Universidade de São Paulo–USP
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Artur Duarte Loureiro

Dispositivo para Medição e Teste de Transmitância Luminosa e
Semafórica em Óculos de Sol de Acordo com a Norma Brasileira –
ABNT NBR ISO 12312-1:2015

São Carlos
2017

Artur Duarte Loureiro

Dispositivo para Medição e Teste de Transmitância Luminosa e
Semafórica em Óculos de Sol de Acordo com a Norma Brasileira – ABNT
NBR ISO 12312-1:2015

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Engenharia Elétrica da Escola
de Engenharia de São Carlos como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de concentração: Processamento de
Sinais e Instrumentação

Orientador: Prof.^a Dr.^a Liliane Ventura

São Carlos
2017

**Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na
EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.**

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.

Loureiro, Artur Duarte
I892d   Dispositivo para medição e teste de transmitância
luminosa e semafórica em óculos de sol de acordo com a
norma brasileira - ABNT NBR ISO 12312-1:2015 / Artur
Duarte Loureiro; orientadora Liliane Ventura. São
Carlos, 2017.

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,
2017.

1. Medida de transmitância embarcada. 2. Óculos de
sol. 3. Transmitância luminosa. 4. Transmitância
semafórica. 5. ABNT NBR ISO 12312-1. 6. ISO 12312. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ARTUR DUARTE LOUREIRO.**

Título da dissertação: "Dispositivo para medição e teste de transmitância luminosa e semafórica em óculos de sol de acordo com a norma brasileira – ABNT NBR ISSO 12312-1:2015".

Data da defesa: 06/11/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

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

APROVADO

Prof. Dr. **Daniel Varela Magalhães**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Ao meu irmão

Agradecimentos

Aos meus pais e ao meu irmão, por estarem sempre presentes incentivando, independente da distância.

À Professora Liliane Ventura, pela oportunidade de trabalhar neste projeto e de fazer parte do nosso grupo de pesquisa, assim como pela confiança e pelo incentivo depositados.

Ao Dr. Mauro Masili, por esclarecer e discutir tópicos de relevância para o trabalho.

Aos amigos, pelo apoio emocional, em especial ao Leonardo, ao Pacheco, ao Zhi, ao Coelho, ao Felipe, ao Guilherme, ao João, à Natane, à Fernanda e ao William.

Ao Professor Adilson Gonzaga e ao Professor Daniel Varela Magalhães, pela participação na banca da Qualificação deste trabalho com discussões e contribuições que ajudaram a enriquecer o trabalho final.

Ao Professor Daniel Varela Magalhães, novamente, e à Professora Lígia de Oliveira Ruggiero, pela participação na banca da defesa da dissertação com novas discussões e contribuições que ajudaram a enriquecer o texto final.

Ao Professor Osvaldo Oliveira e ao Professor Valtencir Zucolotto, pelo curso de escrita científica voltado para artigos em inglês, que muito além de apresentar técnicas e conceitos para a escrita científica, apresentaram uma nova perspectiva sobre o que é um trabalho científico.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, em especial à Jussara, à Marisa, ao Daniel e ao Murilo, sempre dispostos a ajudar, apresentando respostas para todas as dúvidas sobre processos burocráticos; aos técnicos César, Rose, Rui Bertho e Odair, pelo auxílio e serviços prestados.

Aos funcionários da Marcenaria pelos serviços prestados, em especial ao Marcão e ao Jeremias.

Ao Professor Lino Misoguti e ao técnico André Romero do Grupo de Fotônica do IFSC, pelo acesso ao laboratório do grupo e pela ajuda com o monocromador.

Ao CNPq e ao Departamento de Engenharia Elétrica, pela bolsa de estudo concedida (Processo nº 130755/2015-0).

“Porque, quanto a mim, cheguei à conclusão de que, se a partir da juventude me tivessem ensinado todas as verdades cujas demonstrações procurei depois, e se eu não tivesse dificuldade alguma em aprendê-las, talvez nunca soubesse algumas outras, e ao menos nunca teria adquirido o hábito e a facilidade, que julgo possuir, para sempre descobrir outras novas, conforme me esforço em procurá-las.”

(René Descartes em “O Discurso do Método”)

Resumo

Loureiro, A. D. **Dispositivo para Medição e Teste de Transmitância Luminosa e Semafórica em Óculos de Sol de Acordo com a Norma Brasileira – ABNT NBR ISO 12312-1:2015**. 89 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

A classificação por categoria de 0 a 4 para óculos de sol determina quão claras ou escuras são suas lentes. A norma brasileira, ABNT NBR ISO 12312-1, exige, entre outros requisitos, testes de transmitância da luz visível em óculos de sol (categoria), para que estes sejam classificados como adequados ou não para direção de automóveis. Medidas do grau de escurecimento das lentes de um par de óculos de sol e da atenuação luminosa das luzes de sinais semafóricos são testes propostos para este item da norma. Porém, o público, em geral, não possui meios de testar seus próprios óculos. Um teste padrão de transmitância é trabalhoso, demorado e requer um espectrofotômetro e um profissional treinado. O objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo portátil capaz de realizar testes de transmitância luminosa e semafórica de acordo com a norma brasileira sendo rápido, preciso e intuitivo, realizando os testes de forma automática sem exigir do usuário qualquer treinamento prévio. Diferentemente dos dois sistemas anteriormente desenvolvidos no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO), para testes de transmitância, este dispositivo é embarcado e atende à norma atual lançada em 2015, que não estava em vigor na época em que os demais foram desenvolvidos. O desafio para se construir um sistema embarcado é a combinação de fontes luminosas e sensores necessária para se obter padrões espectrais similares aos da norma. Foi desenvolvido e construído um protótipo microcontrolado usando a combinação de um LED branco com o sensor TCS3472. Esta combinação gera quatro funções de ponderação distintas, que foram combinadas linearmente resultando em funções de ponderação próximas às da norma para as medições desejadas. Foram medidos transmitância luminosa e quocientes de atenuação visual para luzes semafóricas de 128 lentes de óculos de sol com o protótipo e com um padrão-ouro, o espectrofotômetro Cary 5000 da VARIAN. O método de Bland-Altman foi usado para análise de concordância entre ambos os métodos de medição. Para valores de transmitância luminosa, foram adotados 0,5 % e 6 % como valores a partir dos quais o valor absoluto do viés é significativo e a amplitude do intervalo de confiança, grande, respectivamente. Para valores dos quocientes de atenuação, 0,1 e 0,4; respectivamente. O viés não foi significativo para nenhuma das medições. O intervalo dos limites de concordância de 95 % foi amplo para medição de transmitância luminosa e do quociente para luz azul e estreito para as demais, considerando-se os valores-limites previamente definidos para vieses e para limites de concordância. Assim, dentro da tolerância definida, medições com o protótipo e com o padrão-ouro são equivalentes para quociente de atenuação para as luzes vermelha, amarela e verde. Apesar de nem todas as medições do protótipo serem equivalentes às do padrão-ouro, os resultados apresentaram boa exatidão, com apenas 5 das 128 lentes classificadas erroneamente quanto à adequação para direção (2 por transmitância luminosa, 1 por luz vermelha e 2 por luz azul). O protótipo proporciona ao público uma forma de obter informações sobre seus próprios óculos de sol e sobre a importância do uso de óculos adequados durante a direção de veículos.

Palavras-chave: Medida de transmitância embarcada. Óculos de sol. Transmitância luminosa. Transmitância semafórica. ABNT NBR ISO 12312-1. ISO 12312.

Abstract

Loureiro, A. D. **Device for Luminous and Traffic Lights Transmittance Evaluation in Sunglasses According Brazilian Standard – ABNT NBR ISO 12312-1:2015**. 89 p. Master Thesis – Sao Carlos School of Engineering, University of Sao Paulo, 2017.

Category rating ranging from 0 to 4 determines how light or dark sunglasses lenses are. Category measurements and how much traffic signal colors are attenuated are required tests by Brazilian standard ABNT NBR ISO 12312-1 and are known as transmittance tests. Brazilian standard also establishes requirements for sunglasses to be suitable for driving. However, people often do not have means to measure their own sunglasses. A standard transmittance test is laborious, time-consuming and it requires a spectrophotometer and a skilled technician. The goal of this study was to develop not only a single device capable to perform luminous and traffic light transmittance tests according to Brazilian standard, but also an easy-to-use, quick, accurate and portable device, which runs the tests by itself in a way anyone can operate it without any training. Unlike the two systems previously developed in the Ophthalmic Instrumentation Laboratory (LIO) for transmittance tests, that one does not contain a computer, but a microcontroller. Also, it complies with current standard, which has been released in 2015, and previous systems are based on 2013 standard version. A microcontrolled prototype was developed and built using a white LED and TCS3472 sensor combination. This combination generates four different weighting functions that were linearly combined resulting in weighting functions similar to the standard ones for luminous and traffic light transmittances. Using our prototype and a gold standard (VARIAN Cary 5000 spectrophotometer), luminous transmittance and relative attenuation quotients for traffic lights were measured in 128 sunglasses lenses. Bland-Altman method was used to assess concordance between both measurement methods. The bias was insignificant for all measurement and the limits of agreement were broad for luminous transmittance and for relative attenuation quotient for blue light detection, and narrow for all the others. Thus, within the predefined tolerance, prototype measurements are equivalent to gold standard ones for relative attenuation quotients for red, yellow and green light detection. Despite not all prototype measurements being equivalent to gold standard ones, results were accurate; only 5 from 128 lenses were incorrectly classified as to suitability for driving (2 for luminous transmittance, 1 for red light quotient and 2 for blue light quotient). Our device aims to provide to general public a mean to obtain information about their own sunglasses and the importance to use suitable sunglasses while driving.

Keywords: Embedded transmittance measurement. Sunglasses. Luminous transmittance. Traffic lights transmittance. ABNT NBR ISO 12312-1. ISO 12312.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da CIE (luz diurna), SD65(λ), definida na ISO 11664-2	26
Figura 2 - Função de visibilidade espectral para a visão com luz diurna, $V(\lambda)$, definida na ISO 11664-1	26
Figura 3 - Função de ponderação espectral para a transmitância luminosa, $W_v(\lambda)$	27
Figura 4 - Funções de ponderação espectral para a transmitância das luzes semafóricas, $W_{sinal}(\lambda)$	28
Figura 5 - Primeiro sistema. a) Vista frontal. b) Posicionamento dos óculos para medição	30
Figura 6 - Segundo sistema. Vista frontal e posicionamento dos óculos para medição	30
Figura 7 - Foto do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ	36
Figura 8 - Curva de emissão espectral do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ	37
Figura 9 - Foto do sensor SFH 5711	37
Figura 10 - Curva de sensibilidade do olho humano, $V(\lambda)$, e curva de sensibilidade espectral do sensor SFH 5711	38
Figura 11 - Potência de emissão do iluminante-padrão D65, SD65(λ), e do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ	39
Figura 12 - Desenho ilustrativo do aparato construído para testes com a combinação do LED branco com o sensor SFH 5711 com estruturas em destaque. a) Parte superior. b) Parte inferior. As estruturas em destaque são: 1. Fios ligados aos terminais positivo e negativo do LED, preso na parede interna do aparato oposta ao orifício, 2. Orifício para passagem da luz do LED para o sensor, 3. Espaço para posicionamento da lente a ser medida, 4. Orifício para passagem da luz até o sensor, 5. Sensor SFH 5711, 6. Barramento do sensor: alimentação e saída analógica de corrente	40
Figura 13 - Curva de sensibilidade espectral dos quatro canais do sensor TCS3472	41
Figura 14 - Leitura dos quatro canais do sensor TCS3472 para emissão espectral do LED branco através do monocromador	42
Figura 15 - Eficiência da grade de difração do monocromador por comprimento de onda	42
Figura 16 - Caixa base com display e caixas menores, onde se encontram o LED branco e o sensor TCS3472; o PCB principal, em um compartimento na parte inferior, não fica visível	43
Figura 17 - PCB principal do protótipo com o microcontrolador, RTC, módulo de som, pinos para programação e saídas para LED, sensor, display, caixas de som, cartão SD, leitura do estado da tampa.	44
Figura 18 - PCB do LED branco.	44
Figura 19 - Pinos do RTC DS1307, com encapsulamento DIP8	45
Figura 20 - Foto do módulo de cartão SD	45
Figura 21 - Foto do <i>display</i> sensível ao toque DWIN de 7"	46
Figura 22 - Foto do módulo de áudio WTV020SD-16P com um cartão micro SD inserido ...	47
Figura 23 - Pinos do microcontrolador ATmega328P, encapsulamento DIP28	48
Figura 24 - DFD do <i>software</i> do dispositivo	49
Figura 25 - Espectroscopia de 12 lentes de óculos de sol	51

Figura 26 - Ponderação da norma para transmitância luminosa e ponderação obtida pela combinação do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ com o sensor SFH 5711	52
Figura 27 - Ponderações espectrais obtidas a partir da combinação do LED branco com cada canal do sensor TCS3472.....	56
Figura 28 - Ponderação espectral obtida para transmitância luminosa sobreposta à da norma	57
Figura 29 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz vermelha sobreposta à da norma	57
Figura 30 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz amarela sobreposta à da norma	58
Figura 31 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz verde sobreposta à da norma	58
Figura 32 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz azul sobreposta à da norma	59
Figura 33 - Gráfico de média por diferença para valores de transmitância luminosa para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 12,9390; -0,4994; [-7,0984; 6,0996] e 0,9573, respectivamente.....	61
Figura 34 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz vermelha para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,2680; 0,0536; [-0,1415; 0,2487] e 0,9124, respectivamente.....	61
Figura 35 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz amarela para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,2560; 0,0909; [-0,0406; 0,2223] e 0,6856, respectivamente.....	62
Figura 36 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz verde para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,1590; -0,0523; [-0,1377; 0,0330] e 0,7162, respectivamente.....	62
Figura 37 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz azul para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,4270; 0,0216; [-0,2512; 0,2944] e 0,7854, respectivamente.....	63
Figura 38 - Foto do protótipo construído.....	64
Figura 39 - PCB principal do protótipo com o microcontrolador, RTC, módulo de som, pinos para programação e saídas para LED, sensor, display, caixas de som, cartão SD e leitura do estado da tampa.....	64
Figura 40 - PCB do LED branco que foi usado como fonte luminosa no protótipo.....	64
Figura 41 - Exemplo de tela de resultados do protótipo.....	65

Lista de tabelas

Tabela 1 - Requisitos de transmitância da norma.....	29
Tabela 2 - Melhores resultados obtidos por sistemas anteriormente desenvolvidos para transmitância luminosa e das luzes de sinais semafóricos	35
Tabela 3 - Valores de transmitância luminosa calculados com a equação (1) a partir dos dados da espectroscopia.....	52
Tabela 4 - RMSE e coeficiente de aderência (GFC) entre a ponderação da norma para transmitância luminosa e a obtida pela combinação do LED branco com o sensor SFH 5711	53
Tabela 5 - Valores de transmitância luminosa calculados com a ponderação da norma e com a ponderação teórica obtida pela combinação do LED branco com o sensor SFH 5711.....	53
Tabela 6 - Valores de tensão medidos com o aparato sobre o resistor de 33 k Ω	54
Tabela 7 - Valores de transmitância luminosa obtidos a partir da ponderação da norma em dados da espectroscopia e a partir de dados experimentais da combinação do LED branco com o sensor SFH 5711.....	55
Tabela 8 - Coeficientes das combinações lineares das ponderações da Figura 27 para aproximação das ponderações da norma	56
Tabela 9 - RMSE e coeficiente de aderência (GFC) entre as ponderações da norma para transmitância luminosa de das luzes semafóricas e as obtidas pela combinação do LED branco com o sensor TCS3472.....	59
Tabela 10 - Valores comparativos entre medidas com o protótipo e com o padrão-ouro.....	60
Tabela 11 - Valores tabelados na ISO 12311:2013 para $W_v(\lambda) = V(\lambda)SD_{65}(\lambda)$	75
Tabela 12 - Resultados experimentais do protótipo e do padrão-ouro.....	79

Lista de siglas

AD	analógico digital
CI	circuito integrado
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
DFD	Diagrama de Fluxo de Dados
GFC	coeficiente de aderência
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
I2C	<i>Inter-integrated circuit</i>
I/O	entrada/saída
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
LED	diodo emissor de luz
LIO	Laboratório de Instrumentação Oftálmica
PCB	placa de circuito impresso
RTC	relógio de tempo real
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta

Sumário

CAPÍTULO 1	23
1 Introdução.....	23
1.1 Motivação.....	23
1.2 Objetivos	24
CAPÍTULO 2	25
2 Fundamentos Teóricos.....	25
2.1 Norma ABNT NBR ISO 12312:2015	25
2.2 Sistemas desenvolvidos anteriormente no LIO	29
CAPÍTULO 3	33
3 Materiais e Métodos	33
3.1 Medidas de transmitância.....	33
3.2 Espectroscopia: medida de comparação.....	34
3.3 Regra de precisão proposta na norma para fabricantes	34
3.4 Arredondamento dos valores medidos	34
3.5 <i>Softwares</i> auxiliares.....	34
3.6 Resultados de sistemas anteriores	35
3.7 Análise de aproximação das funções de ponderação obtidas com as da norma ...	35
3.8 Combinação fonte luminosa e sensor.....	36
3.9 Protótipo.....	43
CAPÍTULO 4	51
4 Resultados.....	51
4.1 Combinação do LED branco com o sensor SFH 5711	51
4.2 Combinação do LED branco com o sensor TCS3472	55
4.3 Protótipo.....	63
CAPÍTULO 5	67
5 Discussão.....	67
Conclusão	69
Referências	71
Apêndices	73
Apêndice A.....	75
Valores tabelados na ISO 12311:2013 para $W_v(\lambda)=V(\lambda)SD65(\lambda)$	75

Apêndice B.....77

    Método de Bland-Altman.....77

Apêndice C.....79

    Resultados experimentais do protótipo e do padrão-ouro.....79

Apêndice D 83

    Placa Principal.....83

Apêndice E.....87

    Placa LED Branco.....87

CAPÍTULO 1

1 Introdução

1.1 Motivação

Óculos de sol são acessórios populares, usados pelo conforto visual, pela estética e pela proteção. Eles podem oferecer proteção e riscos ao usuário, por isso é importante que se possam identificar óculos não conformes e que se saiba a situação adequada para uso de cada tipo de par de óculos. Lentes que bloqueiam radiações solares danosas podem fornecer ao olho proteção eficiente contra estas (SCHALKA et al., 2014). Na literatura médica, é apresentada uma forte associação entre radiação ultravioleta (UV) solar e danos a estruturas oculares (YAM; KWOK, 2014). Lentes muito escuras que impeçam o reconhecimento de objetos e de luzes de sinais semafóricos rapidamente a uma distância segura são impróprias para uso durante a direção de veículos, pois podem levar a perigosas más interpretações (DAIN, 2003). Além disso, lentes, não necessariamente muito escuras, que atenuem uma luz de sinal semafórico excessivamente, ou muito mais do que outra, podem levar a equívocos quanto ao reconhecimento da sinalização de semáforos e também são inadequadas para uso durante direção de veículos (HOVIS, 2011). Durante crepúsculo ou à noite, apenas lentes bem claras não prejudicam a direção (ABNT, 2015).

As informações sobre os riscos do uso de óculos de sol impróprios para direção não são largamente difundidas para o público. Existem normas que definem requisitos mínimos que os óculos de sol devem atender para serem adequados para direção e usos recomendados para cada par de óculos de sol, dependendo da redução de luz que proporcionam. Porém, mesmo que o consumidor esteja informado dos riscos do uso de óculos de sol que não cumpram estes requisitos mínimos, esse normalmente não possui meios de testar seus próprios óculos. O teste padrão que é feito para atestar conformidade com a norma é demorado e exige um espectrofotômetro e um profissional com conhecimentos técnicos sobre a medição.

Existem muitos óculos ilegais no mercado que não passam por nenhum controle de qualidade, e mesmo óculos de economia formal, algumas vezes, não possuem as características anunciadas (DAIN, 2003; DONGRE; PAI; KHOPKAR, 2007). Existe, ainda, o risco de que após longo tempo de uso, características das lentes de óculos de sol sejam alteradas, tornando-se mais claras (LOUREIRO; GOMES; VENTURA, 2016). No Brasil, a norma para óculos de sol de uso geral vigente é a ABNT NBR ISO 12312-1:2015, e esta norma não é compulsória, ou seja, não é necessário que um par de óculos de sol atenda aos requisitos da norma para que entre no mercado brasileiro.

Foram desenvolvidos no Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO) anteriormente dois dispositivos capazes de testar óculos de sol e fornecer informações sobre a categoria das lentes (grau de escurecimento), a proteção UV e se esta proteção está de acordo com a norma

brasileira (MELLO; LINCOLN; VENTURA, 2014; MELLO, 2014). Ambos os dispositivos foram feitos antes da norma atual entrar em vigor e, por isso, contemplam uma norma que foi substituída, ABNT NBR 15111:2013. O primeiro dispositivo mede o grau de escurecimento e a proteção UV (MELLO; LINCOLN; VENTURA, 2014). Já o segundo dispositivo realiza também medições de transmitância das luzes de sinais semafóricos, mas existe um ponto percentual de incerteza que prejudica, em alguns casos, a diferenciação entre as categorias 3 e 4 (MELLO, 2014). Ademais, estes dispositivos não são portáteis nem embarcados. O controle de seu funcionamento e a interface com o usuário são feitos por meio de computadores.

1.2 Objetivos

Este trabalho, realizado no LIO, tem por objetivo o desenvolvimento de um protótipo embarcado para medição de transmitância em óculos de sol e avaliação de sua adequação para direção, segundo o item 5, da norma brasileira vigente, a ABNT NBR ISO 12312-1:2015, para uso de público em geral. A interface intuitiva permite ao usuário medir seus próprios óculos e obter informações sobre os mesmos.

CAPÍTULO 2

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Norma ABNT NBR ISO 12312:2015

A norma brasileira ABNT NBR ISO 12312-1:2015 especifica requisitos que óculos de sol de uso geral e *clip-ons* devem atender. Esta norma é um espelho da norma internacional ISO 12312-1:2013 e entrou em vigor em 05 de novembro de 2015, substituindo a norma ABNT NBR 15111:2013. A segunda parte da norma ISO, que contempla filtros para observação direta do Sol ainda será traduzida. As normas que descrevem os ensaios e o vocabulário da ABNT NBR ISO 12312-1 são a ISO 12311:2013 e a ISO 4007:2012, respectivamente, ambas ainda não traduzidas para o português.

O item 5 da ABNT NBR ISO 12312-1:2015 (Transmitância), no qual este trabalho se baseia para seu desenvolvimento, trata dos aspectos de medição do grau de escurecimento das lentes dos óculos de sol, ou seja, das categorias dos óculos, que variam de 0 até 4, em função de sua transmitância no intervalo visível do espectro eletromagnético (380 – 780 nm) e das medições de atenuação das cores do semáforo (vermelha, amarela, verde e azul) dessas lentes.

Assim sendo, a seguir estão descritos os requisitos necessários para estas medições, que são analisados pelo protótipo desenvolvido.

Medidas de transmitância

A transmitância luminosa ou visível, τ_V , é definida como a média da transmitância espectral da lente, $\tau_F(\lambda)$, entre 380 nm e 780 nm ponderada com a distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) (luz diurna) definido na ISO 11664-2, $S_{D65}(\lambda)$, e a função de visibilidade espectral para a visão com luz diurna definida na ISO 11664-1, $V(\lambda)$, e é calculada usando a equação (1) (ISO, 2013a).

$$\tau_V = \frac{\int_{380}^{780} \tau_F(\lambda) V(\lambda) S_{D65}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) S_{D65}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

As funções do iluminante-padrão D65 da CIE, $S_{D65}(\lambda)$, e de visibilidade espectral da visão diurna, $V(\lambda)$, são apresentadas na Figura 1 e na Figura 2, respectivamente.

Figura 1 - Distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da CIE (luz diurna), $S_{D65}(\lambda)$, definida na ISO 11664-2

Fonte: ISO (2013a)

Figura 2 - Função de visibilidade espectral para a visão com luz diurna, $V(\lambda)$, definida na ISO 11664-1

Fonte: ISO (2013a)

A função de ponderação espectral para a transmitância luminosa definida na norma, $W_V(\lambda) = V(\lambda)S_{D65}(\lambda)$, é apresentada na Figura 3 e seus valores (para λ variando de 380 nm a 780 nm com passo de 5 nm) são mostrados no Apêndice A (Tabela 11).

Figura 3 - Função de ponderação espectral para a transmitância luminosa, $W_V(\lambda)$

Fonte: ISO (2013a)

A transmitância da luz de sinalização de trânsito, τ_{sinal} , é definida como a média da transmitância espectral da lente, $\tau_F(\lambda)$, entre 380 nm e 780 nm ponderada com a distribuição espectral de uma fonte de luz semafórica (vermelha, amarela, verde ou azul), $E_{\text{sinal}}(\lambda)$, e a função de visibilidade espectral relativa da visão diurna, $V(\lambda)$, e é calculada usando a equação (2) (ISO, 2013a).

$$\tau_{\text{sinal}} = \frac{\int_{380}^{780} \tau_F(\lambda) V(\lambda) E_{\text{sinal}}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) E_{\text{sinal}}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

A norma que propõe os testes, ISO 12311, apresenta duas formas distintas para o cálculo de τ_{sinal} : usando como função de emissão espectral da fonte luminosa, $E_{\text{sinal}}(\lambda)$, função relativa à emissão espectral de lâmpadas incandescentes ou de diodos emissores de luz (LEDs). Porém, a norma que define os requisitos, ABNT NBR ISO 12312-1, apresenta como

requisitos apenas valores relativos aos cálculos feitos considerando lâmpadas incandescentes. Assim, neste trabalho, para o cálculo de τ_{sinal} , serão usados apenas os valores tabelados na norma ISO 12311 para o uso de lâmpadas incandescentes como fonte luminosa.

O quociente de atenuação visual relativa para reconhecimento de luz de trânsito, Q_{sinal} , é dado pela equação (3) e é calculado para os sinais vermelho, amarelo, verde e azul (ISO, 2013a).

$$Q_{\text{sinal}} = \frac{\tau_{\text{sinal}}}{\tau_V} \quad (3)$$

As funções de ponderação espectral para a transmitância das luzes semaforicas definidas na norma, $W_{\text{sinal}}(\lambda) = E_{\text{sinal}}(\lambda)V(\lambda)$, são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Funções de ponderação espectral para a transmitância das luzes semaforicas, $W_{\text{sinal}}(\lambda)$

Fonte: ISO (2013a)

Requisitos de transmitância

Dependendo da transmitância luminosa, lentes são classificadas em categorias diferentes (Tabela 1) (ABNT, 2015). Como a norma ABNT NBR ISO 12312-1 é aplicável apenas para lentes de uso geral e lentes com transmitância luminosa inferior a 3 % não fazem parte deste grupo por serem excessivamente escuras, estas lentes não são classificadas em nenhuma categoria. Para ser considerada adequada para direção de acordo com a norma brasileira, a

lente deve pertencer a categoria 0, 1, 2, ou 3, seu quociente de atenuação visual relativa para reconhecimento de luz de trânsito, Q , não pode ser inferior a 0,80 para luz de sinalização vermelha nem inferior a 0,60 para luzes de sinalização amarela, verde e azul e, ainda, a transmitância espectral para comprimentos de onda entre 475 nm e 650 nm não pode ser inferior a 20 % da transmitância luminosa (ABNT, 2015).

Tabela 1 - Requisitos de transmitância da norma

Categoria dos filtros	Transmitância luminosa (τ_V) (%)		Mínimo quociente de atenuação visual para luzes semaforicas (Q)			
	De	até	Vermelho	Verde	Azul	Amarelo
0	80,0	100	0,8	0,6	0,6	0,6
1	43,0	80,0				
2	18,0	43,0				
3	8,0	18,0				
4	3,0	8,0	-	-	-	-

Fonte: ABNT (2015)

Para que os óculos sejam adequados para direção no crepúsculo ou à noite, sua transmitância luminosa não pode ser inferior a 75 % (ABNT, 2015).

Uso recomendado em função da transmitância luminosa

Segundo a norma, para cada categoria de lentes de óculos de sol, há um uso recomendado. A categoria 0 é recomendada para situações em que haja muito poucos raios solares, sem Sol aparente, por oferecer atenuação luminosa muito baixa. A categoria 1 é para situações com poucos raios solares, Sol parcialmente aparente, por oferecer baixa atenuação luminosa. A categoria 2 é para uso geral, oferecendo boa redução dos raios solares. A categoria 3 é para situações de alta incidência de raios solares. Já a categoria 4 é para situações de incidência muito alta de raios solares, como mares, campos de neve, altas montanhas e desertos (ABNT, 2015).

2.2 Sistemas desenvolvidos anteriormente no LIO

Já foram desenvolvidos no LIO, além do dispositivo a ser apresentado neste trabalho, dois sistemas para testes de transmitância em óculos de sol. O primeiro em 2011, Figura 5, (MELLO; LINCOLN; VENTURA, 2014) e o segundo em 2014, Figura 6 (MELLO, 2014).

Figura 5 - Primeiro sistema. a) Vista frontal. b) Posicionamento dos óculos para medição

Fonte: (MELLO; LINCOLN; VENTURA 2014)

Figura 6 - Segundo sistema. Vista frontal e posicionamento dos óculos para medição

Fonte: MELLO (2014)

Evolução do sistema: medida de comparação

O segundo sistema desenvolvido, além de apresentar resultados com maior exatidão em relação à determinação das categorias dos óculos, com fontes luminosas e sensores com tecnologia mais moderna, fornecendo melhor aproximação das funções de ponderação da norma, contou ainda com medição dos quocientes de atenuação visual para luzes dos sinais semafóricos. Sendo assim, os resultados deste sistema serão comparados com os resultados do sistema atual para que se possa avaliar a evolução de um sistema para o outro. Serão adotados, no presente trabalho, os mesmos critérios de avaliação quantitativa usados no

anterior, para que se possa, ao final, confrontar os resultados de ambos e se discutir esta evolução.

CAPÍTULO 3

3 Materiais e Métodos

3.1 Medidas de transmitância

Medidas de transmitância de radiações têm como elementos básicos uma fonte luminosa e um sensor. A distribuição espectral da fonte luminosa e a resposta espectral do sensor ponderam cada comprimento de onda na medida.

Um monocromador permite, idealmente, que, a partir de uma fonte luminosa, apenas um comprimento de onda, previamente escolhido, atinja o alvo desejado. Esta escolha do comprimento de onda que atinge o alvo é possível devido à grade de difração, através da qual a luz passa, e, que atenua diferentemente a luz dependendo do comprimento de onda escolhido.

Medidas realizadas com fotosensores são numericamente proporcionais à integral do produto termo-a-termo da emissão espectral incidente no sensor com sua resposta espectral. Para medições de transmitância em amostras translúcidas, por exemplo, em lentes, é necessária a medição da linha de base (*baseline*), ou seja, medição da resposta do sensor à fonte luminosa sem a presença da amostra. A linha de base fornece a proporcionalidade entre a medida e a integral do produto da emissão espectral com a resposta espectral. Assim, valores de transmitância são obtidos pela razão da medida com o objeto entre a fonte luminosa e o sensor pela medida sem o objeto (a linha de base). Estas medições ponderam a transmitância espectral da amostra com uma função espectral numericamente igual ao produto termo-a-termo da emissão espectral da fonte luminosa com a resposta espectral do sensor.

Em espectrofotômetros, que possuem monocromador interno, são realizadas medições de transmitância para cada comprimento de onda desejado, selecionando da fonte luminosa uma faixa espectral estreita (idealmente apenas um comprimento de onda). O produto termo-a-termo da emissão espectral com a resposta espectral do sensor só possui os termos dos comprimentos de onda presentes na emissão, e, com a medição da linha de base, são ajustadas as diferenças na resposta espectral do sensor de um comprimento de onda para outro. Desta forma, o resultado final medido com espectrofotômetro é a transmitância espectral do objeto, $\tau_F(\lambda)$. E, para se obter valores de transmitância segundo a norma, deve-se ponderar esse resultado final com a função de ponderação adequada para cada comprimento de onda, com intervalo de 5 nm, conforme equação (1) ou (2).

Uma forma de se realizar medições com ponderação similar à da norma consiste em usar uma fonte luminosa e um sensor tais que o produto da emissão espectral da fonte luminosa com a resposta espectral do sensor seja próximo à função de ponderação tabelada na norma, reproduzida no Apêndice A (Tabela 11).

Outra forma de medição, usada no dispositivo desenvolvido, consiste em combinar linearmente diferentes medidas realizadas com diferentes ponderações de modo a se obter uma ponderação resultante similar à da norma.

No dispositivo, para facilitar a alocação interna dos componentes, as medições de transmitância serão realizadas apenas nas lentes direitas dos óculos testados. Esta prática de medir apenas uma lente e fornecer resultados para as duas, apesar de ser uma limitação do sistema, ao considerar que elas possuem transmitâncias idênticas, não é problemática, uma vez que ambas foram confeccionadas juntas pelo mesmo método, com os mesmos materiais e objetivando propriedades ópticas iguais.

3.2 Espectroscopia: medida de comparação

As lentes dos óculos medidos no dispositivo foram previamente medidas no espectrofotômetro Cary 5000 da VARIAN para se obter medidas com o padrão-ouro para comparações. Antes de qualquer medição de transmitância, as lentes são limpas com álcool isopropílico para remoção de possíveis impurezas que poderiam alterar sua transmitância.

3.3 Regra de precisão proposta na norma para fabricantes

A norma lista estes requisitos como desvio-limite para valores declarados pelos fabricantes de lentes: o desvio-limite para valores de transmitância luminosa não pode ultrapassar $\pm 3 \%$ absoluto para as categorias de 0 a 3 e $\pm 30 \%$ do valor de transmitância para a categoria 4; sobreposições entre as categorias de 0 a 3 não podem ser superiores a $\pm 2 \%$ absoluto do valor de transmitância luminosa e não pode haver sobreposições entre as categorias 3 e 4. Seria interessante que o sistema de medidas atendesse a esta margem.

3.4 Arredondamento dos valores medidos

Os valores de transmitância luminosa serão apresentados com uma casa decimal. Será feito este procedimento pelo fato do algarismo da unidade ser duvidoso, o que não representa problemas pela regra de precisão proposta para fabricantes (Seção 3.3), e para minimizar erros de sobreposição entre categorias.

Os valores dos quocientes de atenuação visual serão apresentados com duas casas decimais.

3.5 Softwares auxiliares

Para desenho de placa de circuito impresso (PCB), foi usado o *software* livre KiCad v.4.0.7. Para obtenção de pontos em gráficos fornecidos em folhas de dados de fabricantes, foi usado o *software* livre Engauge Digitizer v.5.2. Para simulação numérica, foi usado o *software* livre GNU/Octave v.3.8.1 (EATON; BATEMAN; HAUBERG, 2009). Para os desenhos tridimensionais, foi usado o *software* livre OpenSCAD v.2015.03-1.

3.6 Resultados de sistemas anteriores

Dos sistemas anteriormente desenvolvidos, a melhor aproximação para a função de ponderação para a transmitância luminosa foi obtida com o LED branco Golden Dragon da Osram e o sensor SFH 5711; para a transmitância das luzes de sinais semafóricos, com o LED branco Golden Dragon da Osram, o sensor TCS3771 e um filtro infravermelho. Os valores de erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de aderência (GFC) para estas aproximações são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Melhores resultados obtidos por sistemas anteriormente desenvolvidos para transmitância luminosa e das luzes de sinais semafóricos

	RMSE	GFC
τ_V	0,0549	0,9922
τ_{verm}	0,1470	0,9159
τ_{amar}	0,2988	0,6634
τ_{verde}	0,1454	0,9091
τ_{azul}	0,1330	0,9083

Fonte: MELLO (2014)

3.7 Análise de aproximação das funções de ponderação obtidas com as da norma

Erro quadrático médio e coeficiente de aderência

Empregaram-se as mesmas ferramentas estatísticas, para análise da aproximação das funções de ponderação obtidas com as da norma, usadas no último sistema desenvolvido no LIO com a mesma finalidade (MELLO, 2014). São elas: erro quadrático médio (RMSE) e coeficiente de aderência (GFC); calculados conforme as equações (5) e (6), respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x(\lambda)_i - y(\lambda)_i)^2}{n}}, \quad (5)$$

$$GFC = \frac{|\sum_j x(\lambda_j)y(\lambda_j)|}{\sqrt{\sum_j x(\lambda_j)^2} \sqrt{\sum_j y(\lambda_j)^2}} \quad (6)$$

onde $x(\lambda)$ e $y(\lambda)$ são a função de ponderação da norma e a que está sendo avaliada, respectivamente. Quanto menor o RMSE e quanto mais próximo de um o GFC, melhor é a combinação. Para $x(\lambda) = y(\lambda)$, $RMSE = 0$ e $GFC = 1$.

Método de Bland-Altman

Os valores obtidos pelos cálculos de transmitância a partir das medidas realizadas no ponto de referência (centro geométrico) das lentes testadas com o espectrofotômetro foram comparados com as medidas feitas com o dispositivo pelo Método de Bland-Altman para se verificar concordância entre os métodos de medição. Este método é descrito no Apêndice B.

Para os valores de transmitância luminosa, em porcentagem, foram adotados 0,5 e 6 como valores a partir dos quais o valor absoluto do viés é significativo e a amplitude do intervalo de confiança, grande, respectivamente. Para os valores dos quocientes de atenuação visual das luzes de sinais semafóricos; 0,1 e 0,4; respectivamente.

3.8 Combinação fonte luminosa e sensor

3.8.1 LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ e sensor SFH 5711

LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ

O LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ da OSRAM, Figura 7, apresenta temperatura de cor de 6500 K e sua curva de emissão espectral normalizada é apresentada na Figura 8.

Figura 7 - Foto do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ

Fonte: OSRAM (2008)

Figura 8 - Curva de emissão espectral do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ

Fonte: OSRAM (2008)

Sensor SFH 5711

O fotodiodo SFH 5711 da OSRAM, Figura 9, apresenta sensibilidade espectral semelhante a do olho humano, $V(\lambda)$, Figura 10, correção de temperatura, saída logarítmica de corrente (de 5 a 50 μA) e possui um amplificador interno que requer alimentação (de 2,3 V a 5,5 V).

Figura 9 - Foto do sensor SFH 5711

Fonte: OSRAM (2014)

Figura 10 - Curva de sensibilidade do olho humano, $V(\lambda)$, e curva de sensibilidade espectral do sensor SFH 5711

Fonte: OSRAM (2014, adaptado), ISO (2013a, adaptado)

A saída em corrente, I_0 , do sensor segue a equação (7).

$$I_0 = S \log\left(\frac{E_V}{E_0}\right), \quad (7)$$

onde $S = 10 \mu A$, $E_0 = 1 \text{ lx}$ e E_V é a iluminância incidente no sensor.

Combinação

Esta combinação foi usada para medição de transmitância luminosa. Um resistor de 33 $k\Omega$, com um capacitor de 1 μF em paralelo, foi colocado em sua saída, para conversão de sua saída em corrente para tensão, e um conversor analógico digital (AD) ADS1110 envia a saída convertida para sinal digital para o microcontrolador.

O sensor SFH 5711 tem resposta espectral próxima à do olho humano, $V(\lambda)$, Figura 10.

O LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ tem temperatura de cor 6500 K, tendo espectro de emissão que se aproxima do iluminante-padrão D65 da CIE, $S_{D65}(\lambda)$, na região espectral relevante da função de ponderação para a transmitância luminosa, $W_V(\lambda)$, de 500 nm a 625 nm, Figura 11. Apesar de seu espectro de emissão diferir bastante do do iluminante-padrão D65 na região espectral de 380 nm a 500 nm, isto não acarreta problemas, uma vez que o sensor tem resposta quase nula nesta região.

Desta forma, é esperado que a combinação deste sensor com este LED forneça uma ponderação próxima da tabelada na norma para a transmitância luminosa.

Figura 11 - Potência de emissão do iluminante-padrão D65, $S_{D65}(\lambda)$, e do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ

Fonte: OSRAM (2008, adaptado), ISO (2013a, adaptado)

Foram medidas 12 lentes com o espectrofotômetro Cary 5000 e calculados seus valores de transmitância luminosa. Em seguida, avaliou-se teoricamente o resultado que a combinação do LED branco com o sensor SFH 5711 deveria produzir. Por fim, construiu-se o aparato da Figura 12, para testes em bancada, obtendo-se resultados experimentais dessa combinação.

Figura 12 - Desenho ilustrativo do aparato construído para testes com a combinação do LED branco com o sensor SFH 5711 com estruturas em destaque. a) Parte superior. b) Parte inferior. As estruturas em destaque são: 1. Fios ligados aos terminais positivo e negativo do LED, preso na parede interna do aparato oposta ao orifício, 2. Orifício para passagem da luz do LED para o sensor, 3. Espaço para posicionamento da lente a ser medida, 4. Orifício para passagem da luz até o sensor, 5. Sensor SFH 5711, 6. Barramento do sensor: alimentação e saída analógica de corrente.

Fonte: os autores

O aparato é constituído de uma parte superior, composta por uma câmara com um LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ e um orifício, e de uma parte inferior, composta por um espaço para posicionamento de uma lente para medição, um orifício e um sensor SFH 5711. O aparato é colocado em posição de medida quando a parte superior está sobre o inferior de forma que o LED, os orifícios e o sensor fiquem alinhados.

Foram calculados ainda, o RMSE e o coeficiente de aderência (GFC) entre a curva teórica de ponderação da combinação e a curva de ponderação tabelada na norma para a transmitância luminosa.

3.8.2 LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ e sensor TCS3472

Sensor TCS3472

O sensor TCS3472 da AMS-TAOS USA Inc. possui quatro canais para leitura de intensidade luminosa (*Clear, Red, Green e Blue*), com ponderações diferentes para cada um conforme mostrado na Figura 13. Possui comunicação *Inter-integrated circuit* (I2C) com tensão de barramento e de alimentação de 3,3 V.

Figura 13 - Curva de sensibilidade espectral dos quatro canais do sensor TCS3472

Fonte: AMS-TAOS USA Inc. (2013)

Combinação

Esta combinação foi usada para medição de transmitância luminosa e das luzes semafóricas.

Com o monocromador Acton Spectra Pro 150 do Grupo de Fotônica do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), foram medidas as respostas de cada um dos quatro canais do sensor TCS3472 para os comprimentos de onda de 370 nm até 800 nm da emissão espectral do LED branco através de sua grade de difração, com passo de 5 nm. Estas respostas estão apresentadas na Figura 14.

Para se obter a ponderação gerada pela combinação do LED branco com cada canal do sensor, foi dividida das curvas da Figura 14 a eficiência da grade de difração cuja curva, traçada a partir de pontos obtidos de curva fornecida pelo fabricante, é mostrada na Figura 15. Como a emissão do LED não é polarizada, foi dividida a média da eficiência da grade para o plano S e P.

Figura 14 - Leitura dos quatro canais do sensor TCS3472 para emissão espectral do LED branco através do monocromador

Fonte: os autores

Figura 15 - Eficiência da grade de difração do monocromador por comprimento de onda

Fonte: os autores

Apesar de as ponderações da combinação do LED branco com o sensor TCS3472 não se aproximarem das desejadas, isto não apresenta problemas: esta combinação fornece quatro ponderações conhecidas e distintas, e, a partir de combinações lineares destas ponderações, foram geradas ponderações que se aproximam das tabeladas na norma, conforme a Figura 3 e a Figura 4. E o RMSE e o coeficiente de aderência (GFC) entre as ponderações obtidas e as da norma foram calculados.

Foram medidas 16 lentes com o espectrofotômetro Cary 5000 e calculados seus valores de transmitância luminosa e dos quocientes de atenuação visual para luzes de sinais semafóricos. Em seguida, avaliou-se teoricamente o resultado que a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 deveria produzir. Por fim, obtiveram-se resultados experimentais para esta combinação com testes em bancada.

Foram calculados ainda, o RMSE e o coeficiente de aderência (GFC) entre a curva teórica de ponderação da combinação e a curva de ponderação tabelada na norma para a transmitância luminosa e das luzes semafóricas. Além disso, as medidas experimentais foram analisadas pelo Método de Bland-Altman.

3.9 Protótipo

3.9.1 *Hardware* do dispositivo

O protótipo desenvolvido consiste em:

- Caixa-base: com suporte para o *display*, o PCB principal e caixas menores, onde se encontram o LED e o sensor TCS3472, Figura 16;
- PCB principal: com um relógio de tempo real (RTC) DS1307, um módulo de áudio WTV020SD-16P, um módulo de cartão SD, caixas de som, um *display* de 7" e uma chave para detectar se o visor está fechado, Figura 17;
- PCB do LED branco, Figura 18.

Figura 16 - Caixa base com *display* e caixas menores, onde se encontram o LED branco e o sensor TCS3472; o PCB principal, em um compartimento na parte inferior, não fica visível.

Fonte: os autores

Figura 17 - PCB principal do protótipo com o microcontrolador, RTC, módulo de som, pinos para programação e saídas para LED, sensor, display, caixas de som, cartão SD, leitura do estado da tampa.

Fonte: os autores

Figura 18 - PCB do LED branco.

Fonte: os autores

RTC DS1307

O CI DS1307 da DALLAS SEMICONDUCTOR, Figura 19, é um RTC com comunicação I2C e alimentação de 5 V. Faz contagem de tempo (dia, mês, ano, dia da semana, hora, minuto, segundo) com ajuste automático para meses com menos de 31 dias e anos bissextos até 2100. Por não possuir cristal interno exige um externo de 32,768 kHz.

Por possuir um circuito sensor de energia que detecta falha na alimentação do CI e a alterna automaticamente para bateria (entre 2 e 3,5 V), continua contando o tempo mesmo com a placa em que se encontra desligada. Com consumo inferior a 500 nA, uma bateria CR2032 (220 mAh), por exemplo, dura mais de 5 décadas.

Figura 19 - Pinos do RTC DS1307, com encapsulamento DIP8

Fonte: DALLAS SEMICONDUCTOR (2015)

Este RTC foi usado para fornecer data e hora para os *logs* salvos em cartão SD.

Módulo de cartão SD

O módulo de cartão SD da Figura 20 tem comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI) e é alimentado com 5 V. Permite escrita e leitura de arquivos em um cartão micro SD e não requer nenhum componente externo ao módulo.

Figura 20 - Foto do módulo de cartão SD

Fonte: os autores

Este módulo é usado para escrita de arquivos apenas. São gravados *logs* contendo os valores medidos para os óculos testados assim como a data e o horário das medidas. Estes dados serão futuramente analisados para se obter informações dos óculos usados pelo público.

Os dados são escritos em um único arquivo de texto, `dados.txt`, sendo cada linha deste arquivo relativa a um par de óculos. Os seguintes dados são salvos em sequência na mesma linha separados apenas por um caractere “|”:

- dia/mês/ano
- hora:minuto:segundo
- média de medidas do canal *clear* do TCS3472 (medida dividida por *baseline*)
- média de medidas do canal vermelho do TCS3472 (medida dividida por *baseline*)
- média de medidas do canal verde do TCS3472 (medida dividida por *baseline*)
- média de medidas do canal azul do TCS3472 (medida dividida por *baseline*)

Display DWIN 7” TFT 800x480

O *display* TFT da DWIN Technology de 7” usado, Figura 21, é sensível ao toque, tem resolução de 800 por 480 pontos, controlador próprio, 16 bits de cores, comunicação serial com tensão de barramento e alimentação de 5 V.

Figura 21 - Foto do *display* sensível ao toque DWIN de 7”

Fonte: DWIN TECHNOLOGY (2014)

Módulo de áudio WTV020SD-16P

O módulo de áudio WTV020SD-16P da Figura 22 é alimentado com 3,3 V e pode ser controlado de modo paralelo ou serial, ambos com tensão de barramento 3,3 V. Na comunicação com módulo no modo serial, além da alimentação e da saída de áudio, quatro pinos do módulo são usados: pino 1 *reset*, pino 10 dados, pino 7 *clock* e pino 15 *busy*. O módulo lê faixas de áudio com extensão AD4 salvas em um cartão micro SD inserido nesse e tem uma saída de áudio.

Figura 22 - Foto do módulo de áudio WTV020SD-16P com um cartão micro SD inserido

Fonte: os autores

A comunicação do protótipo com o usuário é toda feita por meio deste módulo e do *display*.

Microcontrolador ATmega328P

O ATmega328P da ATMEL é um microcontrolador de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada, possui 32 KB de memória *flash*, 1 KB de memória EEPROM e 2 KB de memória RAM, tem retenção de dados de 20 anos a 85 °C e de 100 anos a 25 °C. Possui 28 pinos sendo 23 entrada/saída (I/O) programáveis, tensão de operação de 1,8 V a 5,5 V, temperatura de operação de -40 °C a 85 °C e frequência de operação de até 20 MHz. Possui ainda, dois *timers*/contadores de 8 bits, um de 16 bits, RTC, seis canais de PWM, seis canais de conversores AD de 10 bits, uma USART, uma SPI e um comparador analógico. A corrente máxima por pino de I/O é de 40 mA e de alimentação 200 mA.

Figura 23 - Pinos do microcontrolador ATmega328P, encapsulamento DIP28

Fonte: ATMEL (2009)

Este microcontrolador foi usado com o *bootloader Optiboot* para Arduino, que ocupa 512 B da memória *flash*. Foi usado um cristal de 16 MHz.

3.9.2 Plataforma de desenvolvimento

Para o desenvolvimento do *software* do microcontrolador ATmega328P, em linguagem C++, foi utilizado o *software* livre **Arduino Software v.1.6.7**, um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) escrito em Java, multiplataforma (Linux, Mac OS X e Windows) que conta com editor de texto, compilador, programador e um monitor serial.

3.9.3 Software do dispositivo

Um Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) do *software* é mostrado na Figura 24 e a especificação dos processos está a seguir, apresentando o funcionamento do *software*.

Figura 24 - DFD do software do dispositivo

Fonte: os autores

Especificação dos Processos

- 1. Leitura *baseline*:** Com o dispositivo em modo de espera, quando um usuário seleciona a função de iniciar medidas, o dispositivo faz uma calibração inicial medindo 1024 vezes e salvando a média da linha de base (*baseline*) para os quatro canais do sensor TCS3472 em *b_4_canais*, e solicita, por meio de mensagens visuais (*display*) e sonoras (módulo de áudio), que o usuário posicione seus óculos de sol no protótipo e feche a tampa;
- 2. Leitura medida:** Quando o usuário seleciona a função de prosseguir com a medição, após inserir seus óculos, o dispositivo realiza 1024 medições e armazena a média em *m_4_canais* para os quatro canais do sensor;
- 3. Cálculo medida:** Faz, então, o cálculo dos valores de transmitância luminosa e dos quocientes de atenuação semafóricos para as lentes dos óculos inseridos, a partir das medidas dos quatro canais do sensor e salva os resultados finais em *medidas_finais*;
- 4. Armazena medida:** Armazena no cartão SD as variáveis de medida e a data e o horário da medição;
- 5. Exibe resultados:** Informa os resultados calculados para transmitância luminosa, categoria e quocientes de atenuação semafóricos por meio do display e do módulo de áudio.

CAPÍTULO 4

4 Resultados

Como descrito no capítulo anterior, foram testadas combinações usando o LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ tanto com o sensor SFH 5711 como com o sensor TCS3472, e um protótipo foi desenvolvido com a combinação que usa o sensor TCS3472. A seguir, serão analisados os resultados destas combinações.

4.1 Combinação do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ com o sensor SFH 5711

O gráfico da Figura 25 apresenta a espectroscopia de 12 lentes medidas com o espectrofotômetro Cary 5000.

Figura 25 - Espectroscopia de 12 lentes de óculos de sol

Fonte: os autores

A partir dos dados da espectroscopia destas lentes, foram calculados seus valores de transmitância luminosa usando a equação (1). Estes valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de transmitância luminosa calculados com a equação (1) a partir dos dados da espectroscopia

Lente	τ_v (%)	Categoria
LE126	24,3956	2
LE127	18,6787	2
LE128	17,1498	3
LE054	13,3603	3
LE262	11,1696	3
LE191	10,7811	3
LE198	9,2763	3
LE240	4,2925	4
LE244	3,0505	4
LE237	3,0154	4
LE230	2,7689	—
LE232	2,5379	—

Fonte: os autores

4.1.1 Resultados teóricos

A combinação do LED branco com o sensor SFH 5711 gera ponderação que é numericamente igual ao produto termo a termo da emissão espectral do LED com a resposta espectral do sensor. O gráfico desta nova ponderação sobreposto ao gráfico da ponderação da norma para transmitância luminosa é mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Ponderação da norma para transmitância luminosa e ponderação obtida pela combinação do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ com o sensor SFH 5711

Fonte: os autores

Foram calculados o RMSE e o coeficiente de aderência (GFC) entre a curva de ponderação da norma e a curva de ponderação obtida pela combinação do LED branco com o sensor SFH 5711, Tabela 4.

Tabela 4 - RMSE e coeficiente de aderência (GFC) entre a ponderação da norma para transmitância luminosa e a obtida pela combinação do LED branco com o sensor SFH 5711

RMSE	GFC
0,0855	0,9825

Fonte: os autores

Com a nova ponderação obtida foram calculados os valores de transmitância luminosa das lentes medidas. Estes resultados, seus erros em relação ao cálculo com a ponderação da norma e os valores calculados com a ponderação da norma são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de transmitância luminosa calculados com a ponderação da norma e com a ponderação teórica obtida pela combinação do LED branco com o sensor SFH 5711

Lente	Ponderação da norma (%)	Ponderação teórica (%)	Erro absoluto (%)	Erro % (%)
100%	100,0000	100,0000	0,0000	0,0000
LE126	24,3956	25,0746	0,6789	2,7831
LE127	18,6787	19,1164	0,4377	2,3435
LE128	17,1498	17,7208	0,5710	3,3296
LE054	13,3603	13,8888	0,5286	3,9562
LE262	11,1696	11,8255	0,6560	5,8728
LE191	10,7811	11,0507	0,2696	2,5005
LE198	9,2763	9,8488	0,5725	6,1717
LE240	4,2925	4,0290	-0,2635	-6,1395
LE244	3,0505	2,9074	-0,1431	-4,6913
LE237	3,0154	2,8631	-0,1523	-5,0503
LE230	2,7689	2,6298	-0,1391	-5,0252
LE232	2,5379	2,4143	-0,1236	-4,8698
0%	0,0000	0,0000	0,0000	—

Fonte: os autores

Em duas lentes (LE237 e LE244), os valores de categoria calculados com a ponderação da norma diferiram dos calculados com a nova ponderação, mas sem desrespeitar a regra de precisão proposta para fabricantes (Seção 3.3).

4.1.2 Resultados experimentais

Com o aparato da Figura 12, que contem o LED branco e o sensor SFH 5711, as mesmas 12 lentes foram medidas, fornecendo como saída no resistor de 33 k Ω os valores de tensão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de tensão medidos com o aparato sobre o resistor de 33 k Ω

Lente	Tensão (V)
100%	1,130
LE126	0,937
LE127	0,901
LE128	0,888
LE054	0,856
LE262	0,838
LE191	0,828
LE198	0,811
LE240	0,694
LE244	0,650
LE237	0,645
LE230	0,636
LE232	0,625
0%	0,000

Fonte: os autores

A equação que descreve a saída do sensor SFH 5711, apresentada na equação (7), é dada por: $I_0 = S \log(E_V/E_0)$. Portanto, a equação que fornece a iluminância no sensor a partir da tensão de saída é da forma: $E_V = c \cdot \exp(\alpha V)$. Com os valores de tensão da Tabela 6, obteve-se a equação (8).

$$E_V = 0,0283 \exp(7,230V), \quad (8)$$

onde V é a tensão sobre o resistor de 33 k Ω .

Como $\tau_V = E_V/E_{V100\%}$ e $E_{V100\%} = 0,0283 \exp(7,230 \cdot 1,13)$:

$$\tau_V = c \exp(7,230V), \text{ em porcentagem} \quad (9)$$

O parâmetro c da equação (9) é ajustado durante a calibração para que a leitura seja 100 % na situação na qual não há lente entre o LED e o sensor. O valor de c é arredondado até quatro casas decimais; no caso dos dados da Tabela 7, $c = 0,0283$.

Na Tabela 7 são mostrados os valores de transmitância luminosa das 12 lentes calculados com a ponderação da norma e com a ponderação experimental da combinação do LED branco com o sensor SFH 5711. Os valores obtidos com a ponderação experimental arredondados seguindo a regra descrita na Seção 3.1 e o erro destes valores em relação aos valores calculados com a ponderação da norma também estão nesta tabela.

Tabela 7 - Valores de transmitância luminosa obtidos a partir da ponderação da norma em dados da espectroscopia e a partir de dados experimentais da combinação do LED branco com o sensor SFH 5711

Lente	Ponderação da norma em dados da espectroscopia (%)	Ponderação experimental do aparato (%)	Resultados experimentais arredondados (%)	Erro experimental (absoluto) (%)	Erro experimental (%)
100%	100,0000	99,984	100	0,0000	0,0000
LE126	24,3956	24,770	25	0,6044	2,4773
LE127	18,6787	19,093	19	0,3213	1,7202
LE128	17,1498	17,381	17	-0,1498	-0,8732
LE054	13,3603	13,791	14	0,6397	4,7884
LE262	11,1696	12,108	12	0,8304	7,4349
LE191	10,7811	11,263	11	0,2189	2,0306
LE198	9,2763	9,961	10	0,7237	7,8018
LE240	4,2925	4,275	4,3	0,0075	0,1738
LE244	3,0505	3,110	3,1	0,0495	1,6212
LE237	3,0154	3,000	3,0	-0,0154	-0,5098
LE230	2,7689	2,811	2,8	0,0311	1,1233
LE232	2,5379	2,596	2,6	0,0621	2,4473
0%	0,0000	0,028	0,0	0,0000	-

Fonte: os autores

Valores de categoria idênticos aos calculados com a ponderação da norma, para as 12 lentes, foram obtidos experimentalmente com a combinação do LED branco com o sensor SFH 5711.

4.2 Combinação do LED branco LUW W5AM-LXLY-6P7RZ com o sensor TCS3472

Usando monocromador Acton Spectra Pro 150, foram medidas, com o sensor TCS3472, as funções de ponderação da combinação do LED branco com o próprio sensor, Figura 27.

Figura 27 - Ponderações espectrais obtidas a partir da combinação do LED branco com cada canal do sensor TCS3472

Fonte: os autores

4.2.1 Resultados teóricos

Com estas quatro ponderações, Figura 27, foram feitas combinações lineares para se obter ponderações espectrais próximas às da norma para transmitância luminosa e das luzes semafóricas. Os coeficientes das combinações lineares estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes das combinações lineares das ponderações da Figura 27 para aproximação das ponderações da norma

termo	$\tau_V(a_i)$	$\tau_{verm}(a_i)$	$\tau_{amar}(a_i)$	$\tau_{verde}(a_i)$	$\tau_{azul}(a_i)$
a_1 .LED * <i>clear</i>	0,0633	-4,0148	4,5954	-2,5623	-10,1167
a_2 .LED * vermelho	0,2273	2,4912	-0,7140	0,6462	2,7069
a_3 .LED * verde	0,8551	1,0621	-1,1288	2,2351	4,5035
a_4 .LED * azul	-0,1457	1,4615	-1,7526	0,6810	3,9063

Fonte: os autores

As ponderações obtidas a partir das combinações lineares sobrepostas às da norma para transmitância luminosa e das luzes semafóricas vermelha, amarela, verde e azul são mostradas nas Figuras 28, 29, 30, 31 e 32, respectivamente.

Figura 28 - Ponderação espectral obtida para transmitância luminosa sobreposta à da norma

Fonte: os autores

Figura 29 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz vermelha sobreposta à da norma

Fonte: os autores

Figura 30 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz amarela sobreposta à da norma

Fonte: os autores

Figura 31 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz verde sobreposta à da norma

Fonte: os autores

Figura 32 - Ponderação espectral obtida para transmitância da luz azul sobreposta à da norma

Fonte: os autores

Foram calculados o RMSE e coeficiente de aderência (GFC) entre as curvas de ponderação da norma e as curvas de ponderação obtidas pela combinação do LED branco com o sensor TCS3472, Tabela 9.

Tabela 9 - RMSE e coeficiente de aderência (GFC) entre as ponderações da norma para transmitância luminosa de das luzes semafóricas e as obtidas pela combinação do LED branco com o sensor TCS3472

	RMSE	GFC
τ_V	0,0720	0,9853
τ_{verm}	0,1167	0,9232
τ_{amar}	0,0694	0,9854
τ_{verde}	0,0468	0,9900
τ_{azul}	0,2196	0,7551

Fonte: os autores

4.2.2 Resultados experimentais

Foram medidos os valores de transmitância luminosa e dos coeficientes de atenuação visual para as luzes semafóricas, para 128 lentes, usando o LED branco, o sensor TCS3472 e os coeficientes das combinações lineares da Tabela 8. Estes valores, assim como os calculados com a ponderação da norma são mostrados no Apêndice C (Tabela 12).

Das lentes medidas, nenhuma é de categoria 0; 2 são de categoria 1; 67 são de categoria 2; 40 são de categoria 3; 16 são de categoria 4 e 3 não possuem categoria (possuem $\tau_V \leq 3\%$).

A regra de precisão proposta para fabricantes (Seção 3.3), que diz respeito à transmitância luminosa, não foi atendida. Em 34 lentes de categorias entre 0 e 3, o erro absoluto na medida de transmitância luminosa foi superior a 3 % (destas, em três houve sobreposições entre categorias com erro superior a 2 %). Nas de categoria 4, nenhum erro foi superior a 30 % do valor da transmitância luminosa. E duas lentes de categoria 3 foram classificadas como categoria 4.

Em 17 lentes (LE052, LE155, LE158, LE175, LE267, LD121, LD098, LE177, LE311, LD045, LE045, LE021, LE157, LE242, LE341, LE377 e LE149), a categoria foi medida incorretamente, com erros nos valores de transmitância luminosa de 2,261 %; 1,043 %; 1,682 %; 5,271 %; 12,939 %; 0,853 %; 6,785 %; 11,828 %; 0,118 %; 4,087 %; 5,893 %; 6,453 %; 4,371 %; 2,159 %; 10,661 %; 0,560 % e 2,076 %, respectivamente.

Em duas lentes (LE158 e LE149), a adequação para direção, pelo critério da transmitância luminosa ($\tau_V \geq 8\%$), foi medida incorretamente, com erros de 1,682 % e 2,076 %, respectivamente.

Em uma lente (LE121), a adequação para direção, pelo critério do quociente de atenuação da luz vermelha ($Q_{\text{vermelho}} \geq 0,8$), foi medida incorretamente, com erro de 0,0310.

Em todas as lentes, a adequação para direção, pelo critério do quociente de atenuação da luz amarela ($Q_{\text{amarelo}} \geq 0,6$), foi medida corretamente.

Em todas as lentes, a adequação para direção, pelo critério do quociente de atenuação da luz verde ($Q_{\text{verde}} \geq 0,6$), foi medida corretamente.

Em duas lentes (LD262 e LD198), a adequação para direção, pelo critério do quociente de atenuação da luz azul ($Q_{\text{azul}} \geq 0,6$), foi medida incorretamente, com erros de 0,330 e 0,153; respectivamente.

Na Tabela 10, são apresentados o maior erro absoluto, a média do erro (viés), o desvio-padrão do erro, o intervalo de confiança de 95 % do erro e o coeficiente de correlação entre as medidas com a combinação e o padrão-ouro.

Tabela 10 - Valores comparativos entre medidas com o protótipo e com o padrão-ouro

	maior erro absoluto	viés	desvio- padrão	intervalo de confiança de 95 %	amplitude do IC95%	coef. de correlação
τ_V	12,939	-0,4994	3,3668	[-7,0984;6,0996]	13,198	0,9573
Q_{vermelho}	0,268	0,0536	0,0995	[-0,1415;0,2487]	0,3902	0,9124
Q_{amarelo}	0,256	0,0909	0,0671	[-0,0406;0,2223]	0,2629	0,6856
Q_{verde}	0,159	-0,0523	0,0435	[-0,1377;0,0330]	0,1707	0,7162
Q_{azul}	0,427	0,0216	0,1392	[-0,2512;0,2944]	0,5456	0,7854

Fonte: os autores

Para análise dos resultados experimentais da combinação do LED branco com o sensor TCS3472 pelo Método de Bland-Altman, foram feitos gráficos de média por diferença entre

medidas feitas com esta combinação e calculadas com a ponderação da norma a partir de medidas feitas com espectrofotômetro, Figuras 33, 34, 35, 36 e 37.

Figura 33 - Gráfico de média por diferença para valores de transmitância luminosa para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 12,9390; -0,4994; [-7,0984; 6,0996] e 0,9573, respectivamente.

Fonte: os autores

Figura 34 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz vermelha para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,2680; 0,0536; [-0,1415; 0,2487] e 0,9124, respectivamente.

Fonte: os autores

Figura 35 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz amarela para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,2560; 0,0909; [-0,0406; 0,2223] e 0,6856, respectivamente.

Fonte: os autores

Figura 36 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz verde para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,1590; 0,0523; [-0,1377; 0,0330] e 0,7162, respectivamente.

Fonte: os autores

Figura 37 - Gráfico de média por diferença para valores de quociente de atenuação visual para luz azul para 128 lentes obtidos usando a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 e a ponderação da norma em dados de espectroscopia. O maior erro absoluto, o viés, o limite de concordância de 95 % e o coeficiente de correlação são 0,4270; 0,0216; [-0,2512; 0,2944] e 0,7854, respectivamente.

Fonte: os autores

4.3 Protótipo

O protótipo final desenvolvido, Figura 38, usa a combinação do LED branco com o sensor TCS3472 para medição de transmitância luminosa e dos quocientes de atenuação visual. Foram feitas duas placas de circuito impresso, uma com o microcontrolador, RTC, módulo de som, pinos para programação e saídas para LED, sensor TCS3472, *display*, caixas de som, cartão SD e leitura do estado da tampa (aberta ou fechada), Figura 39, e outra com o LED branco, Figura 40. Os esquemáticos dos circuitos destas placas estão no Apêndice D e no Apêndice E.

Figura 38 - Foto do protótipo construído.

Fonte: os autores

Figura 39 - PCB principal do protótipo com o microcontrolador, RTC, módulo de som, pinos para programação e saídas para LED, sensor, display, caixas de som, cartão SD e leitura do estado da tampa.

Fonte: os autores

Figura 40 - PCB do LED branco que foi usado como fonte luminosa no protótipo.

Fonte: os autores

Feito de MDF, pesando aproximadamente 1,5 kg e com aproximadamente 25 cm x 21,5 cm x 13 cm, o protótipo interage com o usuário por meio de sua tela sensível ao toque e de sua caixa de som e salva *logs* em cartão SD com as medidas feitas para análise futura dos dados. Um exemplo de tela de resultados é apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Exemplo de tela de resultados do protótipo.

Fonte: os autores

CAPÍTULO 5

5 Discussão

Tanto os resultados teóricos quanto os experimentais obtidos com a combinação do LED branco com o sensor SFH 5711 respeitaram a regra de precisão proposta para fabricantes (Seção 3.3). Esta combinação usa uma fonte luminosa (LED branco) com emissão espectral similar à do Sol na região espectral da luz visível e um sensor (SFH 5711) com sensibilidade espectral similar à do olho humano; desta forma, a ponderação espectral da combinação, sem qualquer tratamento matemático, é similar à da norma para transmitância luminosa. A saída do sensor SFH 5711 é analógica em corrente, assim, faz-se necessário um resistor para conversão de corrente para tensão e de um conversor AD para leitura da medida. A ponderação espectral desta combinação possui RMSE de 0,0855 e GFC de 0,9825 em relação à ponderação espectral da norma para transmitância luminosa. Apesar de esta combinação funcionar bem para medição de transmitância luminosa, com ela não é possível se medir transmitância das luzes de sinais semafóricos sem o uso de sensores e/ou LEDs adicionais, elevando custos, o espaço interno requerido e a complexidade organizacional interna.

O uso de combinações lineares das combinações do LED branco com os canais do sensor TCS3472 permite que se obtenham aproximações de diferentes funções de ponderação, de forma compacta e com baixo esforço computacional. O sensor TCS3472 possui comunicação digital (I2C) e com seus quatro canais funciona como quatro sensores diferentes no mesmo encapsulamento. Comparando ao sistema anteriormente desenvolvido no LIO, esta combinação apresenta melhora no RMSE e GFC para as medidas de $Q_{vermelho}$, $Q_{amarelo}$ e Q_{verde} e piora para transmitância luminosa e Q_{azul} .

O protótipo desenvolvido neste trabalho faz uso da combinação do LED branco com o sensor TCS3472. A regra de precisão proposta para fabricantes (Seção 3.3), que diz respeito à transmitância luminosa, não foi atendida. Pela análise de concordância pelo Método de Bland-Altman, o viés não foi significativo para nenhuma das medições e o intervalo dos limites de concordância de 95 % foi amplo para medição de Q_{azul} e estreito para as demais, considerando-se os valores-limites previamente definidos para os vieses e para os limites de concordância. Assim, dentro da tolerância definida, medições com o protótipo são equivalentes a medições com o padrão-ouro para transmitância luminosa e para quociente de atenuação para as luzes vermelha, amarela e verde. Medidas de transmitância luminosa em lentes mais escuras (menor τ_V) tendem a apresentar menores erros e os maiores erros foram encontrados em lentes claras, para estas lentes as medidas com o protótipo foram inferiores às com o padrão-ouro. Para medidas de $Q_{vermelho}$, não foi observada nenhuma tendência. Para luz amarela, as medidas com o protótipo foram, de forma geral, superiores às com o padrão-ouro. Para luz verde, as medidas com o protótipo foram, de forma geral, inferiores às com o padrão-ouro. Para luz azul, não foi observada nenhuma tendência.

Apesar de as medições do protótipo não serem equivalentes às do padrão-ouro, dentro dos critérios pré-estabelecidos, os resultados apresentaram boa exatidão, com apenas 5 das 128 lentes classificadas incorretamente quanto à adequação para direção. Em oposição ao sistema anterior, o presente protótipo faz medições de acordo com a norma brasileira atual, ABNT NBR ISO 12312-1, é portátil (compacto e leve) e microcontrolado, podendo ser facilmente transportado, mesmo para eventos distantes; além disso, ele pode ser facilmente replicado.

Medidas de transmitância em pontos diferentes de uma lente podem fornecer resultados diferentes, sobretudo em lentes degradés, que constituem a maioria das lentes medidas.

A medida de transmitância luminosa é importante não apenas para a determinação da categoria das lentes, mas também para o cálculo dos quocientes de atenuação visual das luzes semaforicas, uma vez que estes são razão da transmitância de uma luz semaforica pela transmitância luminosa. Ou seja, a exatidão de todos os resultados gerados pelo protótipo depende da exatidão na medição da transmitância luminosa.

Conclusão

Sistemas de medição de lentes de óculos de sol com interface intuitiva, medidas rápidas e colocado à disposição do público, já vêm sendo desenvolvidos há alguns anos no LIO, com o primeiro modelo finalizado em 2011 e o segundo, em 2014.

O uso de óculos de sol impróprios para direção traz riscos por vezes desconhecidos pelo usuário.

O presente protótipo difere dos anteriores em permitir ao público acesso a medidas semafóricas em lentes de óculos de sol, indicando se os óculos são apropriados para a direção de automóvel. O sistema anteriormente desenvolvido, além de não embarcado, não se tornou um protótipo para o público, pois por fim, não apresentou interface intuitiva e amigável para tal. Este apresenta como vantagens aos anteriores estar de acordo com a nova norma brasileira, que entrou em vigor em novembro de 2015, ser portátil (compacto, leve e de fácil transporte), microcontrolado e facilmente replicável. Este protótipo realiza medições de transmitância luminosa e de quocientes de atenuação visual para as luzes semafóricas vermelha, amarela, verde e azul. Com exceção das medições de τ_V e de Q_{azul} , as medições realizadas com o protótipo são equivalentes às realizadas com o padrão-ouro dentro da tolerância definida. Das 128 lentes medidas, apenas 5 foram incorretamente classificadas quanto à adequação para direção (2 por τ_V , 1 por $Q_{vermelho}$ e 2 por Q_{azul}).

O protótipo será disponibilizado, no campus da USP de São Carlos e em eventos científicos, para o público tomar ciência destes riscos e poder medir a conformidade de seus próprios óculos de sol com a adequação para direção proposta pela norma brasileira, assim contribuindo com a divulgação da importância de se usar óculos de sol adequados e permitindo ao público conferir seus próprios óculos.

Referências

ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. Measurement in medicine: The analysis of method comparison studies. **Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)**, 1983. [Royal Statistical Society, Wiley], v. 32, n. 3, p. 307–317, 1983. ISSN 00390526, 14679884. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2987937>>.

AMS-TAOS USA Inc. **TCS3472 - Color Light-To-Digital Converter with IR Filter**. Version 1.0. Apr 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15111**: Proteção pessoal dos olhos – óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral. Rio de Janeiro, jun. 2013. 44 p.

_____. **NBR ISO 12312-1**: Proteção dos olhos e do rosto – óculos para proteção solar e óculos relacionados – parte 1: óculos para proteção solar para uso geral. Rio de Janeiro, out. 2015. 26 p.

ATMEL. **8-bit Microcontroller with 4/8/16/32K Bytes In-System Programmable Flash - ATmega48PA ATmega88PA ATmega168PA ATmega328P**. Rev. 8161d. Oct 2009.

DAIN, S. J. Sunglasses and sunglass standards. **Clinical and Experimental Optometry**, 2003. Blackwell Publishing Ltd, v. 86, n. 2, p. 77–90, 2003. ISSN 1444-0938. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1444-0938.2003.tb03066.x>>.

DALLAS SEMICONDUCTOR. **DS1307 - 64 x 8 Serial Real-Time Clock**. 2015.

DONGRE, A.; PAI, G.; KHOPKAR, U. Ultraviolet protective properties of branded and unbranded sunglasses available in the Indian market in UV phototherapy chambers. **Indian Journal of Dermatology, Venereology, and Leprology**, 2007. v. 73, n. 1, p. 26–28, 2007. Disponível em: <<http://www.ijdv.com/article.asp?issn=0378-6323;year=2007;volume=73;issue=1;spage=26;epage=28;aulast=Dongre;t=6>>.

DWIN TECHNOLOGY. **DMT80480C070_02W – 7.0 Inches, 800xRGBx480, 65K Colors, DGUS LCM**. 12 Jun 2014.

EATON, J. W.; BATEMAN, D.; HAUBERG, S. **GNU Octave version 3.0.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations**. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2009. ISBN 1441413006. Disponível em: <<http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter>>.

HIRAKATA, V.; CAMEY, S. Análise de concordância entre métodos de bland-altman. **Clinical & Biomedical Research**, 2010. v. 29, n. 3, 2010. ISSN 2357-9730. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/index.php/hcpa/article/view/11727>>.

HOVIS, J. K. When yellow lights look red: tinted sunglasses on the railroads. **Optometry & Vision Science**, 2011. LWW, v. 88, n. 2, p. 327–333, 2011. Disponível em:

[http://journals.lww.com/optvissci/Fulltext/2011/02000-/When Yellow Lights Look Red Tinted Sunglasses on.21.aspx](http://journals.lww.com/optvissci/Fulltext/2011/02000-/When_Yellow_Lights_Look_Red_Tinted_Sunglasses_on.21.aspx).

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 4007**: Personal protective equipment – eye and face protection – vocabulary. May 2012. 110 p.

_____. **ISO 12311**: Personal protective equipment – test methods for sunglasses and related eyewear. Ago. 2013. 85 p.

_____. **ISO 12312-1**: Eye and face protection – sunglasses and related eyewear – part 1: Sunglasses for general use. Ago. 2013. 23 p.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION AND COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE. **ISO 11664-1:2007 (CIE S 014-1/E:2006)**: Colorimetry – part 1: Cie standard colorimetric observers. Out. 2007. 29 p.

_____. **ISO 11664-2:2007 (CIE S 014-2/E:2006)**: Colorimetry – part 2: Cie standard illuminants. Out. 2007. 14 p.

LOUREIRO, A. D.; GOMES, L. M.; VENTURA, L. Transmittance Variations Analysis in Sunglasses Lenses Post Sun Exposure. **Journal of Physics: Conference Series**, 2016, 733, 012028. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/733/012028>.

MELLO, M.; LINCOLN, V.; VENTURA, L. Self-service kiosk for testing sunglasses. **BioMedical Engineering OnLine**, 2014. v. 13, n. 1, p. 45, 2014. ISSN 1475-925X. Disponível em: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/13/1/45>.

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

OSRAM. **Golden DRAGON® Plus with Chip Level Conversion (CLC) - LUW W5AM**. . Aug 2008.

_____. **High Accuracy Ambient Light Sensor - SFH 5711**. Version 1.4. nov 2014.

SCHALKA, S. et al. Brazilian Consensus on Photoprotection. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, 2014. scielo, v. 89, p. 1 – 74, 12 2014. ISSN 0365-0596. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sciarttext&pid=S0365-05962014000700001&nrm=iso>.

YAM, J. C.; KWOK, A. K. Ultraviolet light and ocular diseases. **International Ophthalmology**, 2014. Springer Netherlands, v. 34, n. 2, p. 383–400, 2014. ISSN 0165-5701. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10792-013-9791-x>.

Apêndices

Apêndice A

Valores tabelados na ISO 12311:2013 para $W_V(\lambda) = V(\lambda)S_{D65}(\lambda)$

Tabela 11 - Valores tabelados na ISO 12311:2013 para $W_V(\lambda) = V(\lambda)S_{D65}(\lambda)$

comprimento de onda (λ)	$W_V(\lambda)$	comprimento de onda (λ)	$W_V(\lambda)$	comprimento de onda (λ)	$W_V(\lambda)$
380 nm	0,0001	515 nm	3,0589	650 nm	0,4052
385 nm	0,0002	520 nm	3,5203	655 nm	0,3093
390 nm	0,0003	525 nm	3,9873	660 nm	0,2315
395 nm	0,0007	530 nm	4,3922	665 nm	0,1714
400 nm	0,0016	535 nm	4,5905	670 nm	0,1246
405 nm	0,0026	540 nm	4,7128	675 nm	0,0881
410 nm	0,0052	545 nm	4,8343	680 nm	0,0630
415 nm	0,0095	550 nm	4,8981	685 nm	0,0417
420 nm	0,0177	555 nm	4,8272	690 nm	0,0271
425 nm	0,0311	560 nm	4,7078	695 nm	0,0191
430 nm	0,0476	565 nm	4,5455	700 nm	0,0139
435 nm	0,0763	570 nm	4,3393	705 nm	0,0101
440 nm	0,1141	575 nm	4,1607	710 nm	0,0074
445 nm	0,1564	580 nm	3,9431	715 nm	0,0048
450 nm	0,2104	585 nm	3,5626	720 nm	0,0031
455 nm	0,2667	590 nm	3,1766	725 nm	0,0023
460 nm	0,3345	595 nm	2,9377	730 nm	0,0017
465 nm	0,4068	600 nm	2,6873	735 nm	0,0012
470 nm	0,4945	605 nm	2,4084	740 nm	0,0009
475 nm	0,6148	610 nm	2,1324	745 nm	0,0006
480 nm	0,7625	615 nm	1,8506	750 nm	0,0004
485 nm	0,9001	620 nm	1,581	755 nm	0,0002
490 nm	1,0710	625 nm	1,2985	760 nm	0,0001
495 nm	1,3347	630 nm	1,0443	765 nm	0,0001
500 nm	1,6713	635 nm	0,8573	770 nm	0,0001
505 nm	2,0925	640 nm	0,6931	775 nm	0,0001
510 nm	2,5657	645 nm	0,5353	780 nm	0,0000

Fonte: ISO (2013a)

Apêndice B

Método de Bland-Altman

O gráfico de média por diferença, criado pelo matemático inglês John Tukey, é usado para avaliar concordância entre dois conjuntos de medidas obtidos por instrumentos ou técnicas diferentes.

Em áreas médicas, a técnica de análise de concordância usando este tipo de gráfico é bem divulgada e se chama Método de Bland-Altman por ter sido aplicada em medicina a primeira vez por J. M. Bland e D. G. Altman (ALTMAN; BLAND, 1983), quando até então se utilizava coeficiente de concordância para este tipo de análise (HIRAKATA; CAMEY, 2010).

O gráfico de média por diferença é um gráfico de dispersão entre a média das duas variáveis (eixo X) e a diferença entre elas (eixo Y). Este gráfico permite que se avalie visualmente o erro (a dispersão dos pontos das diferenças ao redor da média), *outliers* e tendências. Para uma análise mais detalhada, calcula-se a média das diferenças (viés), $\bar{d}$, e o desvio padrão das diferenças, s_d . Se a diferença apresentar distribuição normal, os limites de concordância de 95 % são $\bar{d} \pm 1,96s_d$. Os limites de concordância de 95 % indicam o intervalo de 95 % das diferenças (HIRAKATA; CAMEY, 2010).

Antes de se traçar um gráfico de média por diferença, deve-se definir a partir de que valor o viés é considerado significativo e o intervalo dos limites de concordância, amplo. Se o viés for significativo e a distribuição espacial dos pontos for homogênea, não havendo tendências, então o viés é sistemático, ou seja, somando um valor constante (o próprio viés) ao conjunto de valores de uma das variáveis, o viés torna-se nulo, obtendo-se conjuntos de variáveis com boa concordância caso o intervalo dos limites de concordância seja estreito. Se o intervalo dos limites de concordância for amplo, o resultado é ambíguo; se for estreito e o viés não significativo, as variáveis são equivalentes e, por extensão, os métodos de medida que as geraram também são equivalentes.

Apêndice C

Resultados experimentais do protótipo e do padrão-ouro

Tabela 12 - Resultados experimentais do protótipo e do padrão-ouro

lente	Espectrofotômetro Cary 5000					Protótipo				
	τ_V	Q_{verm}	Q_{amar}	Q_{verd}	Q_{azul}	τ_V	Q_{verm}	Q_{amar}	Q_{verd}	Q_{azul}
LD138	7,906	1,086	0,973	1,016	1,165	8,0	0,93	1,02	0,99	0,94
LE245	2,834	1,141	0,972	1,019	1,222	3,0	1,02	0,92	1,05	1,18
LE310	4,183	1,209	0,980	0,997	1,259	4,4	1,03	0,93	1,03	1,18
LE364	5,677	1,163	0,986	0,994	1,221	6,2	0,91	1,07	0,95	0,87
LD093	27,687	1,227	1,015	0,955	1,217	31,9	1,15	0,94	1,02	1,20
LD142	31,142	1,504	1,170	0,874	0,910	35,5	1,51	1,01	0,97	1,03
LD131	18,147	1,801	1,258	0,808	0,903	22,8	1,68	1,10	0,90	0,86
LD273	43,140	1,399	1,152	0,893	0,866	43,8	1,45	1,07	0,93	0,91
LE105	11,556	1,549	1,079	0,900	1,350	13,4	1,37	0,98	0,98	1,17
LE133	34,416	1,491	1,177	0,878	0,860	32,5	1,55	1,12	0,90	0,78
LE150	5,195	1,812	1,089	0,877	1,735	4,6	1,53	0,83	1,05	1,55
LE151	6,763	1,780	1,120	0,875	1,491	7,2	1,53	0,92	1,00	1,31
LE192	25,192	1,423	1,138	0,919	0,917	26,8	1,42	1,02	0,97	0,99
LE019	4,609	1,889	1,095	0,875	1,817	4,1	1,49	0,81	1,06	1,60
LE033	10,187	1,427	1,007	0,935	1,506	8,5	1,29	0,82	1,08	1,49
LE040	3,321	2,092	1,133	0,862	1,969	3,5	1,38	1,07	0,90	1,06
LE120	4,488	1,876	1,093	0,877	1,806	4,3	1,46	0,81	1,06	1,57
LE034	14,333	1,380	1,031	0,930	1,358	14,8	1,19	1,00	0,97	1,09
LE052	20,161	1,729	1,236	0,823	0,909	17,9	1,92	0,98	0,95	1,18
LE072	11,555	1,490	1,088	0,928	1,220	12,5	1,28	0,99	0,97	1,12
LE085	4,756	1,805	1,063	0,892	1,823	3,4	1,52	0,83	1,05	1,59
LE087	23,671	1,206	0,998	0,968	1,230	26,4	1,13	0,90	1,05	1,24
LE136	8,472	1,594	1,058	0,900	1,515	9,7	1,34	0,90	1,02	1,33
LE178	32,477	1,417	1,158	0,910	0,836	30,5	1,46	1,14	0,89	0,72
LE221	19,860	1,268	1,029	0,966	1,180	22,7	1,16	0,90	1,05	1,25
LE011	28,228	1,492	1,146	0,878	0,988	22,2	1,52	0,97	0,98	1,15
LE064	27,230	1,223	1,026	0,969	1,141	31,1	1,05	1,05	0,95	0,95
LE066	15,091	1,944	1,303	0,775	0,894	13,1	2,09	1,11	0,85	0,95
LE069	10,313	1,590	1,096	0,891	1,343	8,3	1,46	0,98	0,98	1,17
LE073	30,353	1,418	1,150	0,916	0,872	32,4	1,41	1,03	0,97	0,95
LE144	4,313	1,895	1,085	0,878	1,877	4,7	1,46	0,81	1,07	1,60
LE155	18,143	1,253	0,986	0,957	1,395	17,1	1,15	0,84	1,08	1,43
LE158	9,582	1,662	1,111	0,878	1,352	7,9	1,64	0,87	1,02	1,43
LE342	19,000	1,307	1,017	0,947	1,280	22,2	1,18	0,93	1,02	1,22
LE094	14,646	1,419	1,049	0,926	1,298	16,2	1,34	0,85	1,07	1,40
LE162	33,288	1,078	0,961	0,996	1,240	40,6	1,01	0,92	1,05	1,21
LE175	16,929	1,349	1,021	0,941	1,327	22,2	1,14	0,98	1,00	1,09
LE185	37,691	1,400	1,154	0,911	0,838	40,8	1,43	1,05	0,95	0,93

LE233	28,640	1,177	1,020	0,978	1,110	31,6	1,05	1,00	0,99	1,02
LE220	22,084	1,278	1,035	0,962	1,161	23,6	1,10	1,04	0,96	0,97
LE263	32,374	1,448	1,166	0,902	0,843	34,9	1,42	1,00	0,98	1,01
LE276	20,215	1,522	1,169	0,902	0,909	18,7	1,49	1,02	0,97	0,98
LE348	28,041	1,179	1,015	0,979	1,128	31,9	1,07	0,96	1,01	1,10
LE352	15,839	1,316	1,027	0,965	1,230	16,9	1,16	0,95	1,02	1,17
LE075	13,891	1,399	1,034	0,932	1,341	12,8	1,25	0,96	1,00	1,15
LE161	26,902	1,470	1,126	0,879	1,058	23,8	1,54	0,88	1,03	1,38
LE183	40,528	1,358	1,138	0,919	0,856	39,7	1,42	1,01	0,98	1,00
LE193	22,587	1,480	1,157	0,908	0,903	25,6	1,47	0,93	1,03	1,16
LE195	20,142	1,297	1,015	0,948	1,284	32,6	1,24	0,84	1,08	1,38
LE196	29,954	1,471	1,175	0,899	0,826	33,6	1,47	1,06	0,94	0,91
LE267	30,261	1,542	1,214	0,882	0,756	43,2	1,53	1,07	0,94	0,85
LE343	17,332	1,296	1,025	0,966	1,218	11,0	1,13	1,04	0,95	1,00
LE346	19,369	1,280	1,028	0,969	1,179	24,9	1,12	0,96	1,02	1,13
LD054	12,036	0,640	0,939	1,108	0,870	12,9	0,62	1,04	1,04	0,67
LD121	17,347	0,812	0,978	1,057	0,910	18,2	0,84	0,99	1,04	0,88
LD127	18,514	0,816	0,978	1,072	0,928	19,6	0,82	0,96	1,07	0,91
LD128	16,199	0,890	1,015	1,048	0,865	16,3	0,97	0,91	1,09	1,06
LD262	10,688	1,657	1,302	0,827	0,580	11,0	1,87	1,09	0,90	0,91
LD098	22,685	1,347	1,051	0,922	1,208	15,9	1,33	0,97	0,98	1,21
LD101	8,015	1,638	1,064	0,881	1,579	9,0	1,37	0,85	1,04	1,51
LE177	38,272	1,339	1,131	0,927	0,857	50,1	1,26	1,04	0,96	0,91
LE182	35,425	1,426	1,171	0,909	0,796	38,1	1,45	1,07	0,95	0,84
LE238	3,592	1,141	0,981	1,015	1,184	3,9	0,96	0,97	1,03	1,06
LE246	17,049	1,326	1,017	0,948	1,304	17,2	1,24	0,85	1,07	1,40
LE311	3,118	1,161	0,985	1,014	1,189	3,0	1,03	0,92	1,05	1,16
LE340	21,177	1,272	1,015	0,954	1,246	22,9	1,18	0,92	1,03	1,23
LE344	29,999	1,167	1,015	0,980	1,121	31,3	1,13	0,89	1,06	1,27
LE353	13,273	1,343	1,041	0,961	1,203	11,5	1,25	0,89	1,05	1,30
LD045	20,587	1,360	1,053	0,929	1,207	16,5	1,32	0,95	1,00	1,19
LE045	21,693	1,333	1,045	0,934	1,210	15,8	1,27	0,99	0,98	1,10
LD024	13,949	1,507	1,115	0,923	1,120	13,9	1,35	0,97	0,99	1,17
LE024	14,380	1,505	1,116	0,923	1,113	10,8	1,31	1,07	0,93	0,96
LE131	17,897	1,822	1,267	0,801	0,890	16,7	1,94	1,16	0,83	0,80
LE142	28,577	1,546	1,183	0,864	0,907	30,2	1,61	1,05	0,93	0,96
LD047	11,925	1,450	1,039	0,923	1,414	10,8	1,25	0,92	1,02	1,27
LD272	30,251	1,500	1,202	0,893	0,754	30,8	1,57	0,98	0,99	1,03
LE272	27,337	1,569	1,221	0,876	0,759	28,0	1,51	1,07	0,94	0,84
LD242	22,759	1,241	1,026	0,971	1,147	25,8	1,17	0,94	1,02	1,17
LE039	16,267	0,800	0,981	1,081	0,904	14,5	0,85	0,89	1,12	1,03
LE032	36,013	1,374	1,108	0,898	1,018	35,3	1,45	1,00	0,95	1,12
LE112	5,928	1,656	1,038	0,911	1,711	4,5	1,42	0,84	1,06	1,49
LE123	11,481	1,403	1,018	0,937	1,423	10,8	1,23	0,94	1,01	1,22
LE114	16,301	1,402	1,043	0,927	1,301	14,5	1,29	1,01	0,97	1,06
LE021	22,553	1,353	1,055	0,926	1,188	16,1	1,34	1,03	0,94	1,04

LE035	36,249	1,282	1,073	0,937	1,033	39,1	1,28	1,07	0,95	0,88
LE043	32,004	1,366	1,125	0,911	0,933	28,6	1,38	1,06	0,94	0,94
LE049	14,568	1,282	0,983	0,972	1,345	14,2	1,21	0,83	1,09	1,42
LE051	12,427	1,343	0,998	0,961	1,358	10,5	1,19	0,93	1,03	1,22
LE134	10,642	1,478	1,039	0,919	1,460	9,5	1,25	1,01	0,97	1,07
LE180	34,054	1,466	1,187	0,899	0,778	37,7	1,41	1,12	0,92	0,72
LE181	32,940	1,517	1,206	0,886	0,759	34,4	1,48	1,15	0,89	0,66
LE184	32,748	1,489	1,194	0,893	0,777	31,2	1,48	1,05	0,96	0,88
LE270	34,864	1,467	1,189	0,898	0,772	37,7	1,45	1,07	0,95	0,83
LE012	19,611	1,363	1,048	0,930	1,233	20,5	1,28	0,97	1,00	1,15
LE153	26,866	1,265	1,023	0,939	1,238	25,1	1,19	0,99	0,97	1,12
LE157	44,571	1,278	1,094	0,930	0,953	40,2	1,39	1,04	0,96	0,95
LE219	24,601	1,227	1,026	0,973	1,129	20,4	1,15	0,93	1,03	1,18
LE242	16,641	1,335	1,040	0,961	1,199	18,8	1,15	0,97	1,00	1,11
LE341	17,539	1,332	1,018	0,944	1,317	28,2	1,14	0,99	1,00	1,06
LE055	33,131	1,445	1,157	0,893	0,882	30,7	1,51	1,10	0,91	0,84
LE152	40,158	1,383	1,132	0,902	0,920	40,4	1,44	1,11	0,91	0,80
LE156	32,546	1,242	1,091	0,957	0,924	35,1	1,22	1,04	0,97	0,90
LE187	34,722	1,419	1,158	0,907	0,845	35,0	1,37	1,10	0,92	0,80
LE243	19,956	1,261	1,018	0,970	1,205	22,4	1,14	0,91	1,04	1,23
LE269	31,157	1,448	1,168	0,904	0,828	32,0	1,43	1,14	0,90	0,73
LE121	15,206	0,799	0,976	1,061	0,904	10,8	0,83	0,97	1,06	0,91
LE372	27,034	1,333	1,121	0,919	0,930	35,4	1,29	1,14	0,90	0,73
LE373	27,754	1,328	1,118	0,920	0,932	21,3	1,37	1,13	0,89	0,78
LE374	12,529	1,204	0,982	1,006	1,265	13,5	1,02	0,94	1,03	1,16
LE377	17,740	1,721	1,220	0,834	0,958	18,3	1,75	1,12	0,88	0,85
LE379	13,082	1,401	1,030	0,927	1,416	9,1	1,31	0,94	1,00	1,25
LE380	12,235	1,062	0,975	1,015	1,207	13,5	0,82	1,11	0,93	0,78
LD126	23,910	0,902	1,009	1,040	0,887	23,9	0,94	0,94	1,07	0,99
LD191	10,658	1,537	1,214	0,875	0,753	11,4	1,54	1,15	0,88	0,72
LD198	11,063	1,643	1,296	0,831	0,587	11,8	1,73	1,15	0,87	0,74
LD232	2,732	1,162	0,984	1,014	1,194	3,0	1,03	0,91	1,05	1,18
LD236	3,523	1,129	0,973	1,018	1,201	4,0	0,94	0,98	1,02	1,04
LD237	2,351	1,162	0,977	1,017	1,223	2,4	0,98	0,93	1,05	1,15
LD240	4,201	1,196	0,978	1,001	1,248	4,4	1,05	0,92	1,04	1,20
LD244	3,318	1,146	0,981	1,015	1,189	3,6	1,01	0,91	1,06	1,17
LE002	25,603	1,464	1,147	0,901	0,941	22,3	1,51	1,04	0,95	0,93
LE060	20,668	1,295	1,041	0,956	1,176	20,3	1,22	0,89	1,04	1,33
LE076	23,663	1,575	1,194	0,871	0,888	24,7	1,65	1,08	0,92	0,88
LE149	9,676	1,455	1,012	0,929	1,526	7,6	1,16	0,93	1,00	1,30
LE229	18,036	1,298	1,034	0,964	1,193	19,6	1,15	0,92	1,04	1,23
LE234	21,632	1,265	1,012	0,956	1,249	22,7	1,16	0,94	1,02	1,20
LE338	20,593	1,306	1,021	0,946	1,269	20,4	1,20	0,94	1,02	1,18
LE351	21,092	1,263	1,029	0,969	1,158	20,6	1,12	0,98	1,00	1,08

Fonte: os autores

Apêndice D

Placa Principal

Apêndice E

Placa LED Branco

Author: Artur D. Loureiro
Laboratório de Instrumentação Oftálmica

Sheet: /
File: placaLedBranco.sch

Title: *Placa LED Branco*

Size: A4 Date:
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7-e2-637658ubuntu16.04.1

Id: 1/1