

**Danielle Ferreira de Oliveira**

**Confiabilidade Metrológica e Validação de Procedimentos  
Espectroradiométricos para Medição de Fontes Luminosas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Professores Orientadores:

Robert Hirschler, Ph.D.  
PósMQI/PUC-Rio

Maurício Nogueira Frota, Ph.D.  
PósMQI/PUC-Rio

Rio de Janeiro

Maio de 2006



**Danielle Ferreira de Oliveira**

**Confiabilidade Metrológica e Validação de Procedimentos  
Espectroradiométricos para Medição de Fontes Luminosas**

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

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Dr. Robert Hirschler**

Orientador

Programa de Pós Graduação em Metrologia (PósMQI/ PUC-Rio) e  
SENAI-CETIQT

**Prof. Dr. Maurício Nogueira Frota**

Orientador

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

**Prof. Dr. Paula Medeiros Proença Gouvêa**

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

**Prof. Dr. Elisabeth Costa Monteiro**

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

**Prof. Eduardo Jorge Pires Pacheco**

Departamento de Engenharia Elétrica (PUC-Rio)

**Coordenação Setorial de Pós-Graduação:**

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 18 de maio de 2006

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

### **Danielle Ferreira de Oliveira**

Graduada em Engenharia Industrial Têxtil pelo SENAI-CETIQT – Faculdade SENAI-CETIQT, em 2002. Engenheira Trainee, de 2003 a 2004. Engenheira do Laboratório de Colorimetria do SENAI-CETIQT, desde 2004.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Danielle Ferreira de

Confiabilidade metrológica e validação de procedimentos espectroradiométricos para medição de fontes luminosas / Danielle Ferreira de Oliveira ; orientadores: Robert Hirschler, Maurício Nogueira Frota. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2006.

v.169f. : il.(col.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação.

Inclui referências bibliográficas.

1. Metrologia – Teses. 2. Medição. 3. Espectroradiometria. 4. Fotometria. 5. Colorimetria. 6. Fontes luminosas. 7. Irradiância. 8. Simuladores de luz do dia. I. Hirschler, Robert. II. Frota, Maurício Nogueira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Dedico este trabalho aos meus pais, José Walber e Maria das Graças,  
e a todos os meus familiares e amigos.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais pela educação, atenção, dedicação e carinho em todas as horas.

Aos amigos e familiares pelo estímulo constante.

Aos professores orientadores, Robert Hirschler e Maurício Frota, pelo estímulo, competente orientação e dedicação.

Aos professores que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

Aos professores que integraram a Comissão Examinadora pelo cuidado na análise e pelas valiosas sugestões.

Ao SENAI-CETIQT por ter proporcionado a minha realização pessoal e o meu crescimento profissional.

Ao Fundo Setorial Verde-Amarelo (Convênio FINEP/MCT nº 22.01.0692.000 referência 1974/01), à PUC-Rio e ao SENAI/CETIQT, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Oliveira, Danielle Ferreira. **Confiabilidade Metrológica e Validação de Procedimentos Espectroradiométricos para Medição de Fontes Luminosas**. Rio de Janeiro, 2006. 169p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A avaliação e a caracterização da cor constituem fatores críticos do processo de controle de qualidade de produtos, que também devem atender exigências dos clientes e consumidores finais. A cor de um objeto depende fortemente das características da iluminação. Nesse contexto, a presente pesquisa analisou e comparou os diferentes métodos especificados em normas internacionais, que qualificam o desempenho dos simuladores de luz do dia utilizados em avaliações visuais (cabines de luz) e instrumentais (espectrofotômetros). Para alcançar tais objetivos, foram verificadas as condições de medição estabelecidas pela CIE (intervalo de medição e largura de banda espectral) e elaborados e validados procedimentos de medição de diferentes fontes luminosas. Com base nestes procedimentos, foram realizadas medições de simuladores de luz do dia para adquirir as suas distribuições espectrais de potência, as quais foram utilizadas para avaliá-los e para comparar os métodos especificados em normas. Como principais resultados da pesquisa destacam-se: (i) a constatação de que, de fato, as recomendações da CIE para medição de fontes luminosas devem ser incorporadas ao processo de medição; (ii) o aumento da confiabilidade metrológica através da validação dos procedimentos espectroradiométricos com base em análises de repetitividade das medições; e (iii) a comparação realizada entre os diferentes métodos de avaliação de simuladores de luz do dia, o que permitiu documentar para os casos estudados a presença ou a falta de correlação entre os mesmos. O trabalho contribuiu também ao introduzir uma sistemática normalizada de rotinas para se expressar a incerteza associada à medição espectroradiométrica.

## Palavras-chave

Metrologia; medição; espectroradiometria; fotometria; colorimetria; cabines de luz; fontes luminosas; irradiância; simuladores de luz do dia.

## Abstract

Oliveira, Danielle Ferreira. **Metrological Confidence and Validation of Spectroradiometric Procedures for the Measurement of Light Sources** Rio de Janeiro, 2005. 169p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The evaluation and the characterization of the colour constitute critical factors of the process of quality control of products, that also must take care of requirements imposed by customers and final consumers. The colour of an object depends greatly on the characteristics of the illumination. In this context, this research is aimed at discussing the different international standards that characterize the performance of the daylight simulators used in instrumental (spectrophotometers) and visual (light booths) evaluations and also at analysing the differences between the various methods specified in these standards. To reach these objectives the measurement conditions established by the CIE (interval and spectral band-width) were verified and elaborated and validated procedures for the measurement of different luminous sources. Based on these procedures, measurements of daylight simulators were carried out to acquire their spectral power distributions. The measurement results were then used to analyze the evaluations methods specified in standards. The following main results have been accomplished: (i) the CIE recommendations for the measurement of luminous sources must, in fact, be incorporated into the measurement process; (ii) the increase in the metrological reliability through the validation of the spectroradiometric procedures based on the analyses of the repeatability of the measurements; and (iii) the comparison established among the different evaluation methods of daylight simulators, leading to the distinction between the presence or the lack of correlation present in the different methods investigated. The work also contributed by the introduction of standard routines to express the uncertainty associated with spectroradiometric measurements.

## Key-Words

Metrology; measurement; spectroradiometry; photometry; colorimetry; light booths; luminous sources; irradiance; daylight simulators.

# Sumário

<b>1 Introdução</b>	<b>21</b>
<b>2 Fundamentos da Colorimetria</b>	<b>23</b>
2.1. Sistema CIE	23
2.2. Observador Padrão	23
2.3. Iluminantes e Fontes CIE	25
2.3.1. Iluminante A	25
2.3.2. Fonte A	26
2.3.3. Iluminante B	26
2.3.4. Fonte B	26
2.3.5. Iluminante C	27
2.3.6. Fonte C	27
2.3.7. Iluminantes D	27
2.4. Cálculo dos Valores Triestímulos da CIE	29
2.5. Espaços Uniformes de Cor	30
2.5.1. Espaço CIELAB	31
2.5.2. Espaço CIELUV	34
2.5.3. Diagrama UCS (Uniform Chromaticity Scale) CIE 1976	34
<b>3 Fundamentos da Espectroradiometria</b>	<b>36</b>
3.1. Radiometria	36
3.2. Fotometria	37
3.3. Grandezas para descrever uma fonte radiante	37
3.3.1. Grandezas radiométricas	37
3.3.2. Grandezas fotométricas	39
3.3.3. Grandezas espectroradiométricas	41
3.4. O espectroradiômetro e o seu funcionamento	42
3.5. Normalização de curvas de distribuição espectral de potência	43
3.6. Fontes Luminosas	44
3.6.1. Lâmpada incandescente	44
3.6.2. Lâmpada incandescente com filtro	46
3.6.3. Lâmpada dicróica	47

3.6.4. Lâmpadas de xenônio (contínua e pulsante)	47
3.6.5. Lâmpadas fluorescentes	50
3.7. Caracterização de fontes luminosas	52
3.7.1. Temperatura de Cor	53
3.7.2. Índice de Reprodução de Cor (IRC)	55
3.7.3. Índice de Metameria	61
3.8. Classificação de simuladores de luz do dia	62
3.9. Incerteza de medição	63
3.9.1. Tipos de incerteza de medição	63
3.9.2. Expressão geral da incerteza de medição	64
3.9.3. Determinação da repetitividade e do erro de medição	64
<b>4 Métodos e Normas Aplicáveis para Verificação e Avaliação da Qualidade da Iluminação</b>	<b>66</b>
4.1. Métodos utilizados para classificar simuladores de luz do dia	66
4.1.1. British Standard 950: Parte 1 (1967)	66
4.1.2. SCF (Source Conformance Factor)	70
4.1.3. Comissão Internacional de Iluminação – Método CIE 51.2 (1999)	70
4.1.4. JIS 8717 - 1989	75
4.2. Normas para avaliar a qualidade da iluminação	79
4.2.1. ANSI PH2.32 – 1972 – Condições Visuais para Avaliação da Qualidade e Uniformidade de Cor nas Artes Gráficas	79
4.2.2. AS 4004 – 1992 – Cabines de Luz para Avaliação Visual de Cor e Matização de Cor	80
4.2.3. AS/NZ S 1580.601.1 – 1995 – Tintas e Materiais Relacionados– Métodos de Teste. Método 601.1 : Comparação Visual de Cor	80
4.2.4. ASTM D1729 – 96 (2003) – Norma Padrão para Avaliação Visual de Cores e Diferenças de Cor de Materiais Opacos Iluminados Difusamente	80
4.2.5. E991 – 98 – Norma Padrão para Medição de Cor de Amostras Fluorescentes	81
4.2.6. ISO 3664 – 2000 – Condições Visuais – Tecnologia Gráfica e Fotográfica	81
4.2.7. ISO 3668 – 1998 – Tintas e Vernizes– Comparação Visual das Cores de Tintas	82
4.2.8. JIS Z 8716 – 1991 – Lâmpada Fluorescente como um Simulador do Iluminante Padrão CIE D65 para Comparação Visual de Cores de Superfícies – Tipos e Características	82
4.2.9. JIS Z 8717 – 1989 – Métodos de Medição de Cor de Objetos Fluorescentes	82

4.2.10. JIS Z 8720 – 1983 – Iluminantes Padrão e Fontes para Colorimetria	83
4.2.11. JIS Z 8723 – 2000 – Métodos para Comparação Visual de Cores de Superfície	83
4.2.12. JIS Z 8724 – 1997 – Métodos de Medição de Cor de Fontes Luminosas	84
4.2.13. JIS Z 8726 – 1990 – Método de Especificação de Índices de Reprodução de Cor de Fontes luminosas	84
4.2.14. JIS Z 9112 – 1990 – Classificação de Lâmpadas Fluorescentes por Cromaticidade e Índice de Reprodução de Cor	84
4.2.15. SAE J361 – 2003	84
<b>5 Equipamentos e materiais utilizados</b>	<b>86</b>
5.1. Espectroradiômetro OL 750D	86
5.1.1. Características técnicas	86
5.1.2. Elementos / acessórios básicos	86
5.1.3. Fendas e Aberturas	88
5.2. Espectrofotômetros	92
5.2.1. Espectrofotômetro Minolta CM 3720d	92
5.2.2. Espectrofotômetro Minolta CM 3600d	93
5.3. Fontes padrão	94
5.4. Fontes testadas	95
<b>6 Desenvolvimento Experimental</b>	<b>96</b>
6.1. Determinação da incerteza associada à medição de irradiância	97
6.1.1. Incertezas associadas ao espectroradiômetro	97
6.1.2. Incertezas associadas ao padrão de irradiância ( <i>Work Lamp 01</i> )	105
6.1.3. Incertezas associadas a uma fonte luminosa	109
6.2. Metodologias para medição da irradiância de fontes luminosas	112
6.2.1. Procedimento para medição da irradiância de lâmpadas incandescentes e fluorescentes	112
6.2.2. Procedimento para medição da irradiância de lâmpadas pulsantes de xenônio	119
6.3. Considerações metrológicas sobre a medição da irradiância de lâmpadas incandescentes e fluorescentes	126
6.4. Aplicabilidade da Lei do Quadrado para fontes pontuais (lâmpadas incandescentes) e para fontes extensas (lâmpadas fluorescentes)	138
6.5. Intercomparação de métodos utilizados em normas nacionais e internacionais para se verificar e avaliar simuladores de luz do dia	143

<b>7 Conclusões e Recomendações</b>	<b>163</b>
7.1. Conclusões	163
7.2. Recomendações	165
<b>8 Referências Bibliográficas</b>	<b>166</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.</b> Determinação dos valores triestímulos de objetos e de fontes de luz	29
<b>Tabela 2.</b> Coordenadas de Cromaticidade	67
<b>Tabela 3.</b> Composição espectral de cada banda na faixa UV e suas tolerâncias	68
<b>Tabela 4.</b> Composição espectral de cada banda na faixa visível e suas tolerâncias	68
<b>Tabela 5.</b> Método de graduação da Norma BS 950 proposto pelo Hunt (1975) para simuladores de luz do dia	69
<b>Tabela 6.</b> Coordenadas de cromaticidade $u'_{10}$ $v'_{10}$ CIE 1976 dos iluminantes da luz do dia da CIE	72
<b>Tabela 7.</b> Categorização do simulador de luz do dia pelo método nº 51.2 da CIE	75
<b>Tabela 8.</b> Valores aceitáveis do índice de erro colorimétrico fluorescente para diferentes métodos	83
<b>Tabela 9.</b> Resolução em nm para combinações de fendas de entrada e saída	91
<b>Tabela 10.</b> Resolução em nm para combinações de aberturas e fendas de saída	92
<b>Tabela 11.</b> Incertezas do padrão OL200C descritas no certificado de calibração ( $k=2$ )	98
<b>Tabela 12.</b> Fontes de incerteza associadas ao espectralradiômetro	99
<b>Tabela 13.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para se determinar a média, o desvio padrão e o erro de medição das medições de irradiância com recalibração ( $W/cm^2nm$ )	100
<b>Tabela 14.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para se determinar a média, o desvio padrão e o erro de medição das medições de irradiância sem recalibração ( $W/cm^2nm$ )	100
<b>Tabela 15.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para se determinar a média e o desvio padrão das calibrações realizadas	101
<b>Tabela 16.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para converter valores expressos em %A (especificado no certificado de calibração da fonte de corrente DC) em valores expressos em % de irradiância	101
<b>Tabela 17.</b> Extrato da planilha de cálculo para se interpolar a incerteza de medição expressa %A (especificada no certificado de calibração da fonte de corrente) em valores expressos em % irradiância	102
<b>Tabela 18.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada na determinação da incerteza de medição expandida do espectralradiômetro (repetitividade e erro de medição)	102

<b>Tabela 19.</b> Extrato da planilha de cálculo para conversão dos valores de irradiância em valores triestímulos	103
<b>Tabela 20.</b> Expressão das incertezas associadas à medição dos experimentos para se verificar a repetitividade	104
<b>Tabela 21.</b> Expressão das incertezas associadas à medição dos experimentos para se verificar o erro de medição	104
<b>Tabela 22.</b> Incertezas expandidas associadas ao erro de medição do espectrorradiômetro OL 750D (k=2)	105
<b>Tabela 23.</b> Fontes de incerteza associadas ao padrão a ser calibrado	106
<b>Tabela 24.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para se determinar a média, o desvio padrão e o erro de medição das medições realizadas (W/cm <sup>2</sup> nm)	107
<b>Tabela 25.</b> Extrato da planilha de cálculo para a determinação da média das 10 medições realizadas (valores nominais do padrão calibrado)	107
<b>Tabela 26.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada na determinação da incerteza de medição expandida do padrão de irradiância	108
<b>Tabela 27.</b> Incertezas expandidas associadas ao padrão de irradiância espectral <i>Work Lamp 01</i>	108
<b>Tabela 28.</b> Fontes de incerteza associadas à fonte luminosa analisada	110
<b>Tabela 29.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada para se determinar a média, o desvio padrão e o erro de medição das medições realizadas (W/cm <sup>2</sup> nm)	110
<b>Tabela 30.</b> Extrato da planilha de cálculo para a determinação da média das 10 medições realizadas (valores de irradiância de uma fonte luminosa testada)	111
<b>Tabela 31.</b> Extrato da planilha de cálculo utilizada na determinação da incerteza de medição expandida de uma fonte luminosa	111
<b>Tabela 32.</b> Incertezas expandidas associadas à lâmpada Philips TL-D 90 De Luxe	112
<b>Tabela 33.</b> Repetitividade e erro de medição das medições realizadas da lâmpada padrão <i>Work Lamp 01</i>	117
<b>Tabela 34.</b> Repetitividade das medições realizadas da lâmpada Philips TLD 36W/965	118
<b>Tabela 35.</b> Erro de medição das medições realizadas da lâmpada pulsante do espectrofotômetro CM-3720d	125
<b>Tabela 36.</b> Condições de medição estabelecidas para verificar o efeito da largura de banda e do intervalo de medição	126
<b>Tabela 37.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes resoluções espectrais e intervalos de medição	129
<b>Tabela 38.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes intervalos de medição com resolução espectral de 5nm	130

<b>Tabela 39.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes resoluções espectrais com intervalo de medição de 5nm	131
<b>Tabela 40.</b> Repetitividade e erro de medição das medições realizadas da lâmpada padrão em irradiância <i>Work Lamp 01</i> em termos de temperatura correlata de cor e índice de reprodução de cor	132
<b>Tabela 41.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes resoluções espectrais e intervalos de medição	133
<b>Tabela 42.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes intervalos de medição com resolução espectral de 5nm	134
<b>Tabela 43.</b> Resultados das medições realizadas da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes resoluções espectrais com intervalo de medição de 5nm	135
<b>Tabela 44.</b> Repetitividade e erro de medição das medições realizadas da lâmpada fluorescente Philips TLD 36 W/965 em termos de temperatura correlata de cor, índice de reprodução de cor e índices de metameria	136
<b>Tabela 45.</b> Resultados das medições realizadas em termos de valores triestímulos, UCS 1976, CIE 1931, temperatura correlata e IRC	142
<b>Tabela 46.</b> Extrato da planilha de cálculo ilustrando os resultados obtidos pelo Método BS 950–Parte 1	145
<b>Tabela 47.</b> Resultados encontrados na planilha do Método BS 950 – Parte 1	146
<b>Tabela 48.</b> Extrato da planilha de cálculo ilustrando os resultados obtidos pelo Método SCF	146
<b>Tabela 49.</b> Extrato da planilha de cálculo ilustrando os resultados obtidos pelo Método CIE 51.2	146
<b>Tabela 50.</b> Extrato da planilha de cálculo ilustrando os resultados obtidos pelo Método JIS Z 8717	147
<b>Tabela 51.</b> Tabela com os resultados de cada simulador testado	148
<b>Tabela 52.</b> Tabela com os resultados de cada simulador encontrado na literatura ou medido em outros laboratórios	149

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Observador padrão (Hirschler, 2002)	24
<b>Figura 2.</b> Observadores 2º e 10º (Minolta, 1993)	24
<b>Figura 3.</b> Campos visuais dos observadores (Hirschler, 2002)	25
<b>Figura 4.</b> Distribuição espectrais dos iluminantes D e C (CIE, 1986)	29
<b>Figura 5.</b> Espaço tridimensional XYZ (Hirschler, 2002)	30
<b>Figura 6.</b> Diagrama xy de cromaticidade (Hirschler, 2002)	30
<b>Figura 7.</b> Coordenadas cartesianas do espaço psicométrico CIELAB (Judd e Wyszecki, 1975)	31
<b>Figura 8.</b> O significado geométrico das coordenadas $L^*a^*b^*$ e $L^*C^*H^°$ (HunterLab, 1978)	32
<b>Figura 9.</b> Diagrama de cálculo de $\Delta E^*$ no diagrama CIELAB (Minolta, 1993)	33
<b>Figura 10.</b> Representação gráfica de dois estímulos no espaço $L^*a^*b^*$ (Berns, 2000)	33
<b>Figura 11.</b> Diagrama do espaço uniforme de cor (UCS) da CIE 1976 (Minolta, 1993)	35
<b>Figura 12.</b> Fluxo radiante	38
<b>Figura 13.</b> Ângulo sólido	38
<b>Figura 14.</b> Diferença entre (a) fluxo luminoso e (b) intensidade luminosa	40
<b>Figura 15.</b> Iluminamento de um objeto: (a) a visão de perto e (b) a visão de longe	41
<b>Figura 16.</b> Eficácia luminosa da visão humana (Curva $V(\lambda)$ )	44
<b>Figura 17.</b> Esquema simplificado de uma lâmpada incandescente	44
<b>Figura 18.</b> Lâmpada incandescente	45
<b>Figura 19.</b> Lâmpada halógena	46
<b>Figura 20.</b> Esquema simplificado de uma lâmpada dicróica	47
<b>Figura 21.</b> Lâmpada dicróica	47
<b>Figura 22.</b> Espectro de emissão de uma lâmpada de xenônio	48
<b>Figura 23.</b> Esquema do simulador D65 do BAM (Die Farbe, 1995)	49
<b>Figura 24.</b> Lâmpadas de xenônio de arco curto	49
<b>Figura 25.</b> Curva de distribuição espectral de uma fonte padrão de xenônio (JIS Z 8092-1984) comparada com a do iluminante padrão CIE D65	50
<b>Figura 26.</b> Esquema explicativo do funcionamento de uma lâmpada fluorescente	51
<b>Figura 27.</b> Lâmpadas fluorescentes compactas	52

<b>Figura 28.</b> Lâmpadas fluorescentes tubulares	52
<b>Figura 29.</b> Diagrama de cromaticidade x, y com as posições dos radiadores Planckianos (Minolta, 1993)	53
<b>Figura 30.</b> Gráfico de cromaticidade x, y indicando a localização dos corpos negros, as linhas de isotemperatura e as linha de $\Delta uv$ iguais (Minolta, 1993)	55
<b>Figura 31.</b> As 14 amostras determinadas pela CIE nº 13.3 – 1995	57
<b>Figura 32.</b> Gráfico com as curvas das 8 primeiras amostras (TCS1 a TCS8)	57
<b>Figura 33.</b> Gráficos com as curvas das amostras TCS9 a TCS14	57
<b>Figura 34.</b> Ilustração do CRI de uma lâmpada CWF, com $R_a = 62$ e $R_i = 52, 74, 90, 54, 56, 64, 74$ e 30 (IES DG-1-1990)	60
<b>Figura 35.</b> Duas fontes luminosas que possuem o mesmo CRI mas apresentam cores diferentes	60
<b>Figura 36.</b> Amostras metaméricas I e II	61
<b>Figura 37.</b> Apresentação do MI e do IRC	61
<b>Figura 38.</b> Tolerância de Cromaticidade do padrão BS 950 para simulador D65 no Sistema CIE 1931	67
<b>Figura 39.</b> Divisão das faixas da BS 950	68
<b>Figura 40.</b> Distribuições espectrais de potência relativa dos iluminantes padrão da luz do dia da CIE	71
<b>Figura 41.</b> Pares metaméricos para quantificar $MI_{(vis)}$ dos simuladores $D_{65}$	74
<b>Figura 42.</b> Gráfico com as curvas do fator total de radiância das 3 amostras de cor iluminadas pelo iluminante padrão CIE D65	76
<b>Figura 43.</b> Gráfico com as curvas do fator total de radiância das 6 amostras de cor iluminadas pelo iluminante padrão CIE D65	76
<b>Figura 44.</b> Elementos/acessórios básicos utilizados nas medições de irradiância	87
<b>Figura 45.</b> Esquema da montagem do equipamento utilizando como entrada óptica a esfera de integração	88
<b>Figura 46.</b> Apresentação de um raio monocromático com utilização de fendas iguais	89
<b>Figura 47.</b> Apresentação de um raio monocromático com utilização de fendas diferentes	89
<b>Figura 48.</b> Apresentação de um raio monocromático com utilização de fenda e abertura na saída	90
<b>Figura 49.</b> Diferentes tamanhos de aberturas e fendas	91
<b>Figura 50.</b> Espectrofotômetro CM 3720d	93
<b>Figura 51.</b> Funcionamento do Espectrofotômetro CM 3720d	93
<b>Figura 52.</b> Espectrofotômetro CM 3600d	94
<b>Figura 53.</b> Funcionamento do Espectrofotômetro CM 3600d	94

<b>Figura 54.</b> Representação gráfica valores dos triestímulos referente às 10 medições realizadas sem recalibração (deriva)	103
<b>Figura 55.</b> Aparatus experimental utilizado nas medições espectralométricas de lâmpadas fluorescentes e incandescentes	113
<b>Figura 56.</b> Montagem do instrumento para calibração	114
<b>Figura 57.</b> Gráfico da distribuição espectral de potência de uma lâmpada fluorescente - Sylvania SuperSave Cool White	115
<b>Figura 58.</b> Gráfico da distribuição espectral de potência de uma lâmpada incandescente – Philips 90W 130V (Master Line)	115
<b>Figura 59.</b> Gráfico da distribuição espectral de potência de uma lâmpada padrão de irradiância de 1000W – <i>Work Lamp 01</i>	116
<b>Figura 60.</b> Comparação entre as 10 medições realizadas da lâmpada padrão <i>Work Lamp 01</i> e os seus valores nominais	117
<b>Figura 61.</b> Curvas de distribuição espectral obtidas da lâmpada Philips TLD 36W/965	118
<b>Figura 62.</b> Aparatus experimental utilizado nas medições espectralométricas de lâmpadas pulsantes	120
<b>Figura 63.</b> Posicionamento e distância da lâmpada padrão em relação à lente do telescópio	120
<b>Figura 64.</b> Posicionamento e distância do espectrofotômetro CM-3600d em relação à lente do telescópio	122
<b>Figura 65.</b> DEPs das lâmpadas pulsantes que se encontram no espectrofotômetro CM-3600d	123
<b>Figura 66.</b> Medições realizadas do espectrofotômetro 3720d com o filtro de UV na posição 0%	124
<b>Figura 67.</b> Medições realizadas do espectrofotômetro 3720d com o filtro de UV na posição 100%	124
<b>Figura 68.</b> Comparação entre 50%UV medido e 50%UV calculado	125
<b>Figura 69.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes resoluções espectrais e intervalos de medição	129
<b>Figura 70.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes intervalos de medição com resolução espectral de 5nm	130
<b>Figura 71.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada padrão de irradiância <i>Work Lamp 01</i> nas condições de diferentes resoluções espectrais com intervalo de medição de 5nm	131
<b>Figura 72.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes resoluções espectrais e intervalos de medição	133
<b>Figura 73.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes intervalos de medição com resolução espectral de 5nm	134
<b>Figura 74.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência da lâmpada fluorescente Philips TLD 36W/ 965 nas condições de diferentes resoluções espectrais com intervalo de medição de 5nm	135

<b>Figura 75.</b> Lei do inverso do quadrado da distância	138
<b>Figura 76.</b> Aplicação da lei do inverso do quadrado da distância	139
<b>Figura 77.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência medida e calculada da lâmpada Work Lamp (fonte pontual)	140
<b>Figura 78.</b> Gráfico das distribuições espectrais de potência medida e calculada da lâmpada fluorescente (fonte extensa)	141
<b>Figura 79.</b> Gráfico das distribuições espectrais normalizadas de potência medida e calculada da lâmpada fluorescente (fonte extensa)	141
<b>Figura 80.</b> DEPs dos simuladores de luz do dia testados e do iluminante padrão D65 da CIE	144
<b>Figura 81.</b> DEPs dos simuladores encontrados na literatura ou medidos em outros laboratórios	145
<b>Figura 82.</b> Comparação entre $SCF_{VIS}$ e $MI_{VIS}$	150
<b>Figura 83.</b> Correlação entre $SCF_{VIS}$ e $MI_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	151
<b>Figura 84.</b> Comparação entre $SCF_{UV}$ e $MI_{UV}$	151
<b>Figura 85.</b> Correlação entre $SCF_{UV}$ e $MI_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	152
<b>Figura 86.</b> Comparação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $MI_{VIS}$	153
<b>Figura 87.</b> Correlação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $MI_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	153
<b>Figura 88.</b> Comparação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $MI_{UV}$	154
<b>Figura 89.</b> Correlação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $MI_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	154
<b>Figura 90.</b> Comparação entre $BS_{VIS}$ e $MI_{VIS}$	155
<b>Figura 91.</b> Correlação entre $BS_{VIS}$ e $MI_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	155
<b>Figura 92.</b> Comparação entre $BS_{UV}$ e $MI_{UV}$	156
<b>Figura 93.</b> Correlação entre $BS_{UV}$ e $MI_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	156
<b>Figura 94.</b> Comparação entre $SCF_{VIS}$ e $BS_{VIS}$	157
<b>Figura 95.</b> Correlação entre $SCF_{VIS}$ e $BS_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	157
<b>Figura 96.</b> Comparação entre $SCF_{UV}$ e $BS_{UV}$	158
<b>Figura 97.</b> Correlação entre $SCF_{UV}$ e $BS_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	158
<b>Figura 98.</b> Comparação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $BS_{VIS}$	159
<b>Figura 99.</b> Correlação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $BS_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	159
<b>Figura 100.</b> Comparação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $BS_{UV}$	160
<b>Figura 101.</b> Correlação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $BS_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	160

<b>Figura 102.</b> Comparação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $SCF_{VIS}$	161
<b>Figura 103.</b> Correlação entre $F_{VIS}$ (JIS Z 8717) e $SCF_{VIS}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	161
<b>Figura 104.</b> Comparação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $SCF_{UV}$	162
<b>Figura 105.</b> Correlação entre $F_{UV}$ (JIS Z 8717) e $SCF_{UV}$ linear (azul) e polinomial de 2ª ordem (vermelho)	162

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

ANSI – American National Standard

AS – Australian Standard

AS/NZ – Australian / New Zealand Standard

ASTM – American Society for Testing and Material

BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung

BS – British Standard

CETIQT – Centro de Tecnologia da Indústria Química Têxtil

CGPM – General Conference on Weights and Measures

CIE – Comissão Internationale de L'Eclairage

DEP – Distribuição Espectral de Potência

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

FNDCT – Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

HBW – Half Band Width

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO – International Organization for Standardization

JIS – Japanese Industrial Standard

PósMQI – Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação

PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

SAE – Society of Automotive Engineers

SCF – Source Conformance Factor

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

TIB – Tecnologia Industrial Básica

UOC – Unidade Operacional de Colorimetria