



Carolina Moreira Goloni Marques

**Confiabilidade Metrológica da Tomografia por
Coerência Óptica em Aplicações Biomédicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Guilherme Penello Temporão
Co-Orientador: Profa. Elisabeth Costa Monteiro

Rio de Janeiro
Agosto de 2012



Carolina Moreira Goloni Marques

**Confiabilidade Metrológica da Tomografia por
Coerência Óptica em Aplicações Biomédicas**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Guilherme Penello Temporão

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Profa. Elisabeth Costa Monteiro

Co-Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Jean Pierre von der Weid

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Giancarlo Vilela de Faria

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Agosto de 2012

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

Carolina Moreira Goloni Marques

Formada em Engenharia de Computação pela PUC-Rio em 2009. Suas atuais áreas de interesse incluem instrumentação optoeletrônica, confiabilidade metrológica de equipamentos biomédicos a laser e sistemas embarcados baseados em microcontroladores.

Ficha Catalográfica

Marques, Carolina Moreira Goloni

Confiabilidade Metrológica da Tomografia por Coerência Óptica em Aplicações Biomédicas / Carolina Moreira Goloni Marques; orientador: Guilherme Penello Temporão; co-orientador: Elisabeth Costa Monteiro. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Engenharia Elétrica, 2012.

v., 109 f: il.(color) ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Tomografia por Coerência Óptica;. 3. Confiabilidade Metrológica;. 4. Instrumentação Biomédica.. I. Temporão, Guilherme Penello. II. Monteiro, Elisabeth Costa. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Ao meu marido, Théo.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Guilherme Penello Temporão e Professora Elisabeth Costa Monteiro, pela orientação, estímulo e parceria ao longo da realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao meu marido, Théo Moreira Marques, por todo apoio, carinho e incentivo nesses últimos 10 anos.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

À Iakyrá Couceiro e Maurício Lima, do INMETRO, por compartilharem seus conhecimentos e me auxiliarem com o equipamento.

Aos professores Moisés Henrique Szwarcman e Juan Guillermo Lazo Lazo, pela parceria e oportunidade de aprender tanto com eles.

Aos professores e funcionários do DEE, em especial Manuel, Evandro, Carlos e Luiz Fernando, pela amizade e pelas experiências compartilhadas.

Aos meus pais e minha avó, pela educação que me deram, me transformando na pessoa que sou.

À minha sogra, Leila Moreira, pelo incentivo e pelas palavras de sabedoria nos momentos decisivos da minha carreira profissional.

Aos amigos, por todo apoio e pelos momentos de diversão quando uma pausa é mais do que necessária.

Resumo

Marques, Carolina Moreira Goloni; Temporão, Guilherme Penello; Monteiro, Elisabeth Costa. **Confiabilidade Metrológica da Tomografia por Coerência Óptica em Aplicações Biomédicas**. Rio de Janeiro, 2012. 109p. Dissertação de Mestrado – Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Tomografia por Coerência Óptica (OCT) vem sendo utilizada desde a década de 1990 em diversas áreas do campo biomédico, uma “biópsia óptica” com importantes perspectivas como ferramenta diagnóstica para caracterização quantitativa de estruturas teciduais. No presente trabalho é realizado estudo dos parâmetros para avaliação de conformidade dos equipamentos optoeletrônicos para aplicação biomédica como Laser, IPL (Luz Pulsada Intensa) e OCT, objetivando a identificação dos itens cuja avaliação é necessária como requisito em futura norma específica para equipamentos de Tomografia por Coerência Óptica. Além dos parâmetros metrológicos requeridos na norma particular para equipamentos a Laser, e alguns dos parâmetros da norma para IPL, foram identificados outros parâmetros metrológicos específicos para avaliação de equipamentos de OCT, considerando sua aplicação biomédica, como comprimento de coerência, resolução axial e resolução transversal. Considerando a possibilidade de elaboração futura de norma específica para OCT, para alguns dos parâmetros identificados, recomendou-se o requisito de medição e, para outros, somente a inclusão da informação nos documentos acompanhantes. Dentre os parâmetros cujo requisito de medição foi recomendado para equipamentos de OCT são: potência da emissão eletromagnética, comprimento de onda central, concêntrica entre os feixes de trabalho e de mira, diâmetro e divergência do feixe de trabalho, duração de um pulso, número de pulsos em um trem de pulsos e irradiância espectral.

Palavras-chave

Tomografia por Coerência Óptica; Confiabilidade Metrológica; Instrumentação Biomédica.

Abstract

Marques, Carolina Moreira Goloni; Temporão, Guilherme Penello; Monteiro, Elisabeth Costa. **Metrological reliability of Optical Coherence Tomography in biomedical applications**. Rio de Janeiro, 2012. 109p. MsC Dissertation — Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Optical Coherence Tomography has been proving to be an efficient diagnostics technique for imaging in vivo tissues, an optical biopsy with important perspectives as a diagnostics tool for quantitative characterization of tissue structures. The present work studies the parameters conformity evaluation of optoelectronics equipment for biomedical applications like Laser, IPL (Intense Pulsed Light), and OCT, targeting the identification of items which are necessary as a requirement to develop a future specific standard for Optical Coherence Tomography equipments. Beside the metrological parameters required by the particular standard for Laser and IPL equipment, specific parameters necessary for OCT's evaluation have been identified, regarding its biomedical application. For some parameters identified, measurement requisite has been recommended, and for others, only the information on the accompanying documents. Among the parameters required for measurement, highlights for: electromagnetic emission power, measurement uncertainty of incident power, coherence length, work beam diameter and divergence, pulse duration and spectral irradiance.

Keywords

Optical Coherence Tomography; Metrological Reliability; Biomedical Instrumentation.

Sumário

1	Introdução	14
2	Tomografia por Coerência Óptica	16
2.1	Interferômetro de Michelson	18
2.2	Interferometria de baixa coerência	19
2.3	Aspectos do OCT	25
2.3.1	Fonte de luz e resolução axial	25
2.3.2	Resolução transversal (resolução lateral)	28
2.3.3	Sensibilidade de detecção óptica	28
2.3.4	Modos de varredura	30
2.4	Tipos de OCT	31
2.4.1	Domínio do Tempo (TD-OCT)	31
2.4.2	Domínio da Frequência	32
2.4.3	OCT Funcionais	34
2.5	Aplicações biomédicas	36
2.5.1	Oftalmologia	37
2.5.2	Dermatologia	38
2.5.3	Cardiologia	40
2.5.4	Odontologia	42
2.6	Efeitos biológicos da radiação Laser ou LED visível e invisível	45
3	Metrologia	48
3.1	Organizações Internacionais	49
3.1.1	BIPM	49
3.1.2	OIML	50
3.1.3	ILAC	51
3.1.4	OMS	52
3.1.5	IEC	52
3.1.6	ISO	54
3.1.7	Outros	55
3.2	Organizações Nacionais	55
3.2.1	INMETRO	55
3.2.2	ANVISA	59
3.2.3	ABNT	60
4	Parâmetros para avaliação da confiabilidade de dispositivos optoeletrônicos com aplicações biomédicas	62
4.1	Aspectos normativos para avaliação de equipamentos a laser e IPL com aplicação biomédica	62
4.1.1	Equipamentos a laser	62
4.1.2	Equipamentos a IPL	64

4.1.3	Parâmetros para avaliação da confiabilidade de dispositivos a laser e IPL	65
4.2	Parâmetros identificados para avaliação da confiabilidade de dispositivos optoeletrônicos com aplicação biomédica	66
4.3	Estudos experimentais: medição de parâmetros para avaliação da confiabilidade do OCT	78
4.4	Rastreabilidade metrológica e validação de equipamentos optoeletrônicos	82
5	Conclusão	83
	Referências Bibliográficas	85
A	Apêndice	95

Lista de figuras

2.1	Comparativo da profundidade de penetração e resolução das três principais técnicas de imageamento. Adaptado de: (8).	17
2.2	Interferômetro de Michelson	18
2.3	Intensidade da luz monocromática (a) e da luz de baixa coerência (b) no fotodetector. Adaptado de: (8).	19
2.4	Exemplo ilustrativo do grau de coerência temporal e o tempo de coerência. Fonte:(9).	21
2.5	Padrão senoidal do caso especial em que $\mathcal{V} = g_{12} $. Fonte:(9).	23
2.6	Esquema básico de um OCT. Adaptado de: (1).	24
2.7	Quatro tipos de interações de espalhamento da luz no tecido semi transparente. Fonte: (1).	25
2.8	Cintura do feixe e comprimento do foco para aberturas numéricas (a) pequenas e (b) grandes. Fonte: (8).	29
2.9	A-scan. Adaptado de: (8).	30
2.10	B-scan. Adaptado de: (8).	31
2.11	C-scan. Fonte: (21).	31
2.12	OCT no domínio do tempo. Fonte:(13).	32
2.13	OCT no domínio de Fourier.	33
2.14	<i>Swept-Source</i> OCT.	34
2.15	PS-OCT experimental. Fonte: (15).	35
2.16	Esquema da operação do DOCT. Fonte: (15).	36
2.17	Seção transversal esquemática do olho humano. Fonte:(3)	37
2.18	Comparativo das imagens geradas por OCTs (a) geração 1 e (b) geração 3. Fonte: (38).	38
2.19	Anatomia da pele.	39
2.20	Imagem de OCT da pele saudável. A seta indica a epiderme. À direita, o A-scan. Fonte: (53).	39
2.21	Imagens de OCT da pele saudável (a) antes, (b) logo em seguida da aplicação de pomada com 10% de ureia e (c) 35 minutos depois. Fonte:(53).	40
2.22	Comparativo entre diferentes técnicas diagnósticas para imageamento, no que concerne à resolução espacial. Fonte: (59).	41
2.23	Comparação entre a imagem <i>ex vivo</i> de uma placa aterosclerótica instável obtida por meio de OCT e microscopia óptica. Fonte: (3).	42
2.24	Exemplo de cateter utilizado em endoscópio de fibra óptica. Fonte: (3).	42
2.25	Ilustração do interior do dente. Adaptado de: The American Heritage Science Dictionary.	43
2.26	Imagem de seção transversal de OCT (esquerda) e de microscópio (direita) do tecido dentário e periodonto de porco. Fonte: (65).	44
2.27	Características de absorção do olho humano. Adaptado de: (73).	46

2.28	Observação visual do feixe de radiação luminosa: (a) direta; (b)refletido por uma superfície plana espelhada; (c)refletido por uma superfície curva espelhada;e (d)difuso refletido por uma superfície não espelhada.	47
2.29	Dano causado ao tecido biológico induzido por radiação laser. Fonte:(20).	47
3.1	Hierarquia do sistema metrológico. Fonte: (90).	57
3.2	Relação entre algumas entidades internacionais e nacionais	61
4.1	Feixe de trabalho.	67
4.2	Divergência do feixe.	67
4.3	Diferentes comportamentos temporais do laser: (a) CW; (b) pulsos longos com alta taxa de repetição e baixos picos de potência; e (c) pulsos curtos com baixa taxa de repetição e altos picos de potência.	68
4.4	Esquemático do sistema OCT OCS1300SS com a fonte laser de varredura (SS), acoplador (FC), controlador de polarização (PC), circulador (CIR), colimador (C), espelho (M) e atenuador variável de pinhole ajustável. Fonte:(95)	78
4.5	Avaliação da potência de saída do laser.	79
4.6	Envelope da curva de potência de saída do laser.	79
4.7	<i>A-scan</i> de um plástico com espessura de 1,2 mm. A seta indica o ponto FWHM utilizado para o cálculo.	80
4.8	Imagem 2D do padrão de calibração de abertura de 3 mm. As setas indicam os limites da abertura.	81
4.9	Imagem 2D do padrão de calibração de <i>step height</i> de 10 μm . A seta indica o degrau.	81

Lista de tabelas

2.1	Dados de fontes de luz de baixa coerência para OCTs. Fonte: (13).	27
2.2	Efeitos adversos à radiação laser. Fonte: (20)	45
4.1	Riscos e AEL das Classes Laser. Fonte:(20)	63
4.2	Limites de emissão para os grupos de risco. Fonte: (96).	65
4.3	Tempo de exposição de acordo com o grupo de risco. Fonte: (96).	65
4.4	Em vermelho está o resumo das recomendações sugeridas para os equipamentos laser, IPL e OCT. Em azul estão indicadas as informações solicitadas pelas normas do laser (IEC 60601-2-22) e IPL (IEC 60601-2-57). Legenda: D – deve constar na documentação do equipamento; M – medição para avaliação de conformidade deve ser realizada.	77
4.5	Resumo dos resultados experimentais comparados aos valores informados pelo fabricante.	80
A.1	Documentos nacionais e internacionais, em ordem cronológica, importantes para a avaliação metrológica do OCT.	95

“Science is the attempt to make the chaotic diversity of our sense-experience correspond to a logically uniform system of thought.”

Albert Einstein, *Out of my Later Years (1950)*, 98.