento foram aqueles calibrados no IEP: o HP81521B e o *laser*, que foram interligados com fibras ópticas monomodo conectorizadas. Foi notado que a variação de umidade relativa não influencia consideravelmente as medições, mas a variação de temperatura tem efeito considerável, principalmente porque a fonte óptica utilizada já não é um equipamento novo, o que já havia sido notado em estudos anteriores [9], onde uma pequena variação em seu comprimento de onda ao longo do tempo foi verificada, mas cuja influência é desprezível. Considerando uma distribuição retangular para o dado obtido experimentalmente, temos, para um nível de confiança de 68%, uma incerteza de medição devido à variação da temperatura de 1,77%.

B. Conectores

Outra componente de incerteza considerável e que foi pesquisada foi a dependência quanto ao tipo de conector óptico utilizado. Para isto foram utilizados os resultados obtidos no programa internacional de comparação interlaboratorial realizado entre o CPqD e o IEP, desenvolvido no mesmo período em que foram realizadas as calibrações dos equipamentos HP e Labsphere. Nessa comparação interlaboratorial, dentre outros resultados importantes, foram obtidos os que mostram o comportamento das medições quando são utilizados conectores ópticos de vários tipos, como FC/PC, FC/APC, construídos em material cerâmico ou metálico, e a combinação destes. Considerando uma distribuição retangular para o dado obtido experimentalmente, temos, para um nível de confiança de 68%, os valores de incerteza apresentadas nas tabelas correspondentes, sendo a maior delas de 0,17%.

Também ficou evidenciado nesse experimento que as medidas com a esfera variam menos quando se substitui um conector por um de outro tipo ou material, o que constitui uma vantagem em relação ao medidor HP, que não possui esfera em sua estrutura.

C. Análise dos resultados

A Tabela I 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. A Tabela II lista as componentes referentes à esfera integradora Labsphere.

Calculada conforme o GUM, a incerteza expandida mostrada nas tabelas é o resultado da incerteza combinada das componentes de incerteza multiplicada pelo fator de abrangência (k), cujo valor é de 1,960 para um nível de

confiança de 95%. Observamos que as incertezas expandidas referentes à esfera são realmente menores.

O motivo de encontrarmos incertezas quanto à dependência do tipo de conector maiores para a esfera integradora não foi estudado neste trabalho, já que os baixos valores das outras componentes contribuem para a redução da incerteza da esfera.

TABELA I
INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA O DETECTOR HP

COMPONENTE DE INCERTEZA	[%]	
	1310nm	1550nm
Certificado do Padrão	0,60	0,58
Linearidade do Padrão (Certificado)	0,23	0,23
Estabilidade Laser – Tempo (Certificado)	0,03	0,03
Não-uniformidade do detector (Dependência da Geometria/Alinhamento do Feixe)	0,12	0,12
Varição do Laser com temperatura	1,77	1,77
Dependência do tipo de Conector	0,09	0,14
Dependência quanto ao Lambda do Laser	0,06	0,58
Dependência da Polarização	0,29	0,29
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	3,74	3,90

TABELA II
INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA A ESFERA LABSPHERE

COMPONENTE DE INCERTEZA	[%]	
	1310nm	1550nm
Certificado do Padrão	0,55	0,56
Linearidade do Padrão (Certificado)	0,23	0,23
Estabilidade Laser - Tempo (Certificado)	0,03	0,03
Não-uniformidade do detector (Dependência da Geometria/Alinhamento do Feixe)	0,00	0,00
Varição do Laser com temperatura	1,77	1,77
Dependência do tipo de Conector	0,12	0,17
Dependência quanto ao Lambda do Laser	0,06	0,58
Dependência da Polarização	0,00	0,00
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	3,67	3,85

Nas Tabela III e IV, que listam os resultados obtidos na calibração do equipamento Anritsu utilizando o padrão HP e utilizando o padrão esfera integradora, observamos que a maior componente é aquela herdada do padrão, como já era esperado. Esta 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 utilizada no experimento não é apropriada para medições de baixa potência.

Notamos que, embora o erro na calibração utilizando-se a esfera integradora em 1300nm seja o dobro do mesmo erro utilizando-se o padrão HP, e praticamente a metade em 1550nm, este fato não é muito relevante neste caso, já que estes valores são menores que as incertezas associadas, permanecendo os resultados de ambos os padrões dentro da faixa de valores determinada pela incerteza de medição.

TABELA III
CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR ANRITSU UTILIZANDO O PADRÃO HP

Parâmetro	[%]	
	1310nm	1550nm
Erro	1,11	3,44
Incerteza Tipo A (Leituras)	0,00	0,05
Incerteza Resolução	0,07	0,07
Incerteza Combinada (Padrão)	1,91	1,99
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	3,74	3,90

TABELA IV
CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR ANRITSU UTILIZANDO O PADRÃO ESFERA

Parâmetro	[%]	
	1310nm	1550nm
Erro	2,22	1,76
Incerteza Tipo A (Leituras)	0,00	0,05
Incerteza Resolução	0,07	0,07
Incerteza Combinada (Padrão)	1,87	1,96
Incerteza Expandida $k=1,960$ (95%)	3,67	3,85

V. CONCLUSÕES

Esse trabalho analisou o desempenho do radiômetro baseado na esfera integradora, mostrando que suas características são ótimas para a calibração de medidores de potência óptica. Foram estudadas as propriedades principais do dispositivo e determinadas as incertezas de medição relevantes para sua aplicação. Os experimentos foram realizados utilizando-se equipamentos relativamente comuns, demonstrando que mesmo com recursos limitados é possível um trabalho prático e de utilidade. Obviamente, a incerteza referente à esfera ainda pode ser diminuída caso forem utilizados equipamentos novos e de qualidade superior ou demais instrumentos para realização de experimentos com melhor precisão [10], que não estavam disponibilizados para a realização desse trabalho devido ao custo elevado.

A esfera integradora, por não apresentar problemas quanto ao alinhamento e variações angulares do feixe, e dependência quanto a não-uniformidade do detector [6], e por possuir incerteza de medição inferior que o medidor HP, pode inclusive ser utilizada como padrão de referência de um laboratório. Foi observado também que os erros encontrados na calibração do medidor Anritsu, medidos usando o padrão HP ou o padrão esfera, estão muito próximos, considerando as incertezas envolvidas, concluindo uma comparação fiel dos dois equipamentos.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradecemos as instituições e a todos que contribuíram no desenvolvimento desse estudo, destacando o Eng. Celso P. Saraiva (Laboratório de Calibração/CPqD), o Tecnologista Augusto P. da Cunha (Larad/Inmetro) e o Eng. Modesto de Moraes (Laboratório de Fibras Ópticas/IEP).

REFERÊNCIAS

- [1] A. Cunha et al. “Radiômetro criogênico: referência primária do Inmetro para medidas de radiação óptica”. *Metrologia*, 2003.
- [2] INMETRO. “VIM-Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia”. Duque de Caxias, 1995. 52 p.
- [3] M. Simões et al. “Montagem e caracterização de detectores padrão do tipo armadilha óptica”. *Metrologia*, 2003.
- [4] A. Lassila et al. “Intercomparison of cryogenic radiometers using silicon trap detectors”. *Meas. Sci. Technol.*, 1997. v. 8 p. 123–127.
- [5] W. F. Giozza, E. Conforti, H. Waldman. “Fibras Ópticas: tecnologia e projeto de sistemas”. 1. ed. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.
- [6] Labsphere, Inc. “A guide to integrating sphere radiometry and photometry”. North Sutton, 2003. 26 p.
- [7] Comissão Eletrotécnica Internacional. “IEC 1315 - Calibração de medidores de potência em fibra óptica”. 1ª ed. Genebra, 1995-04. 60 p.
- [8] ABNT, INMETRO. “Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM)”. Rio de Janeiro, 3ª ed Brasileira, 2003. 120 p.
- [9] 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. São Paulo, 2006.
- [10] J. Envall, P. Kärhä, E. Ikonen. “Measurements of fibre optic power using photodiodes with and without an integrating sphere”. *Metrologia*, 2004. v. 41, p. 353–358.

Hilton Henrique Bertan recebeu os títulos de Técnico em Eletro-Eletrônica pelo Colégio Técnico de Campinas - COTUCA/Unicamp em 1997 e Engenheiro Eletricista pela Unicamp em 2004.

De 2000 a 2006 foi Metrologista do Laboratório de Calibração da Fundação CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações. Atualmente é aluno de Mestrado da FEEC/UNICAMP e Engenheiro Eletrônico do Centro de Manutenção de Equipamentos da Unicamp.

Yuzo Iano recebeu os títulos de Engenheiro Eletrônico, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica através da UNICAMP. Atualmente é Professor Adjunto do DECOM/FEEC/UNICAMP. É o responsável pelo Laboratório de Comunicações Visuais do DECOM.

Seus interesses estão em processamento digital de sinais de áudio e vídeo. Trabalha com pesquisas em televisão e em especial com a HDTV desde 1986.