MARCIO MAKIYAMA MELLO

Sistema de Análise de Transmitâncias em Lentes Solares

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de
Sinais e Instrumentação

Orientadora: Profa. Dra. Liliane Ventura

São Carlos
2014

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MÁRCIO MAKIYAMA MELLO.**

Título da dissertação: "Sistema de análise de transmitâncias em lentes solares".

Data da defesa: 10/04/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Associada **Liliane Ventura Schiabel (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Lino Misoguti**
(Instituto de Física de São Carlos/IFSC)

Aprovado

Profa. Dra. **Ligia de Oliveira Ruggiero**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Bauru)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M527s Mello, Marcio Makiyama
Sistema de Análise de Transmitâncias em Lentes
Solares / Marcio Makiyama Mello; orientadora Liliiane
Ventura. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. UV. 2. óculos de sol. 3. função de ponderação.
4. NBR15111. 5. transmitância. I. Título.

Dedico à todas as pessoas.

AGRADECIMENTOS

À minha família, meu maior pilar de sustentação durante os últimos anos, mesmo com todas as suas batalhas.

À Profa. Dra. Liliane Ventura, minha orientadora e amiga, pela oportunidade e confiança no trabalho e auxílio e compreensão nos momentos difíceis.

Aos amigos de aventura, tanto da graduação como os de laboratório. Estes conhecem a verdadeira história.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP. Uma singela homenagem para quem muito trabalha para o auxílio da pesquisa no país.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro do projeto 2012/03565-6.

“Somos o que pensamos. Tudo o que somos surge com nossos pensamentos.
Com nossos pensamentos, fazemos o nosso mundo.”

Buda

RESUMO

MELLO, M. M. **Sistema de Análise de Transmitâncias em Lentes Solares**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Medidas de transmitância em óculos de sol fazem parte de alguns dos testes propostos pela norma NBR15111, porém, observou-se que não há no país um sistema preciso para medidas de transmitância que não seja com o uso de espectrofotômetros e pessoas qualificadas para utilizar o equipamento, aplicar as funções de ponderação e fornecer laudos técnicos sobre a lente testada. Assim, o trabalho propõe métodos que utilize componentes simples e resulte na construção de um equipamento que possa fornecer a informação sobre as transmitâncias dos filtros de óculos de sol de forma automática, de acordo com a NBR15111. Foi feita a espectrofotometria de 45 lentes de óculos de uso geral, e calculadas suas respectivas transmitâncias (luminosa, ultravioleta, semafórica), como amostras de comparação com as metodologias testadas. Os testes incluíram lâmpadas e LEDs como fontes de emissão para a região do espectro visível e lâmpadas fluorescentes para a região ultravioleta, além de sensores específicos para cada região espectral, e eletrônica de controle e aquisição dos sinais. Foram usadas ferramentas de análise estatística, como erro RMS, coeficiente de aderência (GFC) e análise de Bland-Altman. Aproximadamente 62% dos óculos testados foram reprovados para a direção no trânsito e nenhum foi reprovado para a proteção UV. Os métodos RMS e GFC apontaram combinações entre fonte e sensor que conseguem fazer a ponderação com os menores desvios-padrão das medidas espectrométricas. O sistema para teste UV mostrou melhoria significativa em relação aos desenvolvidos anteriormente, com um desvio padrão de 4,45 pontos percentuais e o sistema para testes na região visível utilizou o sensor TCS, no qual a regressão polinomial mostrou melhores resultados que as redes neurais artificiais, com os menores limites de concordância para as transmitâncias. Um número maior de amostras pode melhorar os métodos para que se obtenha uma aproximação ideal para todos os óculos de sol. Uma montagem com LEDs se apresenta como uma alternativa interessante quanto ao custo, tamanho e baixo consumo para medidores de transmitância portáteis. Desenvolveu-se um sistema com módulos para teste UV, Visível e Semafórico, para uso público no campus da USP de São Carlos, proporcionando conscientização e extensão dos estudos em relação aos óculos solares, contribuindo efetivamente com a população brasileira.

Palavras-chave: UV, óculos de sol, função de ponderação, NBR15111, transmitância.

ABSTRACT

MELLO, M. M. **Transmittance Analysis System for Solar Lenses**. 2014. Thesis (Master Degree) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Transmittance measurements in sunglasses are a part of the standard tests proposed by NBR15111, however, it was observed that there is no accurate system for measuring transmittance different than using spectrophotometers and skilled practitioner to manage the equipment, apply the weighting functions and provide technical reports on the lens tested. Therefore, this study proposes methodologies using simple components and that can result a device that can provide information about sunglass filters automatically, according to NBR15111. Spectrophotometry was calculated in 45 lenses of sunglasses for general use, and their respective transmittance (visible, ultraviolet, traffic light), used as samples for testing the methodologies. The tests included lamps and LEDs as light sources for the visible region spectrum and fluorescent lamps for ultraviolet region, specific sensors for each spectral region, and electronic for control and signal acquisition. Statistical analysis tools were used, such as RMS error, goodness-of-fit coefficient (GFC) and the Bland - Altman analysis. Approximately 62% of the tested lenses failed in the test for signal light recognition and none has failed for UV protection. The RMS and GFC methods indicated combinations between source and sensor that calculated transmittance with the lowest standard deviations of the spectrometric measurements. The system for testing UV showed improvement compared to other previously equipment, with a standard deviation of 4.45 and the system for testing the visible region used the TCS sensor, in which the polynomial regression showed better results than artificial neural networks. A larger number of samples can improve the methods in order to obtain an optimal calibration that includes all sunglasses. LEDs seem to be a good alternative in terms of cost, size and low power consumption for portable transmittance meters. We developed a system with modules for testing UV, Visible and Traffic Light transmittance for public use on the USP São Carlos campus, providing awareness and extent of studies about the sunglasses, in order to contribute more effectively to the Brazilian population.

Keywords: UV, sunglasses, weighting function, NBR15111, transmittance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Transmitância em um filtro	33
Figura 2 (a) Espectrofotômetro USB2000+ – <i>Ocean Optics</i> (b) Fibra BIF600-UV/VIS utilizada	35
Figura 3 Espectrofotômetro CARY 5000 (<i>Varian</i>)	35
Figura 4 Função de ponderação W_{VIS} (380-780 nm)	37
Figura 5 Padrão iluminante D65 (espectro)	39
Figura 6 Função sensibilidade visual do olho humano, curva fotópica (azul) e escotópica (vermelho).....	39
Figura 7 Função de ponderação W_{UV} (280-400 nm).....	41
Figura 8 Intensidade de radiação $E_{s\lambda}(\lambda)$, do Sol ao nível do mar e massa de ar 2.....	42
Figura 9 Função de eficácia espectral relativa – curva eritêmica	43
Figura 10 Funções de ponderação na região semafórica (vermelho - W_{VERM} , amarelo - W_{AMAR} , verde - W_{VERD} e azul - W_{AZUL})	45
Figura 11 Padrão iluminante A (espectro)	46
Figura 12 Pontos de medida para a espectrometria (5 pontos)	48
Figura 13 Peça desenvolvida como aparato das lentes para deslocamento de 5 mm	49
Figura 14 Posicionamento das partes mecânicas no espectrofotômetro	49
Figura 15 Ferramentas do <i>kit</i> KL25Z.....	50
Figura 16 (a) Sensor BPW21R e; (b) espectro de sensibilidade do BPW21R.....	51
Figura 17 (a) Sensor SFH5711 e; (b) espectro de sensibilidade do SFH5711.....	52
Figura 18 Circuito de amplificação do sensor SFH5711	53
Figura 19 Curva de resposta do sensor SG01S-18, em comparação com a curva eritêmica $S(\lambda)$	54
Figura 20 Encapsulamento do sensor TCS3771	55
Figura 21 Curva de resposta do TCS3771 (u.a. – unidades arbitrárias)	56
Figura 22 Curva de transmissão do filtro infravermelho usado, comparada com a função de ponderação visível	57
Figura 23 Exemplo de análise de dispersão de Bland-Altman entre variáveis X e Y	59
Figura 24 Exemplo de análise de dispersão de Bland-Altman entre variáveis W e Z....	59
Figura 25 Exemplo da análise dos limites de concordância de Bland-Altman entre variáveis X e Y	60

Figura 26 Exemplo da análise dos limites de concordância de Bland-Altman entre variáveis W e Z.....	60
Figura 27 Exemplo de funções de próximas ($W_{FVIS}(\lambda) \times V(\lambda)$).....	61
Figura 28 Espectro do LED Branco usado para os testes.....	63
Figura 29 Comparação entre as curvas de ponderação semafóricas (W_{FVERM} , W_{FAMAR} , W_{FAZUL} , W_{FVERD}) com a curva de emissão dos LEDs testados.....	64
Figura 30 Comparação entre a curva de ponderação ultravioleta com combinação das lâmpadas e sensor UV.....	65
Figura 31 Diagrama de blocos de uma rede <i>tansig/purelin</i> com duas camadas.....	68
Figura 32 Exemplo de corte em cabeça de manequim para apoio dos óculos entre os feixes óticos.....	69
Figura 33 Projeto Opto-mecânico para realização das medidas.....	70
Figura 34 Gabinete construído para fixação das lâmpadas.....	70
Figura 35 <i>Display</i> comercial da Videosoft para abrigar a interface com o usuário do protótipo de auto-atendimento para medição de transmitância em óculos de sol.....	72
Figura 36 Sistema proposto para medição da transmitância em óculos de sol.....	72
Figura 37 Totem desenvolvido. Vista frontal e do protótipo com a parte ótica e eletrônica.....	73
Figura 38 Tela inicial do programa de interface com o usuário.....	74
Figura 39 Tela de aviso do programa de interface com o usuário.....	74
Figura 40 Tela ‘Principal’ do programa de interface com o usuário.....	75
Figura 41 Tela ‘Resultado’ do programa de interface com o usuário.....	75
Figura 42 Tela ‘Sobre Você’ do programa de interface com o usuário.....	76
Figura 43 Tela ‘Informações’ do programa de interface com o usuário.....	76
Figura 44 Tela ‘Equipe’ do programa de interface com o usuário.....	76
Figura 45 Variação de intensidade, no tempo, das lâmpadas UV medida com os sensores UV, e a relação entre a variação nos dois sensores, T_{uv}	79
Figura 46 Variação da intensidade, no tempo, do LED branco medida com o sensor BPW.....	80
Figura 47 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{FVIS} (NBR15111) x W_{FVIS}^* (Incandescente) e.....	81
Figura 48 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{FVIS} (NBR15111) x W_{FVIS}^* (Fluorescente) e.....	81

Figura 49 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Simuladora Solar) e	82
Figura 50 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LEDs) e	82
Figura 51 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LED Branco) e	82
Figura 52 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Incandescente) e	83
Figura 53 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Fluorescente) e	83
Figura 54 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Simuladora Solar) e	84
Figura 55 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LEDs) e	84
Figura 56 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LED Branco) e	84
Figura 57 Análise de <i>Bland-Altman</i> para as medidas de transmitância visível, utilizando LED branco o sensor BPW	86
Figura 58 Análise de <i>Bland-Altman</i> para as medidas de transmitância visível, utilizando LED branco o sensor SFH	87
Figura 59 Análise de <i>Bland-Altman</i> utilizando LED vermelho e o sensor BPW	88
Figura 60 Análise de <i>Bland-Altman</i> utilizando LED amarelo e o sensor BPW	89
Figura 61 Análise de <i>Bland-Altman</i> utilizando LED verde e o sensor BPW	89
Figura 62 Análise de <i>Bland-Altman</i> utilizando LED azul e o sensor BPW	90
Figura 63 (a) Comparação entre a transmitância ultravioleta calculada com a norma NBR15111 e a transmitância medida com o sistema. (b) Ampliação da região demarcada em a)	91
Figura 64 Filtros UV em comparação com a W_{fUV} (pontilhada)	92
Figura 65 Dispersão com reta de concordância para transmitância UV utilizando duas lâmpadas fluorescentes (DP = 4,43)	92
Figura 66 Dispersão com reta de concordância para transmitância UV de equipamento desenvolvido anteriormente (DP = 21,3)	93
Figura 67 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_V utilizando regressão polinomial	94
Figura 68 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{verm} utilizando regressão polinomial	94

Figura 69 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{amar} utilizando regressão polinomial.....	95
Figura 70 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{verd} utilizando regressão polinomial	95
Figura 71 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{azul} utilizando regressão polinomial.....	96
Figura 72 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{v} utilizando RNA	97
Figura 73 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{verm} utilizando RNA.....	97
Figura 74 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{amar} utilizando RNA.....	98
Figura 75 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{verd} utilizando RNA	98
Figura 76 Análise de <i>Bland-Altman</i> para τ_{azul} utilizando RNA.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação em categorias e recomendação de uso para óculos de sol em função do grau de escurecimento de suas lentes	37
Tabela 2 Valor das transmitâncias para filtros de proteção solar de uso geral	38
Tabela 3 - Polinômios para cálculo da transmitância com TCS [Adaptada de (BARCELLOS, 2011)].	65
Tabela 4 Distribuição dos óculos testados, por categoria	77
Tabela 5 Coeficientes de Atenuação Q dos óculos testados	77
Tabela 6 Valores erro RMS e GFC de comparação entre W_{fVIS} e W_{fVIS}^* , das Figuras 47 a 56	85
Tabela 7 Valores de Desvio Padrão na comparação entre as transmitâncias calculadas com W_{fVIS} e W_{fVIS}^*	85
Tabela 8 Valores erro RMS e GFC de comparação entre espectros $W_{f-sinal}$ e os LEDs ..	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a.C – Antes de Cristo
- A/D – Analógico/Digital
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CIE – *Commision Internationale de L’eclairage* (Comissão Internacional de Iluminação)
- DP – Desvio Padrão;
- FMRP – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto
- GFC – *Goodness of Fit* (Teste de Aderência)
- I²C – *Inter – Integrated Circuit*
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- ISO – Organização Internacional para Padronização
- IV – Infravermelho
- LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)
- nm – Nanômetro;
- RMS – *Root Mean Square* (Valor Quadrático Médio)
- RNA – Rede Neural Artificial;
- RUV – Radiação Ultravioleta
- u.a. – Unidade Arbitrária
- USB – *Universal Serial Bus* (Barramento Serial Universal)
- USP – Universidade de São Paulo
- UV – Ultravioleta
- W_f – *Weighting Function* (Função de Ponderação)

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – Comprimento de onda;

$\tau(\lambda)$ – Transmitância espectral de um filtro em função do comprimento de onda;

$\tau_F(\lambda)$ – Transmitância espectral dos filtros de proteção solar em função do comprimento de onda;

$\tau_s(\lambda)$ – Transmitância espectral das lentes dos sinalizadores de trânsito (cores: azul, verde, amarelo e vermelho);

τ_M – Transmitância espectral média;

τ_{sinal} – Transmitância luminosa referente à distribuição espectral da luz de sinalização de trânsito;

$\tau_{\text{azul}}, \tau_{\text{verde}}, \tau_{\text{amarelo}}, \tau_{\text{vermelho}}$ – Transmitância semafórica para as luzes azul, verde, amarelo e vermelho, respectivamente;

τ_{SUV} – Transmitância do ultravioleta solar;

τ_V – Transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente ao iluminante-padrão D65 da CIE;

$E_{s\lambda}(\lambda)$ – Intensidade da radiação do sol ao nível do mar e massa de ar 2;

Q – Quociente de atenuação visual relativo;

$S(\lambda)$ – Função de eficácia espectral relativa para radiação ultravioleta;

$S_{A\lambda}(\lambda)$ – Distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão A da CIE;

$S_{D65\lambda}(\lambda)$ – Distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da CIE;

$V(\lambda)$ – Função da visibilidade espectral para a visão com luz diurna;

$W_f(\lambda)$ – *Weighting Function* (Função de Ponderação);

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	ÓCULOS DE SOL	29
1.2	NORMA NBR15111.....	31
1.3	TRANSMITÂNCIA.....	33
1.4	ESPECTROFOTOMETRIA	34
1.5	ENSAIOS DE TRANSMITÂNCIA DA NORMA NBR15111	36
1.5.1	<i>Transmitância visível e categoria de filtros</i>	<i>36</i>
1.5.2	<i>Transmitância do ultravioleta solar</i>	<i>40</i>
1.5.3	<i>Transmitância para luzes semafóricas</i>	<i>43</i>
1.6	OBJETIVOS.....	46
2	METODOLOGIA.....	47
2.1	ESPECTROMETRIA DOS ÓCULOS TESTADOS.....	47
2.2	COMPONENTES	50
2.2.1	<i>Kit KL25Z.....</i>	<i>50</i>
2.2.2	<i>Sensor BPW21R</i>	<i>51</i>
2.2.3	<i>Sensor SFH5711</i>	<i>52</i>
2.2.4	<i>Sensor SG01S-18.....</i>	<i>54</i>
2.2.5	<i>Sensor TCS</i>	<i>55</i>
2.3	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TRANSMITÂNCIA (ANÁLISE TEÓRICA)	58
2.3.1	<i>Análise de Bland-Altman</i>	<i>58</i>
2.3.2	<i>Aproximação espectral.....</i>	<i>61</i>
2.3.3	<i>Regressão Polinomial</i>	<i>65</i>
2.3.4	<i>Redes Neurais Artificiais - RNA.....</i>	<i>67</i>
2.4	PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	69
2.4.1	<i>Mecânica</i>	<i>69</i>
3	RESULTADOS	71
3.1	TERMINAL DE AUTO - ATENDIMENTO.....	71
3.2	INTERFACE COM O USUÁRIO	73
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS	77
3.3.1	<i>Espectrofotometria das lentes.....</i>	<i>77</i>
3.4	TEMPO DE AQUECIMENTO E ESTABILIDADE LUMINOSA.....	79
3.5	TESTE DE CATEGORIA	80
3.5.1	<i>Análise de aproximação espectral visível (W_{VIS})</i>	<i>80</i>
3.5.2	<i>Medidas de transmitância visível</i>	<i>86</i>

3.6	TESTE DE TRANSMITÂNCIA SEMAFÓRICA.....	87
3.6.1	<i>Aproximação espectral para transmitância semafórica.....</i>	87
3.6.2	<i>Medidas de transmitância semafórica</i>	88
3.7	TESTE DE TRANSMITÂNCIA UV	90
3.7.1	<i>Teste em óculos</i>	90
3.7.2	<i>Teste em Filtros UV.....</i>	91
3.8	TESTE DE REGRESSÃO POLINOMIAL.....	93
3.9	TESTE DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	96
4	CONCLUSÃO E DISCUSSÃO	101
4.1	CONCLUSÃO.....	101
4.2	DISCUSSÃO	102
	ESPECTRO DAS LÂMPADAS UTILIZADAS	125

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 ÓCULOS DE SOL

Os chineses usavam lentes coloridas por achar que elas podiam espantar maus espíritos já por volta de 250 a.C., mas foi em 1752 que o uso das lentes tingidas começou a aumentar a fim de reduzir o brilho ofensivo e o ofuscamento da visão causado pelo sol que as lentes não coloridas produziam, e que podiam ser prejudiciais aos olhos (DAIN, 2003). Até 1962, 39 tintas já eram usadas pelos fabricantes de óculos e apenas duas eram fabricadas em lentes de plástico, todo restante era feito em lentes de vidro (SASIENI, 1962). Hoje em dia, a maioria das lentes é feita em plástico, sendo o policarbonato o mais utilizado devido a sua resistência mecânica, alto índice de refração, material leve e resistência ao embassamento (RUBIN, 1986).

No Brasil, os óculos de sol são usados por uma extensa parcela da população, seja pela estética ou pelo conforto visual, e esse uso pode induzir potenciais malefícios caso as lentes não tenham proteção adequada (INMETRO, 2009). Com a estimativa de movimentar 1,6 bilhão de reais por ano em 2007, o comércio informal chega a atingir até um terço do setor. Porém, mesmo a falsa confiança nos óculos de sol originais não parece garantir a segurança com relação à proteção (FISHMAN, 1986; LEOW E THAM, 1995; DONGRE, PAL E KHOPKAR, 2007).

A Nova Zelândia, os Estados Unidos e os países da Europa, foram os primeiros a formatar normas para a regularização das lentes solares (DAIN, 2003). Entre as normas, existem diversos testes, alguns idênticos, outros substancialmente diferentes. Houve certa movimentação para a formatação de uma norma internacional para tornar os testes universais, porém divergências entre interesses nacionais parecem ter falhado com um padrão ISO para lentes solares (DAIN, 2003).

Os óculos de sol podem ser classificados em três grupos: cosméticos (usados como acessórios de moda e com pouca proteção); de uso geral (para reduzir o brilho em ambiente excessivamente claro ou em certas circunstâncias como dirigir durante o dia), e óculos especiais (para atividades como esqui, praia).

Espera-se dos óculos de sol que eles não quebrem em vários pedaços, não sejam inflamáveis, reduzam a luz visível suficientemente para diminuir o desconforto do brilho intenso (incluindo tratamento antirreflexo e lentes polarizadas) e minimizem a dose de radiação nociva (inclui RUV e luz azul) (TUCHINDA, SRIVANNABOON E LIM, 2006). Ainda, os óculos não podem induzir danos secundários, como causar impedimento da visão ou até algum dano, devido ao seu projeto. Observações são feitas para o poder refrativo, poder prismático, transparência, robustez e retenção das lentes, construção, lentes excessivamente escuras para direção, uniformidade e conformidade em pares de lentes e coloração, que mostram os cuidados que as normas abrangem em seus testes (COLE, 2003; DAIN, 2003).

Sobre os potenciais danos ao olho, há ainda controvérsias entre os malefícios e benefícios da RUV, e também sobre os limites seguros para a exposição. Há vários estudos relacionando diversas patologias oculares com a RUV (SLINEY, 1983; TUCHINDA, SRIVANNABOON E LIM, 2006), e em diversos ambientes: no mar (TAYLOR *et al.*, 1988), em voo (JONES *et al.*, 2007), e dirigindo (TUCHINDA, SRIVANNABOON E LIM, 2006). A exposição da pele à RUV também é afetada por diferentes agentes, que inclui os agentes naturais de foto proteção (ozônio, poluentes, nuvens e neblina), agentes naturais biológicos (cromóforos da epiderme); agentes físicos de foto proteção (roupas, bonés, maquiagem, óculos de sol, vidros de janela); e filtros UV (filtros solares e bronzeadores) (KULLAVANIJAYA E LIM, 2005).

A simples escolha sem informação dos óculos de sol e o uso incorreto, podem aumentar consideravelmente os potenciais danos ao olho (ROSENTHAL *et al.*, 1988). Eles podem aumentar a exposição do cristalino e da córnea à RUV por reduzir apenas a intensidade da parte visível do espectro eletromagnético e inibir o mecanismo natural do olho de constrição das pálpebras e das pupilas, enquanto não há a proteção proporcional da RUV (SLINEY, 2011).

1.2 NORMA NBR15111

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normalização técnica no Brasil, e fornece a base necessária ao desenvolvimento tecnológico e tem a função de representar o país perante organismos internacionais (ABNT, 2011). Segundo a ABNT, a normalização é uma “atividade que estabelece, em relação a problemas existentes ou potenciais, prescrições destinadas à utilização comum e repetitiva com vistas à obtenção do grau ótimo de ordem em um dado contexto” (ABNT, 2011), e que tem como objetivos proteger a vida e a saúde humana, proporcionar redução da variedade, aferir a qualidade e facilitar o intercâmbio de produtos.

A primeira norma para óculos de sol de uso geral foi a AS1067 em 1971, na Austrália, e passando por revisões, chegou ao atual estado em 2003 (AS/NZS, 2003); nos Estados Unidos surgiu em 1972, com última atualização em 2010 (ANSI Z80.3:2010); e na Europa deu início em 1974, com atualização de 2005 (EN 1836:2005), (DAIN, 2003). Na Austrália, o interesse na proteção contra a radiação solar afeta o público em geral sobre os riscos de câncer, e esse interesse é devido, em parte, aos requisitos de proteção aos trabalhadores ao ar livre e a forte conscientização já existente sobre a proteção da RUV para o mercado de lazer (GIES *et al.*, 1998); na Nova Zelândia há também fortes programas de conscientização sobre os malefícios da radiação solar (BULLIARD *et al.*, 2001), casos que mostram como a normatização pode levar a informação científica para a comunidade.

A norma brasileira NBR 15111:2013 é baseada na norma europeia EN 1836:1997, e “...estabelece as características físicas (mecânicas, ópticas, etc.) para óculos de sol e filtros de proteção solar com potência nominal nula, que não sejam lentes para óculos corretivos, mas previstos para uso geral na proteção contra radiações solares e também para uso social e doméstico, inclusive no trânsito.”(ABNT, 2013). Esta norma descreve a proteção necessária dos filtros dos óculos de sol em relação à radiação eletromagnética, ponto de interesse deste trabalho.

Os requisitos dos filtros estabelecidos na norma NBR15111 que serão aqui abordados são com relação à transmitância de luz, medidas estas que abrangem a transmissão das radiações eletromagnéticas desde o ultravioleta (UV) ao infravermelho (IV) através das lentes. As medidas de transmitância possibilitam avaliar os requisitos dos óculos de sol com relação à categoria que pertencem, à proteção UV, se são adequados para trafegar e se atrapalham no reconhecimento de luzes semafóricas.

A transmitância é ponto de interesse porque testes para conformidade com a norma ainda não são feitos regularmente, sendo que apenas alguns foram feitos esporadicamente, como pelo Laboratório de Física Oftálmica – FMRP em 1999¹, no caso, pela Profa. Liliane Ventura; e pelo próprio INMETRO, este último por causa de denúncias de entidades representativas quanto à existência de produtos que podiam afetar a saúde pública (INMETRO, 2009). Aparelhos comerciais para medir a proteção ultravioleta em óculos de sol já foram testados e comprovados que não possuem componentes necessários para uma medição precisa (OLIVEIRA, 2009).

Espera-se como produto deste trabalho, um equipamento que seja capaz de medir a transmitância em óculos de sol de acordo com a norma NBR15111, e que possa ser utilizado como uma ferramenta de divulgação sobre os malefícios da radiação e sobre a importância da escolha dos óculos de sol que possuem certificação.

Os próximos itens trazem de forma um pouco mais detalhada os conceitos aqui envolvidos.

¹ <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/oculos2.asp#laboratorio>

1.3 TRANSMITÂNCIA

A transmitância é definida como sendo a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra (um filtro). Pode ser determinada pela Equação 1, na qual I representa a iluminância da onda (medida em W/m^2) após atravessar a amostra e I_0 a iluminância da onda incidente, como ilustra a Figura 1, para um comprimento de onda específico.

$$\tau = \frac{I}{I_0} \quad \tau\% = \frac{I}{I_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

A faixa de valores para a transmitância varia de 0 a 100%, uma vez que a iluminância I é menor que a intensidade de radiação incidente I_0 .

Figura 1 Transmitância em um filtro

A transmitância média de um material em um determinado intervalo do espectro é a média ponderada das transmitâncias para cada comprimento de onda dentro deste intervalo. Quando se trata em medir a transmitância média de um material em função do malefício que se pode causar em um tecido biológico, por exemplo, a transmitância média inclui um fator de ponderação em sua expressão. A Equação 2 mostra o cálculo da transmitância média na região de λ_1 a λ_2 , usando a função de ponderação $W_f(\lambda)$.

$$\tau_M = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_f(\lambda) \cdot W_f(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_f(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Em que:

$\tau_f(\lambda)$ é a transmitância espectral de um filtro em função do comprimento de onda;

$W_f(\lambda)$ é a função de ponderação e

τ_M é o valor da transmitância média do filtro na região entre λ_1 e λ_2 , utilizando a função de ponderação W_f .

Por exemplo, para o caso dos óculos de sol (material a ser testado), o olho humano é o alvo de atenção. Então, o cálculo da transmitância envolve uma função de ponderação $W_f(\lambda)$ que represente tanto a intensidade da radiação incidente no olho quanto a sensibilidade do olho humano a essa radiação, para cada comprimento de onda no intervalo do espectro eletromagnético analisado. Nos próximos tópicos, serão abordadas as diferentes funções de ponderação usadas na norma para o cálculo das transmitâncias.

Pode-se calcular a transmitância espectral dos filtros de proteção solar para cada comprimento de onda, com um espectrofotômetro.

1.4 ESPECTROFOTOMETRIA

O espectrofotômetro é um instrumento de análise que possibilita, entre outras funções, medir a transmissão da luz em um meio translúcido em função de seu comprimento de onda (BURGESS, 2007). Neste trabalho espectrofotômetros são utilizados como a referência (padrão-ouro) para comparações dos resultados com o aparelho desenvolvido, pois são montados para calcular transmitâncias de amostras com grande precisão.

Os espectrofotômetros que o Laboratório de Instrumentação Oftálmica – EESC/USP (LIO) dispõe são: o portátil, USB2000+, UV/VIS, da *Ocean Optics*, que mede no intervalo de 200 – 880 nm com resolução ótica de até 0,3 nm, Figura 2a, e que utiliza uma fibra ótica BIF600-UV/VIS, com 600 μm de diâmetro e banda eficiente em 300 – 800 nm, Figura 2b como caminho ótico de entrada; e o não portátil CARY 5000, UV/VIS/IV, da *Varian*, que permite medidas a passos de até 0,05 nm, entre 175 nm – 3330 nm, e utiliza um sistema de duplo-feixe, um feixe de referência e um para medição, Figura 3.

Figura 2 (a) Espectrofotômetro USB2000+ – Ocean Optics (b) Fibra BIF600-UV/VIS utilizada

Figura 3 Espectrofotômetro CARY 5000 (Varian)

O resultado que o espectrofotômetro apresenta é um gráfico de absorção do material testado por comprimento de onda. Os dados são transferidos para um arquivo de texto de uma lista de N pontos de transmitâncias, valores entre 0 e 100%, em um intervalo entre dois comprimentos de onda (λ_1 a λ_2), com resolução $\Delta\lambda$, sendo N calculado pela Equação 3.

A equação que representa a transmitância média do resultado obtido de uma amostra pelo espectrofotômetro é dada pela Equação 4.

$$N = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

$$\tau_M = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \cdot W_f(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_f(\lambda) \Delta\lambda} \quad (4)$$

As funções de ponderação W_f utilizadas estão apresentadas em tabelas na norma NBR15111, com intervalos de $\Delta\lambda$ de 10 nm, ainda que permita-se interpolações lineares para intervalos menores que 10 nm. Para calcular as transmitâncias médias, foi feita a interpolação linear utilizando $\Delta\lambda = 5$ nm, para os valores tabelados das funções W_f e para as transmitâncias τ_f dos filtros, obtidas com o CARY 5000.

1.5 ENSAIOS DE TRANSMITÂNCIA DA NORMA NBR15111

1.5.1 Transmitância visível e categoria de filtros

Os efeitos fotobiológicos nas estruturas oculares são altamente dependentes da geometria óptica de exposição e das características espectrais da radiação, e por esse motivo o olho evoluiu para se proteger contra a exposição excessiva em ambientes muito claros (ROSENTHAL *et al.*, 1988; SLINEY, 2005). A quantidade de radiação visível percebida pelo olho humano tem papel nesta ferramenta natural de proteção.

A medida de transmitância que abrange a faixa espectral visível é a transmitância luminosa (τ_V). A transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente ao iluminante-padrão D65 da CIE, é definida na Equação 5.

$$\tau_V = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \tau_F(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot S_{D65\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \cdot S_{D65\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

Em que:

$S_{D65\lambda}(\lambda)$ é a distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da CIE (ver ISO/CIE 10526);

$V(\lambda)$ é a função da visibilidade espectral para a visão com luz diurna (ver ISO/CIE 10527) e

$\tau_F(\lambda)$ é a transmitância espectral dos filtros de proteção solar.

Pode-se entender a transmitância luminosa (τ_V) como a média ponderada para cada comprimento de onda da transmitância espectral do filtro (τ_F) dos óculos utilizando a função de ponderação $W_{FVIS}(\lambda)$, onde $W_{FVIS}(\lambda) = V(\lambda) \cdot S_{D65}(\lambda)$. A Figura 4 mostra graficamente a função de ponderação $W_{FVIS}(\lambda)$.

Figura 4 Função de ponderação W_{VIS} (380-780 nm)
(dados encontrados na NBR15111)

Atualmente, devido a grande variedade de tintas e materiais disponíveis, os óculos de sol são divididos em categorias em função do grau de escurecimento de suas lentes (ABNT, 2013), o que facilita o entendimento da população a respeito do uso apropriado de um tipo de lente em função do ambiente em que se está, conforme mostra a Tabela 1. Dain explica que lentes excessivamente escuras são inseguras para dirigir pelo fato de limitar a habilidade do usuário de identificar objetos em sombras, como por exemplo, a entrada de um túnel (DAIN, 2003).

Tabela 1 Classificação em categorias e recomendação de uso para óculos de sol em função do grau de escurecimento de suas lentes

Categoria	Coloração	Uso
0	Transparente	Reduzir a radiação solar (proteção ao vento e sistemas de segurança)
1	Clara	Radiação solar reduzida (conforto, moda)
2	Média	Filtro universal (uso geral)
3	Escura	Radiação solar alta (uso geral)
4	Muito Escura	Radiação solar intensa (neve, areia, montanhas, água)

Fonte: <http://www.eyekit.co/information/lenses/lens-categories-explained.html> (adaptado)

Essas cinco categorias de filtros de proteção solar, de 0 – 4, são referentes ao grau de escurecimento das lentes (porcentagem da transmitância da luz visível entre 380 nm – 780 nm), para as quais cada uma possui uma proteção mínima estabelecida para a RUV. A Tabela 2 apresentada a seguir se encontra na seção 4 da NBR15111/2013 e mostra informações sobre as transmitâncias para as categorias de filtros.

Tabela 2 Valor das transmitâncias para filtros de proteção solar de uso geral

Descrição da Categoria	Categoria dos filtros	Requisitos				
		Intervalo espectral do ultravioleta		Intervalo espectral do visível		Absorção maior do infravermelho ^a
		Valor máximo da transmitância do UVB solar	Valor máximo da transmitância do UVA solar τ_{SUA}	Intervalo da transmitância luminosa		Valor máximo da transmitância do infravermelho solar
		De 280 nm até 315 nm	Acima de 315 nm até 400 nm	De %	Até	
Redução muito limitada da luminosidade	0	0,1 X τ_v	τ_v	80,0	100	τ_v
	1			43,0	80,0	τ_v
	2			18,0	43,0	τ_v
	3		0,5 X τ_v	8,00	18,0	τ_v
Muito alta proteção contra extrema radiação solar (luminosidade)	4			3,00	8,00	τ_v

^a Só se aplica aos filtros de proteção solar recomendados pelo fabricante para proteção contra radiação infravermelha.

[Alterada de: NBR 15111/2013 - Proteção pessoal dos olhos - Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral]

1.5.1.1 Padrão D65 de iluminação - $S_{D65\lambda}(\lambda)$

O padrão iluminante D65, com distribuição espectral $S_{D65\lambda}(\lambda)$, definido pela C.I.E.(Comissão Internacional de Iluminação), corresponde aproximadamente a um sol do meio-dia no Oeste Europeu e no Norte Europeu. A letra D representa *Daylight* (luz do dia), e o padrão correspondente representa a média de ‘luz do dia’ que possui uma temperatura de cor correlacionada de aproximadamente 6500 K. Deve ser utilizado em todos os cálculos colorimétricos que exigem uma iluminação representativa da ‘luz do dia’. A Figura 5 mostra o espectro de uma fonte de luz do padrão D65.

Figura 5 Padrão iluminante D65 (espectro)

Os valores tabelados para cálculos colorimétricos referentes ao padrão D65 podem ser encontrados no *site*² da CIE.

1.5.1.2 Visão fotópica $V(\lambda)$ e escotópica

A visão fotópica é a visão do olho sobre condições de alta iluminação. É representada por uma função que descreve a sensibilidade visual do olho humano para diferentes comprimentos de onda da região visível. A função padrão estabelecida pela CIE, atualizada em 1978, está apresentada na Figura 6.

Figura 6 Função sensibilidade visual do olho humano, curva fotópica (azul) e escotópica (vermelho)

² files.cie.co.at/204.xls

O olho altera sua percepção de cores conforme a luminosidade do ambiente. Devido a essa diferença captada pelo olho humano, foram definidas duas funções de sensibilidade do olho. Para intensidades de luz do dia-a-dia, a resposta do olho humano segue a curva Fotópica e para intensidades baixas de luz, a curva Escotópica. Os dados das curvas utilizadas pela CIE podem ser encontradas no *site*² da CIE.

1.5.2 Transmitância do ultravioleta solar

A proteção contra a RUV em óculos de sol já é lei no Brasil (BRASIL, 2008), e apesar de existir um grande número de artigos sobre os efeitos adversos da RUV e da luz intensa sobre as estruturas oculares, há controvérsias sobre os níveis naturais e artificiais prejudiciais, e então, sobre a quantidade da radiação segura (SLINEY, 2001). Mesmo assim, Davis mostrou que a norma apresenta uma margem de segurança de 10 vezes, baseando-se em critérios aceitos sobre riscos severos de exposição à RUV (DAVIS, 1990)

A transmitância do ultravioleta solar (τ_{SUV}) é definida como o valor médio da transmitância espectral no intervalo de comprimento de onda entre 280 e 400 nm, calculada com a função de ponderação com a intensidade de radiação $E_{s\lambda}(\lambda)$, do Sol ao nível do mar e massa de ar 2, e $S(\lambda)$, função de eficácia espectral relativa para radiação ultravioleta, também conhecida como espectro de ação de eritema.

A função de ponderação completa é dada pela equação $W_{fUV}(\lambda) = E_{s\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda)$, e pode ser vista graficamente na Figura 7. A definição de τ_{SUV} é dada pela Equação 6.

$$\tau_{SUV} = \frac{\int_{280nm}^{400nm} \tau_F(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot E_{s\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_{280nm}^{400nm} S(\lambda) \cdot E_{s\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{280nm}^{400nm} \tau_F(\lambda) \cdot W_{fUV}(\lambda) d\lambda}{\int_{280nm}^{400nm} W_{fUV}(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

**Figura 7 Função de ponderação W_{UV} (280-400 nm)
(dados fornecidos pela NBR15111)**

A transmitância ultravioleta possui limites, de acordo com a transmitância visível das lentes, e os limites máximos para cada categoria podem ser vistos na Tabela 2. A norma ainda define τ_{SUVA} e τ_{SUVB} , utilizando a mesma Equação 6, porém com os limites de 315 a 400 nm para o UVA e de 280 a 315 nm para o UVB. Os testes realizados neste trabalho calculam τ_{SUV} , região de 280 a 400 nm.

1.5.2.1 Intensidade de radiação do Sol para massa de ar 2 – $E_{s\lambda}(\lambda)$

A radiação solar é atenuada ao longo do caminho através da atmosfera de acordo com a Equação 7 (KASTEN E YOUNG, 1989).

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-\alpha_{\lambda} m(\gamma)} \quad (7)$$

Em que:

I_{λ} é a radiação solar monocromática recebida na superfície da terra na altitude solar γ ;

α_{λ} é o coeficiente de extinção monocromático de toda a atmosfera para a incidência vertical ($\gamma = 90$ graus) e

$m(\gamma)$ é a massa de ar relativa para uma altitude solar de γ .

O coeficiente para massa de ar define o quanto a radiação solar atravessa do caminho óptico direto até a superfície terrestre através da atmosfera. Este coeficiente depende do

ângulo zenital e é usado para caracterizar o espectro solar após a radiação solar ter atravessado a atmosfera.

Utilizando as equações em “*Physics of Solar Cells*” (WÜRFEL E WÜRFEL, 2009), pode-se encontrar que a massa de ar é 1 para o ângulo zenital 0° , e a massa de ar é 2 para o ângulo zenital 60° . A massa de ar 2 representa o espectro solar para latitudes como o noroeste europeu, lugar de origem da norma EN1836. A função de ponderação na região UV utiliza o espectro solar ao nível do mar e massa de ar 2, uma simulação de um sol de latitudes correspondentes a localização dos países europeus, Figura 8. Deixa-se a observação para este ponto, uma vez que nosso país possui uma extensão que abrange emissões de radiação UV que podem ser diferentes das esperadas no cálculo da transmitância UV.

Figura 8 Intensidade de radiação $E_{s\lambda}(\lambda)$, do Sol ao nível do mar e massa de ar 2 (dados fornecidos pela NBR15111)

Roy mostrou que os níveis de radiação em latitudes diferentes mudam e que a Austrália possui ambientes com alta exposição à RUV, devido a sua localização, céu relativamente limpo e sem poluição, e com menores índices de ozônio estratosférico (ROY, GIES E TOOMEY, 1995).

Green (GREEN, CROSS E SMITH, 1980) desenvolveu uma expressão matemática envolvendo seis variáveis (comprimento de onda, ângulo Zenith, camada de ozônio, espessura ótica de aerossóis, albedo e altitude) para a irradiação espectral difusa do sol, de onde provém o espectro UV utilizado pela norma.

1.5.2.2 Função de Eficácia Espectral Relativa – $S(\lambda)$

A eficácia da RUV de diferentes comprimentos de onda em produzir o eritema traduz as doses necessárias da RUV para produzir uma vermelhidão minimamente perceptível depois de 8 ou 24 horas de exposição. Essa dose é a mínima dose de eritema (*Minimal Erythema Dose* – MED). O espectro de ação eritêmica foi aceito pela CIE e mostrou prever com acurácia a eficácia de diferentes fontes de luz que diferiam bastante em composição espectral (DIFFEY, 1991).

A Figura 9 apresenta a curva de ação eritêmica da CIE. A observação é de que esta função foi levantada partindo de experimentos na pele. Na NBR15111, é usada como função para estimar o malefício da RUV ao olho.

Figura 9 Função de eficácia espectral relativa – curva eritêmica (dados fornecidos pela NBR15111).

1.5.3 Transmitância para luzes semafóricas

A utilização de lentes solares coloridas durante a direção pode interferir na habilidade de observadores em detectar e reconhecer sinais de trânsito de maneira rápida e segura (CLARK, 1969; DAIN, WOOD E ATCHISON, 2009).

A atenuação para as cores semafóricas é medida, na NBR15111, pelo quociente de atenuação visual relativo (Q), e pode ser calculado como visto na Equação 8:

$$Q = \frac{\tau_{\text{signal}}}{\tau_V} \quad (8)$$

em que τ_{signal} é a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente à distribuição espectral da luz de sinalização de trânsito, visto na Equação 9.

$$\tau_{\text{signal}} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \tau_F(\lambda) \cdot \tau_s(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot S_{A\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \tau_s(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot S_{A\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

• $S_{A\lambda}(\lambda)$ é a distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão A da CIE (ou fonte de radiação de 3.200 K para luz de sinalização azul) (ver ISO/CIE 10526);

• $\tau_s(\lambda)$ é a transmitância espectral das lentes dos sinalizadores de trânsito (cores: azul, verde, amarelo e vermelho);

Dain mostrou que normas de quatro países e duas internacionais possuem testes que variam substancialmente entre si no cálculo da relação da atenuação das luzes de sinalização (DAIN, 1993). Apesar do quociente Q ser contestado para calcular essa relação (PALMER, MELLERIO E CUTLER, 1997), os óculos reprovados nos testes sugeridos por Dain são frequentemente os mesmos entre os diferentes testes (DAIN, 1993).

Assim, se os óculos falharem em cumprir a relação entre os quocientes Q, são considerados inadequados para a direção. Para simplificação, foi definida uma função de ponderação para cada cor do sinalizador de trânsito referido na norma: azul, verde, amarelo e vermelho; resultando em W_{fAZUL} , W_{fVERD} , W_{fAMAR} , W_{fVERM} , respectivamente, de acordo com os filtros. As funções de ponderação para cada cor estão na Figura 10, e as Equações 10 a 13 mostram a transmitância semaforica com as diferentes funções.

$$\tau_{\text{azul}} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_{fAZUL}(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} W_{fAZUL}(\lambda) d\lambda} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{verd}} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_{fVERD}(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} W_{fVERD}(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

$$\tau_{\text{amar}} = \frac{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} \tau_F(\lambda) \cdot W_{fAMAR}(\lambda) d\lambda}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} W_{fAMAR}(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

$$\tau_{verm} = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \tau_F(\lambda) \cdot W_{fVERM}(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} W_{fVERM}(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

Figura 10 Funções de ponderação na região semafórica (vermelho - W_{fVERM} , amarelo - W_{fAMAR} , verde - W_{fVERD} e azul - W_{fAZUL}) (dados fornecidos pela NBR15111)

Para cada cor semafórica existe um quociente de atenuação visual relativo mínimo, e é especificado na norma que o quociente Q dos filtros pertencentes às categorias 0, 1, 2 e 3 para as luzes de sinalização vermelha e amarela não deve ser inferior a 0,80; para a luz de sinalização azul não deve ser inferior a 0,40; e para a luz de sinalização verde não deve ser inferior a 0,60 (NBR 15111/2013). Óculos pertencentes à categoria 4 são imediatamente especificados como não próprios para direção.

1.5.3.1 Padrão A de iluminação - $S_{A\lambda}(\lambda)$

A CIE define o iluminante A para a representação da iluminação com filamento de tungstênio. A distribuição espectral relativa é a de um corpo negro com a temperatura de 2856 K, enquadrando todas as lâmpadas incandescentes com temperatura de cor correlata. Observa-se o teste semafórico utiliza o padrão A de iluminação para lâmpadas incandescentes, e não prevê semáforos com iluminação a LED. A Figura 11 mostra o espectro de uma fonte A, dados retirados do *site*² da CIE.

Figura 11 Padrão iluminante A (espectro)

1.6 OBJETIVOS

A população brasileira é uma consumidora desatenta de óculos de sol, participante de um mercado predominantemente informal e sem a devida regulamentação. A norma NBR15111 propõe métodos para certificação destes produtos, porém ainda não se tornou uma ferramenta ativa de apoio à população. As pessoas ainda não possuem clareza sobre a qualidade dos óculos que compram, e não existem medidores para essa específica função com precisão de confiança. Segundo Davis, a maioria das lentes possui proteção UV, porém falham nos requisitos de transmitância luminosa e semafórica (DAVIS, 1990).

Tendo em vista os ensaios de transmitância realizados pela norma NBR15111, propõem-se algumas metodologias que utilizem componentes simples e resultem na construção de um equipamento que possa fornecer a informação sobre filtros de óculos de sol de forma automática e intuitiva, de acordo com a NBR15111. A medida de transmitância é uma média ponderada, e o equipamento proposto utiliza uma combinação entre fontes de emissão e sensores. No próximo capítulo serão discutidas as metodologias que serão utilizadas para este fim.

CAPÍTULO 2

2 METODOLOGIA

Para medir a transmitância de uma amostra é preciso uma fonte luminosa e de um sensor que transforme essa percepção em um código. Como visto, a medida da transmitância depende uma função de ponderação, função que é diretamente relacionada com a medida feita pelo sensor, dependente da combinação do espectro da fonte de emissão, do padrão de transmissão da luz na amostra e do espectro de sensibilidade do sensor.

A ideia mais simples proposta aqui é a de encontrar uma fonte de iluminação e um sensor com espectros que, em conjunto, se aproximem da função de ponderação utilizada para cada teste proposto da norma, realizando assim diretamente uma medida de transmitância média. Ou ainda, que a combinação ‘fonte + sensor’ forneça o valor da combinação ‘iluminante + sensibilidade’ tabelado na norma.

Também, pode-se perceber a luz transmitida através da amostra como a percepção de uma cor, na qual ao se aplicar um sistema de percepção de cores, utilizando mais de um canal, podem-se traduzir suas medições em um espaço de cor. Existem métodos de transferência de uma cor de um determinado espaço de cor para outro mapa de cor. Assim, a ideia é de utilizar estes métodos de mapeamento de espaços de cor usando os estímulos RGB captados por um sensor para se calcular a transmitância que o olho humano veria, ou seja, utilizar funções que transformam a resposta do sensor em outra resposta para outras funções de ponderação.

Nos tópicos seguintes, serão abordados os componentes utilizados nos testes para a medição das transmitâncias e os métodos propostos para estas medidas.

2.1 ESPECTROMETRIA DOS ÓCULOS TESTADOS

As lentes utilizadas nos experimentos foram testadas de 45 óculos não degradés, não polarizados, e de uso geral, com o espectrofotômetro CARY5000 (Figura 3).

As 45 lentes foram preparadas:

- retirou-se as lentes esquerdas da armação;

- limpeza das lentes com papel apropriado e álcool isopropílico 99,5%, de acordo com o procedimento de limpeza de filtros óticos (INMETRO, 2010);

- marcação do centro geométrico da lente com um adesivo, com grafos feitos com o auxílio de um paquímetro.

Existiu a preocupação de haver variabilidade da transmitância dependente da posição de medição na lente. Segundo a norma NBR15111:

“(...) a diferença relativa de transmitância luminosa entre duas posições quaisquer não pode ser maior do que 10% (com relação ao valor mais alto). (...) Existe uma exceção que é dada para a categoria 4, em que a diferença de transmitância permitida é de 20%.”

Para garantir que a variação da transmitância não interfere nas medidas, a espectrometria foi realizada em 5 pontos diferentes de cada lente. Os pontos foram alterados na ordem sequencial como aparecem a seguir: centro, 5 mm acima, 5 mm abaixo, 5 mm a direita e 5 mm a esquerda, Figura 12.

Figura 12 Pontos de medida para a espectrometria (5 pontos)

A peça utilizada para manter a lente na posição e realizar o deslocamento de 5 mm para cada direção, pode ser vista na Figura 13. Foi projetada baseando-se nas peças usadas pelo próprio equipamento.

Figura 13 Peça desenvolvida como aparato das lentes para deslocamento de 5 mm

Antes de realizar as medidas, são tomadas duas linhas de base: uma sem nenhum obstáculo para o feixe de medição, e outra com o feixe de medição totalmente bloqueado; com as duas peças de suporte posicionadas, uma no feixe de referência e outra no feixe de medição.

Figura 14 Posicionamento das partes mecânicas no espectrofotômetro

Para o posicionamento e alinhamento do centro geométrico da lente no suporte foi feito um conjunto ótico com um *laser pointer* comercial e um disco com um orifício central de 2 mm. Definiu-se o centro do aparato e fixou-se a mira do *laser* neste centro. O alinhamento da lente é então feito manualmente até que o centro da lente coincida com a marcação do *laser*. Depois de alinhada, retira-se a marcação do centro geométrico e novamente é feita a limpeza da lente com álcool.

A análise foi configurada para os intervalos entre 280 – 780 nm, com passo de 5 nm, sendo que o CARY realiza apenas varredura decrescente.

As medidas são exportadas no formato .csv e, juntamente com as tabelas da norma, pós processadas em *Microsoft Excel* e *MATLAB* para o cálculo das transmitâncias. O tempo médio para a realização deste processo para cada lente foi de 77 min/lente, incluindo tempo de

calibração e definição dos parâmetros do espectrofotômetro, alinhamento da lente, medição e tempos intermediários.

2.2 COMPONENTES

A seguir, estão detalhados os componentes e sensores testados para a avaliação teórica e prática para os testes. Os resultados com os componentes utilizados apresentará qual metodologia se aproxima mais da proposta de medição das transmitâncias da norma, e assim, quais os componentes que serão utilizados na prática para a montagem do sistema.

2.2.1 Kit KL25Z

A plataforma de desenvolvimento da *Freescale*, com núcleo ARM Cortex M0, foi usada como ferramenta de *software* e *hardware*, geralmente utilizada para avaliação e desenvolvimento rápido de protótipos com aplicações baseadas em microcontroladores. Esta plataforma inclui acelerômetros, *touch slider* capacitivo, LED tricolor, pinos de entrada e saída compatíveis com *Arduino*, entre outras ferramentas que ajudam no desenvolvimento rápido, vide Figura 15.

Figura 15 Ferramentas do kit KL25Z
[folha de dados do fabricante]

O *kit* funciona como interface de leitura e escrita de dados entre um computador e os sensores óticos. Foi utilizado um compilador *online*, a plataforma em código aberto *MBED*, com suporte para algumas *boards* de microcontroladores *ARM* e ferramentas de

desenvolvimento *online*, além de uma comunidade de desenvolvedores que ajudam coletivamente para tornar mais rápida a criação de protótipos.

2.2.2 Sensor BPW21R

O sensor BPW21R, apresentado na Figura 16a, cujo espectro de sensibilidade está ilustrado na Figura 16b, é um fotodiodo planar de silício (Si), hermeticamente fechado em um invólucro TO-5, desenvolvido para medidas de alta precisão em linearidade [Folha de Dados do componente]. O componente possui também uma janela de vidro liso com correção de cores, o que dá a aproximação da resposta espectral do olho humano. Tem a vantagem de ter uma maior sensibilidade na região vermelho e azul do espectro visível.

Figura 16 (a) Sensor BPW21R e; (b) espectro de sensibilidade do BPW21R.

Para a amplificação de transimpedância do BPW21R, foi usado o amplificador OPA2333, por operar com fonte simples e ter impedância de entrada alta para aplicações com transdutores, ideal para amplificação de fotodiodos. Neste estágio, foi usada a configuração *tee*, de acordo com o esquema encontrado para amplificação de transimpedância de fotodiodos (GRAEME, 1996).

Um segundo estágio foi feito com um filtro *Sallen-Key* de segunda ordem. Este foi projetado como passa-baixas com frequência de corte próxima a 8 Hz, com ganho de aproximadamente -36 dB para 60 Hz.

Na mesma placa, foi colocado um conversor analógico/digital, ADS1110 de 16 *bits* para conversão da tensão de saída dos amplificadores em sinal digital para comunicação com um microcontrolador em interface I²C.

Foi usado o circuito TPS79401 como regulador de tensão, com baixo ruído (32 μV_{RMS}) e alta rejeição de ruído da fonte (60 dB, em 10 kHz).

O esquemático da placa desenvolvida para o sensor BPW está no Apêndice A.

2.2.3 Sensor SFH5711

O sensor de luz ambiente SFH5711, Figura 17a, é um fotodiodo que possui um circuito integrado para amplificação da foto corrente, conversão para escala logarítmica e correção de temperatura. É usado em sistemas onde as condições ambientes de luz devem ser ajustadas como percebidas pelos humanos. Seu espectro de sensibilidade, portanto, é próximo à curva fotópica humana, Figura 17b.

(a)

(b)

Figura 17 (a) Sensor SFH5711 e; (b) espectro de sensibilidade do SFH5711

Este sensor fornece uma corrente analógica de saída que é transformada em tensão por um resistor colocado como carga na saída do sensor. A tensão no resistor R_L , Figura 18, é proporcional ao valor da resistência, e para atingir resolução suficiente em diferentes luminosidades, pode-se ajustar a faixa de operação do sensor utilizando diferentes resistores.

Figura 18 Circuito de amplificação do sensor SFH5711
[folha de dados do componente]

A alimentação também foi feita pelo CI TPS79401 e a conversão pelo ADS1110. O esquemático do circuito está apresentado no Apêndice.

A resposta do sensor é dada pela Equação 14.

$$I_{out} = S * \log_{10}(E_v/E_0) \text{ [A]} \quad (14)$$

No qual $E_0 = 1 \text{ lx}$, e $S = 10 \text{ } \mu\text{A/dec}$.

Usando $V_{out} = I_{out} * R_L$ (Figura 18), e a Equação 14, tem-se:

$$V_{out} = I_{out} * R_L = R_L * S * \log_{10}(E_v/E_0) \text{ [V]} \quad (15)$$

Levando em conta a conversão do ADS1110, e seja OC a contagem de saída para a tensão V_{out} , a equação que traduz OC pode ser calculada como na Equação 16:

$$OC = \frac{-1 * MinCode * PGA * V_{out}}{2,048} = \frac{-1 * MinCode * PGA * R_L * S * \log(E_v/E_0)}{2,048} \quad (16)$$

no qual o MinCode representa o número de *bits* que o ADS1110 consegue utilizar em determinada velocidade, PGA é o amplificador de ganho programável e 2,048 o valor de referência que o conversor utiliza para basear a conversão.

Isolando E_v/E_0 :

$$\frac{E_v}{E_0} = 10^{\left(\frac{OC*2,048}{-1*MinCode*PGA*R_L*S}\right)} \quad (17)$$

Sendo E_{vb} a iluminância percebida pelo sensor como linha de base, e E_{vm} a iluminância no sensor após se colocar a lente no equipamento, a transmitância calculada com o sensor SFH pode ser finalmente calculada com a Equação 18:

$$\tau = 100 * E_{vm}/E_{vb} = 100 * 10^{\left(\frac{2,048*(OC_2-OC_1)}{-1*MinCode*PGA*R_L*S}\right)}(\%) \quad (18)$$

Com as opções padrão do ADS1110, MinCode = -32768 (15 *bits*, pois 1 bit representa a variação negativa) e PGA = 1, $R_L = 10,1 \text{ k}\Omega$, e $S = 10 \text{ }\mu\text{A/dec}$, tem-se:

$$\tau = 100 * 10^{\left(\frac{(OC_2-OC_1)}{4815,9}\right)}(\%) \quad (19)$$

2.2.4 Sensor SG01S-18

O sensor SG01S-18 é um fotodiodo projetado para medidas UV sem interferência de luz visível. Possui espectro de sensibilidade em toda a faixa UV (UVA+UVB+UVC), como visto na Figura 19. O baixo ruído do sensor proporciona medidas precisas de baixas intensidades da radiação UV.

Figura 19 Curva de resposta do sensor SG01S-18, em comparação com a curva eritêmica $S(\lambda)$ [adaptado da folha de dados do fabricante]

A amplificação deste sensor se deu de maneira análoga ao sensor BPW, apenas com ajustes de ganho diferentes. O circuito pode ser visto no Apêndice B.

2.2.5 Sensor TCS

As curvas de resposta de sensores eletrônicos são, na maioria, diferentes das curvas de sensibilidade dos observadores-padrão da CIE. Porém existem metodologias de mapeamento de espaços de cor utilizando sensores com mais de um canal de resposta para cada região do espectro que permitem expandir a utilização destes sensores para diferentes propósitos (BARCELLOS, 2011).

O TCS3771 é um sensor de luz de quatro canais, que faz a conversão direta de luz para um sinal digital (comunicação I²C). Ele é composto por um arranjo 4x4 de fotodiodos (4 fotodiodos para cada canal: azul, verde, vermelho e sem filtros), com amplificadores e conversores A/D integrados, e resolução de 16 *bits*, ou seja, 65536 contagens. A Figura 20 ilustra o encapsulamento do sensor TCS3771, enquanto a Figura 21 apresenta o espectro de resposta para cada canal do sensor TCS3771, e mostra a diferença de sensibilidade de cada canal nas regiões azul, verde e vermelho.

Figura 20 Encapsulamento do sensor TCS3771
[folha de dados do componente]

Figura 21 Curva de resposta do TCS3771 (u.a. – unidades arbitrárias)
[folha de dados do componente]

A resposta do sensor TCS para cada canal possui um valor análogo em triestímulo visual humano, o que possibilita uma combinação dessas funções para se obter diferentes mapeamentos. Seja X, Y e Z, as respostas em *bits* do sensor para os canais vermelho, verde e azul, respectivamente, e $TCS_{verm}(\lambda)$, $TCS_{verd}(\lambda)$ e $TCS_{azul}(\lambda)$ as funções de sensibilidade do sensor em função do comprimento de onda para os canais correspondentes (como na Figura 21). As respostas obtidas para cada canal do sensor podem ser calculadas como nas Equações 20, 21 e 22:

$$X = k \cdot \frac{\int \tau(\lambda) \cdot TCS_{verm}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda}{\int TCS_{verm}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda} \quad (20)$$

$$Y = k \cdot \frac{\int \tau(\lambda) \cdot TCS_{verd}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda}{\int TCS_{verd}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda} \quad (21)$$

$$Z = k \cdot \frac{\int \tau(\lambda) \cdot TCS_{azul}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda}{\int TCS_{azul}(\lambda) \cdot L(\lambda) d\lambda} \quad (22)$$

no qual $L(\lambda)$ representa o espectro da fonte de emissão utilizada, opcionalmente com algum filtro e k é a constante de conversão da foto corrente dos sensores em valor digital em *bits*. Esta constante é tipicamente 28 contagens a cada $\mu W/cm^2$ de intensidade luminosa para o canal verde, 24 para o canal azul e 34 para o canal vermelho.

Para os testes que utilizaram lâmpadas foi utilizado um filtro infravermelho, em conjunto com o sensor, de 20 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura, fabricado no Instituto de Física da USP, pela alta emissão de radiação IV. O filtro IV possui banda passante de 330 a 680 nm, apresentada na Figura 22.

Figura 22 Curva de transmissão do filtro infravermelho usado, comparada com a função de ponderação visível

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TRANSMITÂNCIA (ANÁLISE TEÓRICA)

A seguir foram detalhados os métodos usados para a obtenção da transmitância. Os resultados de transmitância calculados e medidos nos testes serão comparados com as transmitâncias obtidas com o espectrofotômetro.

Como parâmetro de comparação entre os métodos, foi observado o seguinte parágrafo da norma:

“No caso de o fabricante do filtro declarar valor para a transmitância luminosa, o limite de desvio desse valor deve ser de $\pm 3\%$ (absoluto) para as classes de 0 a 3 e de $\pm 30\%$ relativo ao valor da transmitância, para a classe 4.”

Com isto, estabeleceu-se o limite de $\pm 3\%$ (absoluto) para as classes de 0 a 3 e de $\pm 30\%$ relativo ao valor da transmitância, para a classe 4, como regra de projeto para os testes realizados e para o equipamento a ser desenvolvido. Este limite se apresenta nos resultados como linhas vermelhas.

A análise estatística de concordância entre métodos de *Bland-Altman* foi utilizada para comparação entre dois métodos designados para medir um mesmo parâmetro, ou seja, para comparação entre dois equipamentos. Esta análise será feita entre o protótipo e as medidas obtidas com o espectrofotômetro.

2.3.1 Análise de *Bland-Altman*

A análise de correlação entre as medidas de transmitância entre as metodologias propostas e as medidas espectrométricas não é suficiente, pois o coeficiente de correlação não avalia concordância, mas a associação entre medidas. Bland e Altman propuseram o método em 1983 para comparar dois métodos usados para medir um mesmo parâmetro (HIRAKATA E CAMEY, 2010).

Conforme Hirakata: “a metodologia avalia a concordância entre duas variáveis (X e Y) parte de uma visualização gráfica a partir de um gráfico de dispersão entre a diferença das duas variáveis ($X - Y$) e a média das duas ($(X + Y)/2$ ”.

A primeira análise é um gráfico de dispersão entre as duas medidas, com a reta diagonal de concordância (reta ideal). Como exemplo, tomou-se X e Y como variáveis, cada uma com 45 pontos distribuídos entre 0 e 100, com um erro entre si seguindo uma distribuição

Gaussiana com média zero e desvio padrão 1. Analogamente, tomou-se W e Z variáveis, porém, com o erro entre elas com distribuição gaussiana com média zero e desvio padrão 5. A Figura 23, mostra a dispersão entre X e Y e a Figura 24 mostra a dispersão entre W e Z.

Figura 23 Exemplo de análise de dispersão de Bland-Altman entre variáveis X e Y

Figura 24 Exemplo de análise de dispersão de Bland-Altman entre variáveis W e Z

Avalia-se, então, a diferença entre as variáveis. É possível calcular o viés ($\bar{d}$) e o seu desvio padrão (s_d), e chegar aos limites de concordância: $\bar{d} \pm 1,96 s_d$, vistos nos gráficos como linhas vermelhas. A Figura 25 e a Figura 26 mostram os gráficos da diferença entre as variáveis com os valores de viés e limites de concordância.

Figura 25 Exemplo da análise dos limites de concordância de Bland-Altman entre variáveis X e Y

Figura 26 Exemplo da análise dos limites de concordância de Bland-Altman entre variáveis W e Z

Os gráficos permitem concluir que X e Y apresentam boa concordância por ter viés próximo de zero e os limites de concordância entre X e Y sendo entre -2,23 e 2,29 mostrando as diferenças entre os métodos, enquanto que para as variáveis W e Z o viés é 1,03 e os limites de concordância entre W e Z são -7,89 e 9,94.

2.3.2 Aproximação espectral

O primeiro método consiste em buscar um espectro com uma combinação de fonte de iluminação e resposta de sensores que se aproxime das funções de ponderação usadas para o cálculo das transmitâncias na norma NBR15111. Definiram-se as funções de ponderação da norma de W_f e a curva de emissão de uma fonte luminosa em conjunto com a curva de resposta do sensor de função ponderação alternativa W_f^* . A Figura 27 apresenta um exemplo de funções de ponderação que se aproximam.

Figura 27 Exemplo de funções de próximas ($W_{TVIS}(\lambda) \times V(\lambda)$)

Para a comparação quantitativa dos espectros W_f e W_f^* , utilizou-se de dois métodos para avaliar a aproximação entre as funções:

- 1) Cálculo do erro quadrático médio (“root mean square error” – erro RMS) usado amplamente em estudos (IMAI *et al.*, 2002), está apresentada na Equação 23.

$$Erro\ RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}(\lambda)_i - y(\lambda)_i)^2}{n}} \quad (23)$$

Onde $\hat{y}(\lambda)$ corresponde à medida da função de ponderação da norma no comprimento de onda λ , $y(\lambda)$ a medida do espectro a ser avaliado no comprimento de onda λ e n o número de pontos analisados. O resultado desse cálculo será zero para uma combinação espectral perfeita.

- 2) Determinação do coeficiente de aderência (“goodness-of-fit coefficient” – GFC) é um teste proposto (HERNANDEZ-ANDRES, ROMERO E LEE, 2001) baseado na inequação de Schwartz, descrita pela Equação 24.

$$GFC = \frac{|\sum_j R_m(\lambda_j) R_e(\lambda_j)|}{\sqrt{|\sum_j [R_m(\lambda_j)]^2|} \sqrt{|\sum_j [R_e(\lambda_j)]^2|}} \quad (24)$$

Em que $R_m(\lambda)$ e $R_e(\lambda)$ são, respectivamente, as medidas dos espectros, da norma e avaliado. Se $R_e(\lambda) = R_m(\lambda)$, $GFC = 1$.

Os dois métodos serão utilizados como medidas de comparação da aproximação entre o espectro da W_f da norma e o espectro W_f^* obtido com fontes de iluminação e sensores.

2.3.2.1 Aproximação espectral para transmitância visível

Para os testes de categoria, a função de ponderação alternativa W_{VIS}^* foi calculada teoricamente utilizando os espectros obtidos dos conjuntos: fonte de luz, filtro solar, filtro IV e sensor, seguindo a Equação 4. Como fontes de iluminação, testou-se uma lâmpada incandescente (*Cool Blue* da *OSRAM*), uma fluorescente (T8 da *Philips*), uma simuladora solar (*UltraVitaLux* da *OSRAM*), um conjunto de LEDs e um LED branco (*Golden Dragon* da *OSRAM*), obtendo os espectros de emissão com o espectrofotômetro *USB2000+*. Os espectros de emissão das lâmpadas podem ser encontrados no Apêndice C. Os LEDs usados para este primeiro teste são LEDs de diferentes cores comerciais com valores de emissão de $527 \text{ nm} \pm 7 \text{ nm}$ (verde-azulado), $555 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ (verde), $585 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ (amarelo), e $624 \text{ nm} \pm 6 \text{ nm}$ (vermelho), e o LED branco utilizado com a curva apresentada na Figura 28.

Figura 28 Espectro do LED Branco usado para os testes

Para se testar a função obtida W_{fVIS}^* no cálculo da transmitância τ_V^* , foram usados apenas os espectros de 60 filtros para confirmar os métodos RMS e GFC. Estes 60 espectros pertencem a lentes que foram descartadas para medidas no protótipo por possuírem alguma alteração que prejudicasse os resultados (como lentes muito riscadas e óculos degradê). Porém são aqui usadas, pois o teste utiliza apenas os espectros para análise.

2.3.2.2 Aproximação espectral para transmitância semafórica

O teste semafórico propõe testar LEDs como fontes de emissão para aproximar as funções de ponderação para a região semafórica. Foram adquiridos LEDs com picos de emissão coincidentes com as funções de ponderação semafórica, 500 nm (para o azul), 530 nm (para o verde), 580 nm (para o amarelo), 610 nm (para o vermelho), como mostra a Figura 29, comparando as duas curvas. A Figura 29 também mostra a comparação entre o espectro de emissão dos LEDs e as funções de ponderação da NBR15111 para o cálculo da transmitância semafórica. Os espectros dos LEDs foram obtidos com o espectrofotômetro *USB2000+*.

Figura 29 Comparação entre as curvas de ponderação semafóricas (W_{fVERM} , W_{fAMAR} , W_{fAZUL} , W_{fVERD}) com a curva de emissão dos LEDs testados

O controle de corrente dos LEDs foi feito com o circuito integrado CAT4008, um *driver* de corrente constante de 8 canais. A placa foi montada com dois LEDs de cada cor, como visto no Apêndice D.

2.3.2.3 Aproximação espectral para transmitância UV

O teste de transmitância UV nas lentes deve ser feito no intervalo entre 280 a 400 nm, e para tal foi feita uma associação de duas lâmpadas fluorescentes, uma UVA e outra UVB, modelos Actinic BL 6W/10 (UVA) e PL-S 9W/01/2P (UVB). Os espectros das lâmpadas podem ser vistos no Apêndice E. Investigou-se a utilização de duas lâmpadas para cobrir toda a região do UV pois um equipamento já montado no LIO utilizava apenas a lâmpada UVA. Nos resultados, foram apresentadas as medidas do protótipo construído (lâmpadas UVA e UVB) e as medidas do equipamento montado anteriormente no LIO (lâmpada UVA).

Também foram usados dois sensores SG01, um como feixe referência e outro como medidor das amostras. É utilizado o método com sensor de referência devido às flutuações das lâmpadas fluorescentes.

Os espectros das lâmpadas foram obtidos com o espectrofotômetro *USB2000+*. A combinação do espectro de emissão das lâmpadas, multiplicado pela função de sensibilidade do sensor, foi comparada a função de ponderação UV - W_{fUV} , Figura 30.

Percebe-se visualmente uma boa aproximação entre as duas curvas. Em resultados, se encontra os valores de erro RMS e GFC para esta aproximação.

Figura 30 Comparação entre a curva de ponderação ultravioleta com combinação das lâmpadas e sensor UV

2.3.3 Regressão Polinomial

Outra abordagem testada neste trabalho se baseia no trabalho de Barcellos, utilizando diferentes técnicas de mapeamento de triestímulo (KANG, 2006; BARCELLOS, 2011).

Um dos métodos que podem ser usados para aproximar a função de ponderação em outra é a técnica de mapeamento de cores usando a regressão polinomial. O método pressupõe que uma equação polinomial pode ser escolhida para fazer o mapeamento da transmitância, no qual cada termo do polinômio é constituído pelo produto de um coeficiente por uma variável independente, ou um produto destas variáveis.

Essa correlação entre espaços de cores pode ser aproximada por um conjunto de equações simultâneas. A regressão é usada para derivação dos coeficientes desta equação, uma vez conhecidas as especificações tanto nos espaços de origem como de destino, e a única exigência é que o número de termos do polinômio para o mapeamento dos espaços de cor deve ser tal que o número de variáveis desconhecidas não seja maior do que o número de pontos para os quais o mapeamento é conhecido. Exemplos de polinômios com três variáveis independentes são dados na Tabela 3.

Tabela 3 - Polinômios para cálculo da transmitância com TCS [Adaptada de (BARCELLOS, 2011)].

Nº de	Polinômio
-------	-----------

Termos	
3	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z$
4	$P(X, Y, Z) = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z$
6	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ$
8	$P(X, Y, Z) = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8XYZ$
9	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2$
11	$P(X, Y, Z) = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ$
14	$P(X, Y, Z) = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}X^3 + c_{13}Y^3 + c_{14}Z^3$
20	$P(X, Y, Z) = c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 + c_{11}XYZ + c_{12}X^3 + c_{13}Y^3 + c_{14}Z^3 + c_{15}XY^2 + c_{16}XZ^2 + c_{17}YZ^2 + c_{18}YX^2 + c_{19}ZX^2 + c_{20}ZY^2$

Assim, com os valores das transmitâncias calculadas com o CARY5000 e os valores calculados com o sensor TCS para algumas lentes, o método consiste em obter um polinômio que faça a relação entre estes valores. Pretende-se achar os coeficientes de um polinômio para cada transmitância, obtendo uma equação que mapeie os valores X, Y e Z, obtidos com o sensor TCS, nas transmitâncias visível e semafórica. Escolheu-se a regressão linear com 20 variáveis, vista na Equação 25:

$$\tau_i(q) = c_1q_{1,i} + c_2q_{2,i} + \dots + c_{20}q_{20,i} \quad (25)$$

ou na forma vetorial, Equação 26:

$$\tau_i = \mathbf{Q}_i^T \mathbf{C} = \mathbf{C}^T \mathbf{Q}_i \quad (26)$$

Em que:

$\mathbf{C}$ é o vetor correspondente aos coeficientes do polinômio, 20x1 e

$\mathbf{Q}_i$ é a matriz com as variáveis independentes, ou a multiplicação das variáveis, 20x1. Os valores q são derivados das entradas X, Y e Z.

Para o cálculo dos coeficientes, é necessário pelo menos 20 amostras de transmitância. Seja k o número de amostras ($k > 20$) para a regressão, a Equação 27 mostra a expressão explícita na notação matricial.

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \vdots \\ \tau_k \end{bmatrix}_{k,1} = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{2,1} & q_{3,1} & \cdots & q_{20,1} \\ q_{1,2} & q_{2,2} & q_{3,2} & \cdots & q_{20,2} \\ q_{1,3} & q_{2,3} & q_{3,3} & \cdots & q_{20,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1,k} & q_{2,k} & q_{3,k} & \cdots & q_{20,k} \end{bmatrix}_{k,20} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_{20} \end{bmatrix}_{20,1} \quad \text{ou} \quad \mathbf{T} = \mathbf{Q}^T \mathbf{C} \quad (27)$$

Em que T é o vetor com k elementos com as transmitâncias das k amostras para regressão.

O método usa a aproximação de mínimos quadrados, minimizando a soma do quadrado da diferença entre os valores estimados e medidos. A matriz C finalmente pode ser calculada com a Equação 28.

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T)^{-1}(\mathbf{Q}\mathbf{T}) \quad (28)$$

O polinômio final com os coeficientes calculados pode então ser expresso pela Equação 29.

$$\begin{aligned} \tau(X, Y, Z) = & c_1 + c_2X + c_3Y + c_4Z + c_5XY + c_6XZ + c_7YZ + c_8X^2 + c_9Y^2 + c_{10}Z^2 \\ & + c_{11}XYZ + c_{12}X^3 + c_{13}Y^3 + c_{14}Z^3 + c_{15}XY^2 + c_{16}XZ^2 + c_{17}YZ^2 + c_{18}YX^2 \\ & + c_{19}ZX^2 + c_{20}ZY^2 \end{aligned} \quad (29)$$

2.3.4 Redes Neurais Artificiais - RNA

Na abordagem de Barcellos no mapeamento de espaços de cor, também propõe-se a utilização de redes neurais artificiais especializadas para mapear os valores obtidos com o sensor TCS nos valores de transmitância reais. Este tipo de metodologia foi indicada por ser popular, com aplicações em diversas áreas, aplicação em modelos não-lineares, robusta, adaptável e de fácil utilização. Exemplos de problemas que utilizam redes neurais para aproximações de ajuste de funções não lineares são diversos: estimação de preços imobiliários comparados à inflação, estimação dos níveis de emissão de motores baseados em medidas de consumo de combustível e velocidade de rotação, ou até prevendo a gordura corporal de um paciente baseado em medidas corporais.

Seguindo o trabalho de Barcellos, escolheu-se usar uma rede do tipo MLP (*Multi-Layer Perceptron*) com três entradas (X, Y e Z do sensor TCS), uma camada escondida, com 10 neurônios, e uma camada de saída, rede apresentada como visto na Figura 31.

Figura 31 Diagrama de blocos de uma rede *tansig/purelin* com duas camadas

Foi usada a *toolbox* de Redes Neurais do *MATLAB*, utilizando a *Neural Network Fitting Tool (nftool)*, uma ferramenta de auxílio para selecionar dados, criar e treinar uma RNA, e avaliar sua atuação. Esta ferramenta utiliza o algoritmo *Levenberg-Marquardt* para treinamento da rede.

Os dados de entrada utilizados para o treinamento da rede foram adquiridos testando as 45 lentes, que passaram pela espectrofotometria, com o sensor TCS e o LED branco. Assim, para cada lente tem-se as transmitâncias τ_V , τ_{verm} , τ_{amar} , τ_{verd} e τ_{azul} , obtidas com o CARY5000, e os valores X, Y e Z, obtidos com a medida com o sensor TCS e o LED branco. Para cada um, dos cinco testes, treinou-se uma RNA que utiliza os dados de entrada para calcular a respectiva transmitância.

2.4 PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

O equipamento proposto é baseado no *layout* dos totens de auto-atendimento espalhados em aeroportos, rodoviárias, feiras de exposição, para medidas de categoria, semafórica e proteção ultravioleta em óculos de sol. Já existe um equipamento com tal abordagem no campus da USP em São Carlos, para análise da proteção UV e de categoria, desenvolvido por nós, porém o equipamento não possui uma análise da exatidão das combinações entre fontes de luz e sensores que utiliza. Também não possui análise para o UVB e semafórica. Apenas de categoria e de transmitância UVA.

Para que o equipamento fique disponível para o público e que seja capaz de medir a transmitância em óculos de sol de acordo com a norma NBR15111, para ser utilizado como uma ferramenta de divulgação, os testes pretendem mostrar as viabilidades teórica e prática de se medir a transmitância em óculos de sol.

2.4.1 Mecânica

O sistema opto-mecânico é crucial para a realização das medidas, pois além do alinhamento e fixação dos componentes opto-eletrônicos que deve ser feito de maneira que não se altere as medidas de base quando os óculos são colocados para teste, também deve possuir um sítio intuitivo e seguro para os óculos, uma vez que qualquer pessoa sem qualquer treinamento possa utilizá-lo. Uma solução que torna o sistema intuitivo é um corte do rosto de um manequim fixado em uma tampa móvel, deixando a parte ótica das lâmpadas e sensores fixa.

Figura 32 Exemplo de corte em cabeça de manequim para apoio dos óculos entre os feixes óticos.

(a)

(b)

Figura 33 Projeto Opto-mecânico para realização das medidas

A caixa da Figura 33b foi desenvolvida para abrigar e dispor os componentes optoeletrônicos envolvidos nas medidas.

Em detalhes, a Figura 33a mostra em A, o sensor UV de referência, concêntrico ao sensor UV de medição localizado na peça G.

Em B, um gabinete de *nylon* preto, Figura 34, foi projetado para evitar o espalhamento da radiação UV e para a fixação das lâmpadas (ponto C) centralizadas com o sensor. As fontes UV foram alinhadas de maneira ortogonal de ambos os sensores.

Figura 34 Gabinete construído para fixação das lâmpadas.

Em D, podem-se ver os óculos de sol apoiados no manequim (ponto E) fixado na tampa (ponto F). Em H, em posição simétrica para avaliação da lente oposta dos óculos, foram colocadas as fontes de luz visível e semafórica.

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS

3.1 TERMINAL DE AUTO - ATENDIMENTO

O Laboratório de Instrumentação Oftálmica – EESC/USP observou que, aliado a uma carência de informação da sociedade sobre os malefícios que os óculos de sol podem causar e sobre a seriedade destes danos, não há no país um sistema para usuários leigos para medidas de transmitância em óculos de sol, com precisão adequada, que possa proporcionar a um usuário o conhecimento da categoria de seus óculos, respectiva proteção ultravioleta e medidas semafóricas. A única forma até 2010 de se medir estes itens era solicitar a um profissional especializado e que conhecesse as normas com propriedade para realizar a espectrofotometria e que soubesse realizar os cálculos necessários para fornecer os resultados. Em 2010, foi lançado pelo LIO o primeiro protótipo nacional para medidas de categorias de lentes solares e proteção UVA. Neste trabalho, além de medir o que o outro já proporciona, ainda adiciona as medidas de UVB e semafóricas, com melhoras na eletrônica e nos projetos mecânico e ótico.

Assim, a meta deste protótipo é disponibilizá-lo para uso público no campus da USP de São Carlos, proporcionando conscientização e extensão dos estudos em relação aos óculos solares, de forma a contribuir mais efetivamente com a população brasileira.

O equipamento proposto é baseado no *layout* dos totens de auto-atendimento espalhados em aeroportos, rodoviárias, feiras de exposição, e outros tantos vistos espalhados pelos lugares públicos. A Figura 35 mostra o *display* comercial adquirido para abrigar a interface do usuário com o equipamento.

Figura 35 *Display comercial da Videosoft para abrigar a interface com o usuário do protótipo de auto-atendimento para medição de transmitância em óculos de sol*

Como exposto, uma primeira versão já foi realizada deste totem, com apenas uma lâmpada na região UVA e conjunto de LEDs para medida da categoria. Para este novo equipamento, medidas de UVA, UVB, categoria de lentes e medidas semafóricas são o diferencial, e utiliza a metodologia do estudo desenvolvido. O diagrama de blocos do equipamento está ilustrado na Figura 36.

Figura 36 *Sistema proposto para medição da transmitância em óculos de sol*

Este equipamento não tem a intenção de fornecer medidas de certificação, mas parâmetros que correspondam aos requisitos da certificação. Não se pretende fornecer medidas espectrofotométricas, mas medidas de transmissão que possam estar dentro da mínima precisão exigida pela norma brasileira NBR15111:2013, proporcionando ao usuário condições de ter o conhecimento se seus óculos de sol estão protegidos contra os raios ultravioletas; a categoria a que eles pertencem e se estão apropriados para dirigir.

Foi feito um projeto mecânico para abrigar a parte ótica e eletrônica do protótipo e acoplá-la ao *display* da Figura 35. A foto do sistema completo está apresentado na Figura 37.

Figura 37 Totem desenvolvido. Vista frontal e do protótipo com a parte ótica e eletrônica

3.2 INTERFACE COM O USUÁRIO

Para que o usuário leigo possa testar os seus óculos e entender o resultado, projetamos um programa interativo, através de solicitações pelo monitor *touch-screen*. O *design* das telas de interface foi feito pela *designer* e Arquiteta Anelise Ventura e implementadas e programadas pelo João Paulo Casati, técnico do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP.

O programa possui uma tela inicial com movimento, chamando atenção para a proteção ultravioleta dos óculos de sol,

Figura 38 Tela inicial do programa de interface com o usuário

Após o início da navegação no programa, o usuário é avisado que o equipamento testa apenas óculos de sol sem grau, pois a norma NBR15111 não prevê os testes para óculos corretivos mas apenas para óculos de sol.

Figura 39 Tela de aviso do programa de interface com o usuário

Em seguida, a página principal, Figura 40, fornece atalhos para todas as telas do programa. São cinco telas: a de início do teste, a de resultados, a de enquete e pesquisa sobre óculos de sol, a de informações sobre a norma brasileira e os testes e a aba com o grupo de desenvolvedores. Apenas a aba de resultados fica indisponível enquanto o teste não foi realizado. O programa do equipamento anterior proporcionava uma rotina de navegação sempre sequencial, enquanto que este novo programa dá a opção do usuário de escolher a navegação que lhe convém.

Figura 40 Tela ‘Principal’ do programa de interface com o usuário

A tela de Resultado, Figura 41, apresenta as informações testadas dos óculos inseridos no equipamento, da categoria, proteção ultravioleta e teste semafórico. Esta aba só é habilitada quando é realizado o teste primeiro.

Figura 41 Tela ‘Resultado’ do programa de interface com o usuário

A tela Sobre Você, Figura 42, é uma enquete que proporciona o retorno de informações do público para futuras pesquisas na área. Tem a intenção de verificar o perfil de óculos de sol do mercado, o grau de informação do público sobre os malefícios do mau uso do óculos de sol, e a satisfação sobre o equipamento disponibilizado.

ÓCULOS DE SOL	RESULTADO	SOBRE VOCÊ	INFORMAÇÕES	EQUIPE
mais sobre você concluir >	01. Qual a sua faixa etária?	☐ 0 a 17 ☐ 18 a 25 ☐ 26 a 40 ☐ mais de 40		
	02. Qual o seu sexo?	☐ F ☐ M	03. Tipo de seus óculos testados	☐ degradê ☐ polarizado ☐ foto sensível ☐ nenhum dos anteriores
	04. Qual ou quais dos seguintes aspectos o atraem quando você compra um óculos de sol?	☐ preço ☐ marca ☐ design ☐ certificação ☐ proteção UV ☐ indicado para dirigir		
	05. Você tinha conhecimento dos danos que o UV pode causar aos olhos?	☐ sim, profundamente ☐ sim, um pouco ☐ sim, mas nunca me interessei ☐ não		
	06. Antes do uso deste equipamento, você tinha conhecimento, que a utilização de óculos de sol, sem proteção UV, poderia causar danos aos olhos?	☐ sim, profundamente ☐ sim, um pouco ☐ sim, mas nunca me interessei ☐ não		
	07. Você gostaria de poder testar a proteção UV dos óculos de sol antes de adquiri-los?	☐ sim, profundamente ☐ sim, um pouco ☐ talvez ☐ não		
	08. Qual a sua opinião sobre um Medidor de Proteção Ultravioleta para óculos de sol?	☐ muito interessante ☐ interessante ☐ neutro ☐ pouco interessante ☐ nada interessante		
	09. Como você avalia a facilidade de uso deste equipamento que você testou seus óculos de sol?	☐ muito fácil ☐ fácil ☐ regular ☐ difícil ☐ muito difícil		
	10. Como você classificaria as informações fornecidas deste equipamento?	☐ ótimas ☐ muito boas ☐ boas ☐ regulares ☐ ruins		

Figura 42 Tela ‘Sobre Você’ do programa de interface com o usuário

A tela Informações, Figura 43, contém um breve resumo sobre o que consiste cada teste feito pelo equipamento, e como interpretar seu resultado.

ÓCULOS DE SOL	RESULTADO	SOBRE VOCÊ	INFORMAÇÕES	EQUIPE
categoria	proteção UV	posso dirigir?		
<p>O olho se altera quando colocamos os óculos de sol, dilatando mais ou menos a pupila. A variação da pupila varia com a categoria dos óculos (quão escuro eles são).</p> <p>A categoria dos óculos de sol determina então a proteção contra luz intensa e claros. O excesso de luz pode ofuscar a visão.</p> <p>Os óculos se encaixam em uma categoria dependendo da quantidade de luz visível que passa em suas lentes.</p> <p>Saber a categoria dos seus óculos ajuda a identificar a melhor utilização dos óculos, dependendo da atividade: esportes na areia, grama, água, com bolas (indiretamente olhar para o sol), trabalho com exposição solar excessiva, ou óculos apenas estéticos.</p>				
<p>CATEGORIA 0 CATEGORIA 1 CATEGORIA 2 CATEGORIA 3 CATEGORIA 4</p> <p>0 1 2 3 4</p> <p>100 - 80 - 43 - 18 - 8 - 3 (%) Oxi. de luz</p> <p>☁ ☁☀ ☀ ☀☀ ☀☀☀</p> <p>🌳 🌳 🌳 🌳 🌳</p> <p>🚫</p>				

Figura 43 Tela ‘Informações’ do programa de interface com o usuário

A tela Equipe, Figura 44, apresenta todos que de alguma forma ajudaram no projeto, uma forma de dar visibilidade ao laboratório pelo projeto e agradecer os apoios.

TESTES DE ÓCULOS DE SOL	RESULTADO	MAIS SOBRE VOCÊ	INFORMAÇÕES	EQUIPE
<p>equipe</p> <p> </p> <p>LIO [Laboratório de Instrumentação Oftalmológica criado em Janeiro de 2001]</p> <p>coordenação Profa. Dra. Liliane Ventura (Física).</p> <p>objetivo [LIO] desenvolver tecnologia voltada para Óculos de Sol e para Oftalmologia.</p> <p>meta [LIO] desenvolvimento de tecnologia nacional para Oftalmologia e para certificação e normas de óculos de sol.</p> <p>pesquisas • Prioriza pesquisas que são de utilidade direta para a comunidade, no setor da oftalmologia. • Realizam pesquisas no laboratório pessoas ligadas às áreas de Física, Engenharia, Ciências da Computação, Matemática, Medicina e Biologia.</p> <p>apoio O LIO conta com suporte financeiro da FAPESP, CAPES, CNPq e USP para infra-estrutura e bolsas de estudos para os pesquisadores e alunos.</p> <p>localização Situado dentro do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos - USP lio@ec.usp.br www.sel.eesc.usp.br/lio</p>				

Figura 44 Tela ‘Equipe’ do programa de interface com o usuário

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.3.1 Espectrofotometria das lentes

Foram analisadas 45 lentes com o espectrofotômetro CARY5000, em cinco pontos diferentes. Porém, apenas as medidas realizadas no centro das lentes (ponto 1 da Figura 12) foram usadas para comparação com as medidas do novo equipamento. A Tabela 4 mostra estatisticamente a proporção de óculos por categoria. Percebe-se um grande número de óculos com transmitância abaixo de 3%, transmitâncias que não são previstas pela norma, demonstrando uma tendência de óculos de sol sendo vendidos no mercado brasileiro abaixo das especificações permitidas, ou seja, lentes tão escuras que colocam em risco a visibilidade do usuário.

Tabela 4 Distribuição dos óculos testados, por categoria

Categoria	N de óculos testados
0 (100 – 80%)	0
1 (80 – 43%)	1
2 (43 – 18%)	4
3 (18 – 8%)	12
4 (8 – 3%)	18
< 3%	10

Considerando que os óculos de categoria 4 não são recomendados para direção, tem-se um total de 28 óculos (soma dos óculos categoria 4 e com menos de 3% de transmitância) não permitidos para direção. Percebe-se que a maioria dos óculos de sol testados possuem baixa transmitância luminosa (concentração dos pontos abaixo de 18%) e não houve pontos onde a transmitância fosse maior que 60%, fato importante para as futuras análises de *Bland-Altman*.

Para a transmitância semafórica, todos os óculos possuem coeficiente Q em conformidade com a norma brasileira, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 Coeficientes de Atenuação Q dos óculos testados

$Q = \frac{\tau_{sinal}}{\tau_v}$	Q _{AZUL} (>0,40)	Q _{VERD} (>0,60)	Q _{AMAR} (>0,80)	Q _{VERM} (>0,80)
Amostra 01	1,00	1,05	0,97	0,80
Amostra 02	1,19	1,04	0,95	1,03
Amostra 03	1,25	1,05	0,96	1,10

Amostra 04	1,27	1,05	0,95	1,08
Amostra 05	1,14	0,99	1,02	1,20
Amostra 06	1,16	1,00	1,02	1,21
Amostra 07	1,28	1,04	0,96	1,14
Amostra 08	1,29	1,04	0,95	1,13
Amostra 09	1,15	1,03	0,97	1,06
Amostra 10	1,27	1,04	0,96	1,13
Amostra 11	1,15	1,03	0,97	1,06
Amostra 12	1,22	1,02	0,99	1,16
Amostra 13	1,03	1,00	1,02	1,10
Amostra 14	1,19	1,04	0,95	1,04
Amostra 15	1,20	1,00	1,02	1,23
Amostra 16	1,18	1,03	0,96	1,05
Amostra 17	1,25	1,03	0,97	1,11
Amostra 18	1,01	1,04	0,97	0,82
Amostra 19	1,14	0,98	1,06	1,30
Amostra 20	1,02	0,86	1,21	1,58
Amostra 21	1,14	1,00	1,00	1,05
Amostra 22	0,79	0,85	1,23	1,43
Amostra 23	1,08	1,02	0,99	1,05
Amostra 24	1,15	1,04	0,95	0,92
Amostra 25	0,99	1,00	1,01	0,99
Amostra 26	1,13	1,07	0,90	0,87
Amostra 27	0,82	0,87	1,22	1,39
Amostra 28	1,21	1,05	0,94	1,04
Amostra 29	1,20	0,99	1,01	1,19
Amostra 30	1,07	0,90	1,17	1,51
Amostra 31	0,78	0,79	1,31	1,57
Amostra 32	0,72	0,77	1,35	1,61
Amostra 33	0,72	0,77	1,35	1,61
Amostra 34	1,34	1,01	1,00	1,28
Amostra 35	1,27	1,05	0,95	1,08
Amostra 36	1,34	1,01	1,00	1,28
Amostra 37	1,25	1,05	0,95	1,08
Amostra 38	0,72	0,77	1,35	1,63
Amostra 39	1,34	1,01	1,00	1,29
Amostra 40	1,32	1,02	0,99	1,24
Amostra 41	1,28	1,05	0,95	1,10
Amostra 42	1,35	1,01	1,00	1,28
Amostra 43	1,29	1,04	0,96	1,14
Amostra 44	1,25	1,05	0,95	1,09
Amostra 45	1,27	1,05	0,93	1,05

Dentre as 45 lentes testadas, as transmitâncias UV ficaram todas abaixo de 3,5%, e, portanto, todos encontram-se conformes com a norma brasileira para a proteção UV.

A homogeneidade da transmitância visível nos cinco pontos da lente foi testada a fim de se verificar se o próprio deslocamento das lentes dentro do equipamento faria diferença nas medidas. Das 45 lentes testadas, houve diferença maior que o permitido em cinco lentes. A maior diferença registrada entre dois pontos foi de 1,91 pontos percentuais e o maior desvio padrão do erro entre os cinco pontos foi de 0,69. Esta diferença pode alterar a categoria da lente e, conseqüentemente, pode alterar a conformidade.

3.4 TEMPO DE AQUECIMENTO E ESTABILIDADE LUMINOSA

É de suma importância que o sistema de medidas esteja estável em relação a flutuações luminosas das fontes emissoras de luz. As lâmpadas fluorescentes UV utilizadas nos testes possuem um tempo de aquecimento, até que atinjam uma estabilidade luminosa.

Ainda, o LED branco, componente de potência que foi polarizado com 350 mA, possui alteração luminosa durante os primeiros minutos de aquecimento.

A Figura 45 mostra o perfil de variação da intensidade medida com os sensores UV durante aproximadamente 25 minutos, e a curva Tuv mostra a razão da variação de um sensor em comparação ao outro.

Figura 45 Variação de intensidade, no tempo, das lâmpadas UV medida com os sensores UV, e a relação entre a variação nos dois sensores, Tuv

No primeiro momento, as lâmpadas são ligadas, e é possível perceber uma variação maior que 25% da máxima intensidade atingida pelas lâmpadas até 20 minutos. Mesmo

assim, a variação de T_{uv} , ou seja, da divisão entre o sinal medido e o sinal de referência, permanece entre 99,7 e 101,03, resultado suficiente para se realizar as medidas de transmitância.

A Figura 46 mostra a variação da intensidade do LED branco medida com o sensor BPW, durante aproximadamente 3 minutos.

Figura 46 Variação da intensidade, no tempo, do LED branco medida com o sensor BPW

A variação chega a ser maior que 10% da intensidade de pico, porém após 2 minutos observa-se uma variação máxima de 0,5% no próximo minuto, suficiente para se realizar medidas sem interferência da linha de base.

3.5 TESTE DE CATEGORIA

3.5.1 Análise de aproximação espectral visível (W_{fVIS})

O teste de análise de aproximação espectral visível refere-se à aproximação espectral da função W_{fVIS} por uma função W_{fVIS}^* (combinação entre fonte, filtro IV e sensor). Em seguida calcula-se τ_V (utilizando a função W_{fVIS}) e τ_V^* (utilizando W_{fVIS}^*) de 60 amostras espectrais. As linhas pontilhadas em vermelho mostram as margens de erro esperadas pela norma.

Os métodos erro RMS e GFC foram usados para referência da comparação entre W_{fVIS} e W_{fVIS}^* . Foi calculado o desvio padrão entre as medidas τ_V e τ_V^* para comparação.

Os gráficos da Figura 47 até a Figura 51 referem-se ao sensor BPW. Na primeira coluna está a comparação da função W_{fVIS} com a função W_{fVIS}^* utilizando as lâmpadas do Apêndice

E. Os gráficos à direita na Figura 51 apresentam a comparação entre τ_V (eixo X) e τ_V^* (eixo Y).

Os gráficos da Figura 52 até a Figura 56, utilizando o sensor SFH; mostra na primeira coluna o resultado da comparação entre W_{fVIS} e W_{fVIS}^* . A segunda coluna de gráficos apresenta o resultado da comparação de τ_V (eixo X) e τ_V^* (eixo Y).

Figura 47 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Incandescente) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 48 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Fluorescente) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 49 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Simuladora Solar) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 50 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LEDs) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 51 Gráficos com BPW. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (LED Branco) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Em seguida, os gráficos obtidos utilizando o sensor SFH.

Figura 52 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Incandescente) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 53 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{fVIS} (NBR15111) x W_{fVIS}^* (Fluorescente) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 54 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{VIS} (NBR15111) x W_{VIS}^* (Simuladora Solar) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 55 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{VIS} (NBR15111) x W_{VIS}^* (LEDs) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Figura 56 Gráficos com SFH. Comparação entre W_{VIS} (NBR15111) x W_{VIS}^* (LED Branco) e τ_V (eixo X) x τ_V^* (eixo Y)

Os valores de aproximação do erro RMS e GFC são calculados entre os espectros W_{VIS} e W_{VIS}^* , e são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Valores erro RMS e GFC de comparação entre W_{VIS} e W_{VIS}^* , das Figuras 47 a 56

Sensores Lâmpadas	BPW21R		SFH5711	
	Erro RMS	GFC	Erro RMS	GFC
Incandescente	0,2440	0,8959	0,1044	0,9686
Fluorescente	0,3230	0,7439	0,3317	0,7271
Simulador	0,1853	0,9010	0,1876	0,9156
Conjunto LEDs	0,0900	0,9837	0,0988	0,9768
LED Branco	0,2011	0,9207	0,0549	0,9922

O resultado indica os menores erros RMS para os melhores coeficientes GFC, visto com o conjunto de LEDs com o sensor BPW e o LED branco com o sensor SFH.

O segundo teste mostra as combinações que proporcionaram τ_V^* com o menor desvio padrão em comparação com τ_V : o conjunto de LEDs com o sensor BPW21R, e o LED branco com o sensor SFH5711. Estas combinações estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Valores de Desvio Padrão na comparação entre as transmitâncias calculadas com W_{VIS} e W_{VIS}^*

Sensores Lâmpadas	BPW21R	SFH5711
	DP	DP
Incandescente	4,0933	2,1066
Fluorescente	1,7726	1,6508
Simulador	2,5806	1,6430
Conjunto LEDs	0,8016	1,4240
LED Branco	3,9020	1,0883

Os resultados da Tabela 7 mostram a viabilidade de aproximação espectral usando os métodos RMS e GFC, pois as aproximações com os menores desvios padrão das medidas reais são aquelas que obtiveram melhores resultados com os métodos RMS e GFC. Também, aponta como solução da aproximação espectral um equipamento utilizando LEDs, ao invés de lâmpadas convencionais.

3.5.2 Medidas de transmitância visível

Foram realizadas medidas nas 45 lentes utilizando o LED branco, Figura 28, em combinação com o sensor BPW, e também com o sensor SFH.

A disposição ótica dos componentes seguiu o projeto desenvolvido para as medidas, Figura 33.

O LED branco foi ligado por um período de 5 minutos, para estabilidade térmica e luminosa.

Antes de se colocar cada lente, foi calculado um valor de base (V_b) como referência para a medida a ser realizada com a lente (V_m). O valor da transmitância é então calculado dividindo-se o valor obtido do sensor após colocar a lente pelo valor de referência, Equação 30.

$$\tau_V^* = 100 * \frac{V_m}{V_b} (\%) \quad (30)$$

A Figura 57 mostra a análise de *Bland-Altman* para as transmitâncias medidas com o sensor BPW, enquanto a Figura 58 mostra a mesma análise para as medidas realizadas com o sensor SFH. O gráfico da esquerda mostra a reta de concordância e a comparação entre a medida realizada com o protótipo e a medida realizada com o espectrofotômetro Cary5000. O gráfico da direita mostra a dispersão entre a diferença dos dois métodos e a média das duas variáveis.

Figura 57 Análise de *Bland-Altman* para as medidas de transmitância visível, utilizando LED branco o sensor BPW

Figura 58 Análise de *Bland-Altman* para as medidas de transmitância visível, utilizando LED branco o sensor SFH

As medidas com o sensor BPW levaram a um viés de -0,78 com limites de concordância entre -2,89 e 1,34, sendo que o desvio padrão para estas medidas foi de 1,08. Pode-se ver a concentração dos pontos para transmitâncias menores que 18%. Para o sensor SFH, o viés foi de 1,23, com os limites de concordância entre -1,06 e 3,52, com desvio padrão de 1,17. Ainda que os dois métodos tenham calculado a transmitância visível com limites de concordância próximos do esperado como regra de projeto para o equipamento, ainda existem medidas com erro maior que 3 pontos percentuais.

3.6 TESTE DE TRANSMITÂNCIA SEMAFÓRICA

3.6.1 Aproximação espectral para transmitância semafórica

Os gráficos da Figura 29 mostram os espectros dos LEDs em comparação às curvas de ponderação para cada teste da norma com relação à transmitância semafórica.

A comparação entre as curvas foi feita com os valores de comparação espectral do erro RMS e GFC, e apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 Valores erro RMS e GFC de comparação entre espectros $W_{f-sinal}$ e os LEDs

Cores	Comparação	
	Erro RMS	GFC
Vermelho	0,1470	0,9159
Amarelo	0,2988	0,6634
Verde	0,1454	0,9091
Azul	0,1330	0,9083

Os resultados da Tabela 8 apresentam valores maiores de erro RMS e menores de GFC do que o caso de aproximação espectral para a transmitância visível.

3.6.2 Medidas de transmitância semafórica

Foram feitas medidas nas 45 lentes utilizando os LEDs vermelho, amarelo, verde e azul, Figura 29, em combinação com o sensor BPW. A disposição ótica dos componentes foi montada na caixa desenvolvida para realização das medidas, visto na Figura 33. O mesmo procedimento foi feito utilizando a Equação 30.

A Figura 59b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verm} e τ_{verm}^* , com viés de -0,42 e limites de concordância entre -2,18 e 1,35. O protótipo calculou a transmitância no vermelho com desvio padrão de 0,90 das medidas com o espectrofotômetro.

Figura 59 Análise de *Bland-Altman* utilizando LED vermelho e o sensor BPW

A Figura 60b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{amar} e τ_{amar}^* , com viés de -0,088 e limites de concordância entre -1,60 e 1,42. O protótipo calculou a transmitância no amarelo com desvio padrão de 0,77 das medidas com o espectrofotômetro.

Figura 60 Análise de *Bland-Altman* utilizando LED amarelo e o sensor BPW

A Figura 61b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verd} e τ_{verd}^* , com viés de 0,76 e limites de concordância entre -1,85 e 3,38. O protótipo calculou a transmitância no verde com desvio padrão de 1,30 das medidas com o espectrofotômetro.

Figura 61 Análise de *Bland-Altman* utilizando LED verde e o sensor BPW

A Figura 62b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{azul} e τ_{azul}^* , com viés de 0,039 e limites de concordância entre -1,66 e 1,74. O protótipo calculou a transmitância no azul com desvio padrão de 0,87 das medidas com o espectrofotômetro.

Figura 62 Análise de *Bland-Altman* utilizando LED azul e o sensor BPW

O único teste cujas transmitâncias estavam fora da faixa de erro estipulada para o equipamento foi para o LED verde. Para as demais cores de LEDs, os limites de concordância encontram-se dentro da faixa de erro permitida.

3.7 TESTE DE TRANSMITÂNCIA UV

3.7.1 Teste em óculos

A aproximação espectral obtida com as lâmpadas UVA e UVB, Figura 30, permite calcular os erros para a diferença espectral entre W_{fUV} e W_{fUV}^* de: $\text{RMS}_{\text{UV}} = 0,0648$ e $\text{GFC}_{\text{UV}} = 0,9699$.

As medidas de transmitância UV das 45 lentes solares estão apresentadas na Figura 63. A disposição ótica dos componentes seguiu o projeto desenvolvido para as medidas, Figura 33. As lâmpadas ficaram ligadas por 5 minutos antes das medidas, para estabilidade térmica e luminosa.

Seja o sensor 1 o sensor de medida, e o sensor 2 o de referência. As medidas de base foram feitas para os dois sensores (V_{b1} e V_{b2}) e, após colocação da lente, foi feita uma medida

para cada sensor (V_{m1} e V_{m2}). O valor da transmitância UV é então calculado pela Equação 31.

$$\tau_{SUV}^* = 100 * \frac{(V_{m1} * V_{b2})}{(V_{m2} * V_{b1})} (\%) \quad (31)$$

O desvio padrão entre as medidas foi de 0,42, porém percebe-se que as lentes possuem transmissão UV com valores muito baixos, com apenas três lentes com transmitância acima de 1,5%, o valor mínimo esperado para a transmitância ultravioleta uma vez que a menor transmitância visível permitida é de 3%. Não é possível concluir sobre a precisão do método no cálculo da transmitância no ultravioleta apenas com estas medidas.

Figura 63 (a) Comparação entre a transmitância ultravioleta calculada com a norma NBR15111 e a transmitância medida com o sistema. (b) Ampliação da região demarcada em a)

Somente com estes pontos não seria testada a concordância efetiva entre o equipamento proposto e as medidas espectrofotométricas. O que se seguiu foi um novo teste a fim de testar essa concordância.

3.7.2 Teste em Filtros UV

A fim de se verificar a metodologia com a aproximação espectral para lentes com transmitâncias maiores, foram obtidos espectros de nove filtros UV, 9 mm de diâmetro, com cortes em 275, 300, 310, 325, 330, 350, 375, 390, 400 nm. Os filtros foram testados com o

CARY5000 e seus espectros obtidos na região central. A Figura 64 mostra os espectros dos filtros, em comparação com a W_{UV} .

Figura 64 Filtros UV em comparação com a W_{UV} (pontilhada)

O mesmo procedimento usado para os óculos de sol foi usado para testar os filtros UV, Equação 31. O gráfico de dispersão com a reta de concordância das medidas está apresentado na Figura 65, no qual o desvio padrão das medidas foi de 4,43.

Figura 65 Dispersão com reta de concordância para transmitância UV utilizando duas lâmpadas fluorescentes (DP = 4,43)

Para se ter uma ideia melhor deste resultado, foram testados os mesmos filtros no equipamento anterior desenvolvido no LIO, que utiliza apenas uma lâmpada UVA. O

resultado está na Figura 66. Nota-se que o desvio padrão das medidas para este outro equipamento é de 21,3.

Figura 66 Dispersão com reta de concordância para transmitância UV de equipamento desenvolvido anteriormente (DP = 21,3)

3.8 TESTE DE REGRESSÃO POLINOMIAL

As medidas de X, Y e Z das 45 lentes solares foram obtidas com o sensor TCS e o LED branco como iluminação. A disposição ótica dos componentes seguiu o projeto desenvolvido para as medidas, Figura 33. Novamente, deixou-se o LED branco aceso por 5 minutos antes das medidas, para estabilidade térmica e luminosa.

As medidas de base foram feitas para os três canais (V_{bX} , V_{bY} e V_{bZ}) e, após o posicionamento da lente, foram feitas as medidas para cada canal (V_{mX} , V_{mY} e V_{mZ}). Os valores X, Y e Z são então calculados pelas Equações 32, 33 e 34.

$$X = 100 * \frac{V_{mX}}{V_{bX}} (\%) \quad (32)$$

$$Y = 100 * \frac{V_{mY}}{V_{bY}} (\%) \quad (33)$$

$$Z = 100 * \frac{V_{mZ}}{V_{bZ}} (\%) \quad (34)$$

Utilizou-se 39 dos 45 valores de X, Y e Z e as respectivas transmitâncias calculadas com o CARY5000, para calcular a matriz **Q**, da Equação 27, sendo deixadas 6 lentes como

testes do polinômio. O cálculo dos coeficientes então é feito com a função *regress* do *MATLAB*. Foi então feita a análise de *Bland-Altman* para as transmitâncias de cada polinômio.

A Figura 67b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_V e τ_V^* , com viés de -0,0029 e limites de concordância entre -0,82 e 0,82.

Figura 67 Análise de *Bland-Altman* para τ_V utilizando regressão polinomial

A Figura 68b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verm} e τ_{verm}^* , com viés de -0,0018 e limites de concordância entre -1,18 e 1,18.

Figura 68 Análise de *Bland-Altman* para τ_{verm} utilizando regressão polinomial

A Figura 69b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{amar} e τ_{amar}^* , com viés de -0,0029 e limites de concordância entre -0,82 e 0,82.

Figura 69 Análise de *Bland-Altman* para τ_{amar} utilizando regressão polinomial

A Figura 70b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verd} e τ_{verd}^* , com viés de 0,0022 e limites de concordância entre -0,85 e 0,85.

Figura 70 Análise de *Bland-Altman* para τ_{verd} utilizando regressão polinomial

A Figura 71b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{azul} e τ_{azul}^* , com viés de 0,027 e limites de concordância entre -0,82 e 0,87.

Figura 71 Análise de *Bland-Altman* para τ_{azul} utilizando regressão polinomial

3.9 TESTE DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Da mesma forma que para a regressão, o treinamento das redes utilizou as mesmas medidas de X, Y e Z das 45 lentes solares obtidas com o sensor TCS e o LED branco. Foram adicionadas duas condições de medição do sistema: caso os triestímulos do TCS sejam $[0 \ 0 \ 0]$ e $[100 \ 100 \ 100]$, a transmitância para qualquer teste foi imposta como 0 e 100, respectivamente, totalizando 47 pontos de amostra.

O treino das RNAs usou 39 pontos para treinamento, 3 para validação e 5 para teste. A análise de *Bland-Altman* é feita para todos os 47 pontos de cada RNA.

A Figura 72b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_v e τ_v^* , com viés de -0,00061 e limites de concordância entre -1,20 e 1,20.

Figura 72 Análise de *Bland-Altman* para τ_v utilizando RNA

A Figura 73b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verm} e τ_{verm}^* , com viés de -0,19 e limites de concordância entre -1,93 e 1,55.

Figura 73 Análise de *Bland-Altman* para τ_{verm} utilizando RNA

A Figura 74b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{amar} e τ_{amar}^* , com viés de -0,0061 e limites de concordância entre -1,36 e 1,35.

Figura 74 Análise de *Bland-Altman* para τ_{amar} utilizando RNA

A Figura 75b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{verd} e τ_{verd}^* , com viés de -0,0054 e limites de concordância entre -1,08 e 1,07.

Figura 75 Análise de *Bland-Altman* para τ_{verd} utilizando RNA

A Figura 76b mostra a dispersão do erro entre as medidas τ_{azul} e τ_{azul}^* , com viés de 0,0017 e limites de concordância entre -1,26 e 1,26.

Figura 76 Análise de *Bland-Altman* para τ_{azul} utilizando RNA

Os testes, em geral, foram melhores para a regressão polinomial do que para as RNA's. A observação que fica em torno dos dois métodos é o número pequeno de amostras usadas para o treinamento de cada método. Ambos poderiam ser melhorados ainda mais com a utilização de mais amostras.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

4.1 CONCLUSÃO

Foram testadas metodologias com o objetivo de calcular a transmitância em óculos de sol de acordo com as funções de ponderação da norma NBR15111.

Em relação à conformidade para direção, das 45 lentes testadas, 28 lentes (62,2% das amostras) foram consideradas inapropriadas para a direção (vide Tabela 4). Estes resultados reafirmam a necessidade de regras para a venda de óculos de sol. Nenhuma amostra de óculos de sol foi reprovada em relação ao teste de proteção UVA e UVB. O teste de homogeneidade de transmitância das lentes demonstrou grande variabilidade, fora dos limites permitidos pela norma. Esta variação se apresenta como um fator de incerteza na concordância entre os medidores e dificulta a medição precisa dos limites de concordância entre equipamentos.

Para os testes de aproximação espectral, os métodos RMS e GFC proporcionaram determinar os melhores candidatos para uma aproximação espectral ótima, com DP menores, indicando que a utilização de LEDs é mais adequada do que a utilização de lâmpadas convencionais. Ainda que os métodos não tenham sido ótimos para a aproximação semafórica, comparados aos valores obtidos para W_{VIS} , o conjunto de LEDs coloridos proporcionaram as transmitâncias semafóricas com limites de concordância próximos ao limite de erro esperado. Isso provavelmente se deve ao fato da região espectral para cada cor semafórica abranger uma faixa mais estreita do espectro visível, na qual, mesmo os espectros não sendo tão próximos, conseguem fazer a ponderação com boa concordância.

Os testes práticos de aproximação espectral surpreendem pela grande aproximação dos limites de concordância obtidos com os limites de erro definidos como regra de projeto. O teste UV com duas lâmpadas mostrou a melhoria das medidas com relação ao equipamento anterior, porém ainda com um DP de 4,45 para filtros passa-alta.

Os métodos com o sensor TCS para as transmitâncias proporcionaram os melhores resultados, sendo a regressão polinomial aparentemente superior a RNA por apresentar os

menores limites de concordância dos erros entre medidas. Porém, o número de amostras ainda é pequeno para que se obtenha uma aproximação ideal para todos os óculos.

4.2 DISCUSSÃO

É notória a carência de informação da população sobre os óculos de sol, devido ao grande interesse pela versão anterior do Totem de Auto-Atendimento em feiras e exposições. Alia-se à necessidade de programas de conscientização sobre os malefícios da exposição à RUV, uma vez que os óculos de sol são recomendados como forma de proteção à radiação.

É preciso atenção com os óculos solares que se apresentam conformes com sua proteção ultravioleta, pois existe ainda um teste não confirmado que se refere a se ter o conhecimento da duração desta proteção ultravioleta. É um teste realizado em um simulador solar por 50 horas contínuas de irradiação para se verificar se a proteção irá durar após certo tempo de uso destes óculos.

Outros medidores disponíveis no mercado não apresentam medidas de exatidão e concordância com medidas feitas em equipamentos de referência, como feitas neste trabalho. As fontes emissoras de luz e sensores não contemplam o espectro eletromagnético determinado pela norma.

Uma montagem com LEDs se apresenta como uma alternativa promissora quanto ao custo, tamanho e baixo consumo para medidores de transmitância portáteis, frente a equipamentos como o CARY5000. O Totem de Auto Atendimento para análise de transmitância em óculos de sol é um equipamento inédito, com o propósito de avaliação de óculos de sol, conscientização sobre a exposição à radiação e como medidor confiável em relação aos medidores comerciais com mesma finalidade.

Fica também a necessidade de discussão mais profunda dos testes de transmitância pertencentes à norma brasileira, visto que existem parâmetros que devem ser melhores adequados, como o tipo de radiação solar (índices UV) que atinge o Brasil, a curva de sensibilidade do olho humano e previsão de semáforos a LED. Estes assuntos têm sido alvo de estudos no LIO atualmente.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro do projeto 2012/03565-6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **História da normalização brasileira**. Rio de Janeiro: 2011. 112 Disponível em: < http://www.abnt.org.br/imprensa/livro_abnt/70anos_ABNT.pdf >.

_____. **NBR15111 Proteção pessoal dos olhos - Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral** 2013.

AS/NZS. **Sunglasses and fashion spectacles**. Sydney, Australia e Wellington, New Zealand: Standards Australia e Standards New Zealand. 1067: 50 p. 2003.

BARCELLOS, R. **Novo método de mapeamento de espaços de cor através de redes neurais artificiais especializadas**. 2011. (Tese (Doutorado em Telecomunicações)). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BULLIARD et al. **Getting the message across : sun protection information in media weather reports in New Zealand**. Dunedin, NOUVELLE-ZELANDE: Southern Colour Print, 2001.

BURGESS, C. - Chapter 1 The basics of spectrophotometric measurement. - **UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater**, v. 27, p. 1 - 19, 2007. ISSN - 0167-9244.

CLARK, B. A. J. COLOR IN SUNGLASS LENSES. **American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry**, v. 46, n. 11, p. 825-&, 1969. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:A1969E754700004 >.

COLE, B. L. Should sunglasses be required to comply with the sunglass standard? **Clinical and Experimental Optometry**, v. 86, n. 2, p. 74-76, 2003. ISSN 1444-0938. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03065.x> >.

DAIN, S. J. Comparison of the transmittance and coloration requirements of the 4 national sunglass standards. **Optometry and Vision Science**, v. 70, n. 1, p. 66-74, Jan 1993. ISSN 1040-5488. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:A1993KH30500010 >.

_____. Sunglasses and sunglass standards. **Clinical and Experimental Optometry**, v. 86, n. 2, p. 77-90, 2003. ISSN 1444-0938. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03066.x/abstract> <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03066.x/pdf> >.

DAIN, S. J.; WOOD, J. M.; ATCHISON, D. A. Sunglasses, Traffic Signals, and Color Vision Deficiencies. **Optometry and Vision Science**, v. 86, n. 4, Apr 2009. ISSN 1040-5488. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000264858600001 >.

DAVIS, J. K. The Sunglass Standard and Its Rationale. **Optometry & Vision Science**, v. 67, n. 6, p. 414-430, 1990. ISSN 1040-5488. Disponível em: < http://journals.lww.com/optvissci/Fulltext/1990/06000/The_Sunglass_Standard_and_Its_Rationale.5.aspx >.

DIFFEY, B. L. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems. **Physics in Medicine and Biology**, v. 36, n. 3, p. 299, 1991. ISSN 0031-9155. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0031-9155/36/i=3/a=001>>.

DONGRE, A. M.; PAL, G. G.; KHOPKAR, U. S. Ultraviolet protective properties of branded and unbranded sunglasses available in the Indian market in UV phototherapy chambers. **Indian Journal of Dermatology Venereology & Leprology**, v. 73, n. 1, p. 26-28, Jan-Feb 2007. ISSN 0378-6323. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000254010500007>.

FISHMAN, G. A. Ocular phototoxicity: Guidelines for selecting sunglasses. **Survey of Ophthalmology**, v. 31, n. 2, p. 119-124, 9// 1986. ISSN 0039-6257. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0039625786900792>>. Acesso em: 1986/10//.

GIES, P. H. et al. Protection against solar ultraviolet radiation. **Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis**, v. 422, n. 1, p. 15-22, Nov 1998. ISSN 0027-5107. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000077562200003>.

GRAEME, J. G. **Photodiode Amplifiers**. McGraw Hill Professional, 1996. 252.

GREEN, A. E. S.; CROSS, K. R.; SMITH, L. A. Improved Analytic Characterization Of Ultraviolet Skylight. **Photochemistry and Photobiology**, v. 31, n. 1, p. 59-65, 1980. ISSN 1751-1097. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-1097.1980.tb03683.x>>.

HERNANDEZ-ANDRES, J.; ROMERO, J.; LEE, R. L. Colorimetric and spectroradiometric characteristics of narrow-field-of-view clear skylight in Granada, Spain. **Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision**, v. 18, n. 2, p. 412-420, Feb 2001. ISSN 0740-3232. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000166633400020>.

HIRAKATA, V. N.; CAMEY, S. A. **Análise de Concordância entre Métodos de Bland-Altman**. 2010. ISBN 1983-5485[escape]. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/index.php/hcpa/article/view/11727/7021>>.

IMAI, F. H. et al. Comparative study of metrics for spectral match quality. **Cgiv'2002: First European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, Conference Proceedings**, p. 492-496, 2002. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000184048100103>.

INMETRO. **Relatório sobre Análise em Óculos de Sol**. Rio de Janeiro: 05/2009, p.22. 2009

_____. **Procedimento para verificação de medidor de transmitância luminosa**. NIE-DIMEL-086: 8 p. 2010.

JONES, J. A. et al. Cataract Formation Mechanisms and Risk in Aviation and Space Crews. **Aviation, Space, and Environmental Medicine**, v. 78, n. Supplement 1, p. A56-A66, // 2007. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/asma/asem/2007/00000078/A00104s1/art00010>>.

KANG, H. R. **Computational Color Technology**. SPIE Press, 2006. ISBN 9780819461193. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=dN3sZ56Pu3cC>>.

KASTEN, F.; YOUNG, A. T. Revised Optical Air-Mass Tables and Approximation Formula. **Applied Optics**, v. 28, n. 22, p. 4735-4738, Nov 15 1989. ISSN 0740-3224. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1989AZ35700007 >.

KULLAVANIJAYA, P.; LIM, H. W. Photoprotection. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 52, n. 6, p. 937-958, 6// 2005. ISSN 0190-9622. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0190962204022674> >.

LEOW, Y. H.; THAM, S. N. UV-protective sunglasses for UVA irradiation protection. **International Journal of Dermatology**, v. 34, n. 11, p. 808-810, 1995. ISSN 1365-4632. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-4362.1995.tb04405.x> >.

OLIVEIRA, G. C. D. D. **Uma contribuição para circuitos eletrônicos de medidores de radiações ultravioleta para lentes**. 2009. (Dissertação (Mestrado em Processamento de Sinais e Instrumentação)). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PALMER, D. A.; MELLERIO, J.; CUTLER, A. Traffic signal light detection through sunglare filters of different Q factors. **Color Research and Application**, v. 22, n. 1, p. 24-31, Feb 1997. ISSN 0361-2317. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1997WF69500003 >.

ROSENTHAL, F. S. et al. The effect of sunglasses on ocular exposure to ultraviolet-radiation. **American Journal of Public Health**, v. 78, n. 1, p. 72-74, Jan 1988. ISSN 0090-0036. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1988N449800017 >.

ROY, C. R.; GIES, H. P.; TOOMEY, S. The solar UV radiation environment: measurement techniques and results. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 31, n. 1-2, p. 21-27, 11// 1995. ISSN 1011-1344. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1011134495071648> >.

RUBIN, M. L. Spectacles: Past, present, and future. **Survey of Ophthalmology**, v. 30, n. 5, p. 321-327, 3// 1986. ISSN 0039-6257. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0039625786900640> >. Acesso em: 1986/4//.

SASIENI, L. S. **The Principles and Practice of Optical Dispensing Andfitting**. Hammond, 1962. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=ctPNSAAACAAJ> >.

SLINEY, D. H. BIOHAZARDS OF ULTRAVIOLET, VISIBLE AND INFRARED RADIATION. **Journal of Occupational and Environmental Medicine**, v. 25, n. 3, p. 203-206, 1983. ISSN 1076-2752. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:A1983QF42200006 >.

_____. Photoprotection of the eye - UV radiation and sunglasses. **Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology**, v. 64, n. 2-3, p. 166-175, Nov 2001. ISSN 1011-1344. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000172865600011 >.

_____. Exposure geometry and spectral environment determine photobiological effects on the human eye. **Photochemistry and Photobiology**, v. 81, n. 3, p. 483-489, May-Jun 2005. ISSN 0031-8655. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000229757200002 >.

_____. Intraocular and Crystalline Lens Protection From Ultraviolet Damage. **Eye & Contact Lens-Science and Clinical Practice**, v. 37, n. 4, p. 250-258, Jul 2011. ISSN 1542-2321. Disponível em: < <Go to ISI>://WOS:000292128300012 >.

TAYLOR, H. R. et al. Effect of Ultraviolet Radiation on Cataract Formation. **New England Journal of Medicine**, v. 319, n. 22, p. 1429-1433, 1988. Disponível em: < <http://www.nejm.org/doi/full/10.1056/NEJM198812013192201> >.

TUCHINDA, C.; SRIVANNABOON, S.; LIM, H. W. Photoprotection by window glass, automobile glass, and sunglasses. **Journal of the American Academy of Dermatology**, v. 54, n. 5, p. 845-854, 5// 2006. ISSN 0190-9622. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0190962205046244> >.

WÜRFEL, P.; WÜRFEL, U. **Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts**. Wiley, 2009. ISBN 9783527408573. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=w6li4r7FuskC> >.

APÊNDICE A

APÊNDICE B

Título		SFH5711	
Organização		Marcio Makiyama Mello	
Designer		Marcio Makiyama Mello	
Tamanho	Document Number	Rev	
A4	MMM02	<RevC	
Data:		Tuesday, October 29, 2013	Página 1 de 1

APÊNDICE C

APÊNDICE D

APÊNDICE E

ESPECTRO DAS LÂMPADAS UTILIZADAS

- Cool Blue (OSRAM)

- T8 Fluorescente (Philips)

- Ultra Vitalux (OSRAM)

- PL-S 9W/01/2P (UVB)

- Actinic BL TL 6W/10 (UVA)