UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUÍS EDUARDO LOPES

Desenvolvimento de um protótipo para medição de filtros
polarizadores de óculos de sol de acordo com a NBR15111

São Carlos

2014

LUÍS EDUARDO LOPES

Desenvolvimento de um protótipo para medição de filtros
polarizadores de óculos de sol de acordo com a NBR15111

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

Orientador: Profa. Dra. Liliane Ventura

São Carlos
2014

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 DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L864d Lopes, Luís Eduardo
Desenvolvimento de um protótipo para medição de
filtros polarizadores de óculos de sol de acordo com a
NBR15111 / Luís Eduardo Lopes; orientadora Liliane
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. Polarização. 2. Óculos de Sol. 3. NBR 15111. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUÍS EDUARDO LOPES.**

Título da dissertação: "Desenvolvimento de um protótipo para medição de filtros polarizadores de óculos de sol de acordo com a NBR15111".

Data da defesa: 13/06/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

APROVADO

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

APROVADO

Profa. Dra. **Lígia 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**

Protocolado em 13/06/2014
Serviço de Pós-Graduação
UNESP - Bauru

Dedico à minha família que sempre me incentivou a estudar,
pelo incondicional apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Donizete e Nazaré pela incansável determinação em fazer e ensinar o melhor para seus filhos. Às minhas irmãs pelo apoio e carinho que me fortalece.

À minha orientadora, Prof. Dr. Liliane Ventura, pela oportunidade oferecida e orientação dedicada.

Aos amigos do LIO, pelos bons momentos compartilhados, pelas conversas e companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP em especial ao Rui Bertho pela atenção e eficiência.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro do projeto 2012/11171-8.

“Nós almejamos por novas sensações, mas logo nos tornamos indiferentes à elas. As maravilhas de ontem são coisas comuns hoje em dia.”

Nikola Tesla

RESUMO

LOPES, L. E. **Desenvolvimento de um protótipo para medição de filtros polarizadores de óculos de sol de acordo com a NBR15111.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

O uso de filtros polarizadores em óculos de sol está se tornando muito comum em todo o mundo. No Brasil, apesar da norma ABNT NBR15111:2004 ter considerações específicas para seu uso (posição e eficiência), não existe equipamento nacional específico para executar as medidas necessárias para avaliação. Este trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo capaz de executar medidas em óculos de sol para verificar sua adequação à referida norma, que estabelece os seguintes requisitos para os filtros polarizadores: o limite para o desvio entre o eixo de transmissão do filtro polarizador e a vertical é de $\pm 5^\circ$ e o limite máximo para o desvio mútuo entre os eixos de polarização dos filtros polarizadores das duas lentes é de 6° . Ainda, a eficiência mínima de polarização é de 4:1 para filtros da categoria 1 e de 8:1 para as demais categorias, exceto a categoria 0. O desenvolvimento do protótipo foi dividido em duas etapas: 1. desenvolvimento e avaliação do método de medição, por simulações no software Malab® e testes em bancada; 2. construção do protótipo baseado no projeto, melhorias em bancada e testes preliminares em óculos.

O sistema ótico consistiu de: uma fonte de luz (composta por um LED, uma lente biconvexa e um filtro difusor), pelos óculos em teste, pelo filtro analisador (formado por duas metades de filtros polarizadores dispostos com alinhamento perpendicular entre seus eixos de polarização), dois orifícios para passagem de luz designados por pinhole e dois sensores de luz. O sistema eletrônico é composto por seis placas de circuito impresso, a saber: a placa principal onde estão os microcontroladores que executam o software programado; duas placas para controle de motor de passo (filtro analisador e movimento horizontal dos óculos em teste); placa para controle de motor DC (movimento vertical para prender os óculos em teste), placa de alimentação e placa dos sensores.

Como resultado, verificou-se a capacidade de posicionamento do filtro analisador com a resolução de $0,08^\circ$, a redução do coeficiente de variação de 0,89% para 0,31% pelo uso do filtro difusor, a resolução ótica para medição de um dos óculos de $0,023^\circ$, além de um possível problema de alinhamento entre as duas metades que compõe o filtro analisador, o que contribuiu para o desenvolvimento de uma análise mais detalhada das equações de comportamento do

protótipo. O protótipo recebeu melhorias nos sistema ótico e eletrônico, além de testes nos óculos de sol disponíveis. No sistema ótico, os sensores foram substituídos por um de maior correlação com a função de sensibilidade para visão diurna $V(\lambda)$ e que possui resposta logarítmica, em função disso, o LED do conjunto ótico foi substituído por um de maior potência; também, em função da nova configuração mecânica, a lente da fonte de luz foi substituída por uma biconvexa de diferente distância focal. Assim, a iluminação tornou-se mais homogênea e mais intensa. No sistema eletrônico, utilizou-se um microcontrolador com maior capacidade de processamento, maior memória e conexão USB estável. A interface homem-máquina foi feita por uma tela de cristal líquido sensível ao toque. Os testes com o protótipo foram feitos em quatro óculos de sol polarizados, sendo que, como filtro polarizador de referência para calibração foi utilizada uma das lentes destes óculos. Os resultados preliminares indicaram a viabilidade de se finalizar este sistema como protótipo pronto para uso e calibrá-lo para se obter medidas que proporcionem análises das conformidades da norma brasileira. Contudo, por não ter disponível um filtro calibrador com características apropriadas, os resultados obtidos ainda não podem ser conclusivos. O protótipo construído foi capaz de aplicar o método de medição desenvolvido para caracterizar os óculos de sol, de acordo com as recomendações da norma. Sua estrutura mecânica é robusta e flexível, permitindo o estudo e desenvolvimento de outros métodos de medição e a inserção de outras funções. A contribuição científica e acadêmica deste trabalho reside nos projetos óticos e mecânicos, para se atender a necessidade de construção de um sistema que possa num futuro próximo estar analisando óculos de sol, com as características de um equipamento requerido pela norma brasileira e que não existe no mercado nacional

Palavras-chave: Polarização, Óculos de sol, NBR15111.

ABSTRACT

LOPES, L. E. **Development of a prototype for measurements in sunglasses polarization filters according to NBR15111. 2013.** Thesis (Master Degree) – Faculty of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2014.

The use of polarizing filters in sunglasses is becoming very common worldwide. In Brazil, despite the NBR15111:2004 has specific requirements for its use (position and efficiency), there is no proper national equipment to perform the measurements needed for evaluation. This paper describes the development of a prototype capable to perform measurements on sunglasses in order to verify their suitability for this standard, which establishes the following requirements for polarizing filters: the threshold for the deviation between the transmission axis and the polarizing filter vertical axis is $\pm 5^\circ$ and the upper limit for the mutual distance between the polarization axis of the two lenses is 6° . The lower efficiency of the polarizing filter is 4:1 for category 1 and 8:1 for all other categories except category 0. The development of the prototype was divided into two stages: 1. Development and evaluation of the measurement method, by software simulations in Malab® and test bench; 2. Prototype construction based on the project, improvements obtained in test bench and preliminary test results with sunglasses.

The optical system includes: a light source (composed by a LED, a biconvex lens and a diffuser filter), the sunglasses in test, a analyzer filter (formed by two polarizing filters halves, disposed with their polarization axes perpendicular to each other), two holes for light transmission (called pinhole) and two light sensors . The electronic system consists of six printed circuit boards , the main board where the microcontroller running software are programmed ; two boards for control of stepper motors (analyzer filter and horizontal movement of the sunglasses in test); a board to control a DC motor (vertical motion to hold the sunglasses in test), a power board and a sensor board.

As a result of the first step, it was determined the positioning capability of the analyzer filter with a resolution of 0.08° , a reduction of the coefficient of variation from 0.89% to 0.31% by the use of the diffuser, the optical resolution for measuring one of the lenses was 0.023° , also a possible alignment problem between the two analyzer halves, which contributed to the development of a detailed analysis of the behavioral equations of the prototype. The prototype received improvements in optical and electronic systems, and tests with the available

sunglasses. In the optical system, the sensors were replaced by others with higher correlation with the sensitivity function for daytime vision $V(\lambda)$ and logarithmic response. As a result, the LED of the light source was replaced by a more powerful one, due to the new mechanical configuration, the lens of the light source was replaced by a biconvex with different focal length, which made the light more homogeneous and intense. The electronic system used a new microcontroller with higher processing power and memory, as well as a more stable USB connection. A man-machine interface was made by including a liquid crystal display, seven-inch touchscreen. Tests with the prototype were made in four polarized sunglasses, the calibration was made using one sunglass lens. Preliminary results indicate the feasibility of this system as complete prototype, ready for use, to obtain measures that provide analyzes in accordance with Brazilian standard. However, by not having available a reference filter with suitable characteristics to serve as a calibrator, the results cannot be conclusive yet. The prototype built was able to apply the measurement method developed for characterizing sunglasses, according to the recommendations of the standard. Its mechanical structure is robust and flexible, allowing the study and development of other methods of measurement and inclusion of other functions. The scientific and academic contribution of this work lies in the optical and mechanical design, to meet the need of building a system that can analyze sunglasses in the near future, with the characteristics required by the Brazilian standard and this equipment does not exist in national market.

Keywords: Polarization, Sunglasses, NBR15111.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Óculos de sol com lente em degradê. Recurso que pode ser feito com diversas cores e níveis.....	38
Figura 2 - Óculos de sol com lente espelhada. Impedem a visualização dos olhos de quem as utiliza	38
Figura 3 - Lente fotocromática. Possui a capacidade de variar a transmitância de luz visível em função da intensidade de luz ambiente.	39
Figura 4 - Óculos de sol com lente polarizada. O filtro polarizador bloqueia a luz parcialmente polarizada no ambiente e, por isso, melhoram o contraste da imagem e impedem o ofuscamento da visão de seu usuário.....	39
Figura 5 – Polarização por reflexão. O gráfico mostra a refletividade em função do ângulo de incidência e destaca o ângulo de Brewster onde o raio refratado é perpendicular ao raio refletido.....	42
Figura 6 - Polarização por espalhamento de Rayleigh. A figura mostra a absorção e re-emissão da luz em uma molécula de água.....	43
Figura 7 - Polarização por absorção. A luz que incide com polarização paralela às cadeias de PVA é absorvida.....	44
Figura 8 - Lei de Malus. Determina a intensidade luminosa que emerge através de um conjunto de polarizadores alinhados.....	45
Figura 9 - Aplicação do filtro polarizador em óculos de sol, mostrando o alinhamento vertical do eixo de transmissão do filtro polarizador, em função da luz refletida nos ambientes naturais ser predominantemente de polarização horizontal.	46
Figura 10 - Produto da distribuição espectral do iluminante padrão D65 pela função de sensibilidade espectral para a visão diurna (ABNT, 2004)	48
Figura 11 - Representação da eficiência de polarização de 4:1 para filtros de proteção solar de categoria 1. Para cada quatro unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização	

(setas verdes tracejadas), uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular (seta vermelha traço-ponto)..... 49

Figura 12 - Representação da eficiência de polarização de 8:1 para filtros de proteção solar de categorias 2, 3 e 4. Para cada oito unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização (setas verdes tracejadas), uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular (seta vermelha traço-ponto) 50

Figura 13 - Requisito de posicionamento vertical do filtro polarizador. Os filtros não podem apresentar desvio maior que $\pm 5^\circ$ com o eixo vertical 50

Figura 14 - Requisito de desvio mútuo do filtro polarizador. Os filtros não podem apresentar desvio mútuo maior que 6° 51

Figura 15 - Par de polarizadores montados segundo a NBR15111:2004. Os polarizadores devem ser montados sobre um vidro, com campos de visão separados e cortados de modo a formar um ângulo de $\pm 3^\circ$ com a horizontal..... 51

Figura 16 - Dispositivo proposto pela NBR15111:2004 para determinar a direção do eixo de transmissão dos filtros polarizadores em um óculos de sol 52

Figura 17 - Diagrama da montagem feita em bancada para avaliação prática do método de medição proposto. A montagem é composta pelos subsistemas ótico, mecânico e eletrônico 54

Figura 18 - Esquema simplificado do sistema ótico proposto. Onde, I_0 é a intensidade inicial, I_1 a intensidade após os óculos, I_2 e I_3 as intensidades após o analisador..... 54

Figura 19 - Respostas dos conjuntos Iluminante padrão D65 x $V(\lambda)$ e LED x SFH5712..... 55

Figura 20 - Disposição dos sensores atrás do filtro analisador. Ao movimentar o filtro analisador, os sensores tem liberdade para descrever um movimento relativo ao filtro analisador de até 130° sem que sejam mecanicamente encobertos pela junção das metades dos filtros 56

Figura 21 - Intensidade luminosa normalizada através do sistema utilizando filtros polarizadores ideais hipotéticos. I_0 é a intensidade luminosa emitida pela fonte de luz; I_1 a intensidade luminosa após a luz atravessar os óculos e I_2 e I_3 as intensidades após a luz atravessar o analisador 57

Figura 22 – Transmitância relativa após o filtro analisador para todas as categorias de FPS polarizados em função do ângulo entre os eixos de transmissão do analisador e dos óculos. Foram consideradas as transmitâncias mínimas e máximas de cada uma das categorias de óculos polarizados e suas respectivas eficiências de polarização.....	58
Figura 23 – Sinal nos sensores 1 e 2 e o módulo da diferença dos sinais, a partir da análise simplificada	59
Figura 24 - Derivada da função módulo da diferença entre o sinais dos sensores. Observa-se que o ponto de máximo da função se dá para o ângulo de 45° indicando, assim, que a faixa de ângulos entre esse ponto corresponde à região de maior variação da intensidade luminosa para um determinado deslocamento angular	59
Figura 25 - Resposta simulada do comportamento do sistema utilizando as características reais dos componentes e a intensidade do <i>LED</i> fixada em 120.000 lx, para todas as categorias de óculos polarizados. Em destaque, as regiões A, B e C que são situações críticas de operação do sistema.....	60
Figura 26 - Intensidade mínima de luz que atinge os sensores. Situação de teste de um FPS de categoria 4 com os eixos de polarização do FPS e do analisador cruzados	61
Figura 27 - Resolução óptica mínima para a determinação do eixo de polarização dos óculos. Ocorre para os FPS de categoria 4	62
Figura 28 - Montagem elaborada para avaliar a metodologia de medição, o sistema ótico e a resolução de deslocamento do filtro analisador.....	63
Figura 29 - Vista em corte dos componentes mecânicos que acomodam os componentes do sistema ótico envolvidos no movimento de rotação do filtro analisador	64
Figura 30 - Fonte de luz montada de forma a permitir o ajuste da posição da lente em relação ao <i>LED</i>	64
Figura 31 – Placa principal da montagem em bancada. Possui dois microcontroladores pela necessidade de dois barramentos de comunicação I2C, uma vez que o endereço dos sensores é o mesmo.....	65

Figura 32 – Diagrama de funcionamento da eletrônica desenvolvida para o teste em bancada. A placa principal é composta por dois microcontroladores onde, o primeiro, é responsável pela comunicação com sensores, atuadores e com uma porta <i>USB</i> ; e, o segundo, apenas pela comunicação com um sensor e envio dos valores para o primeiro microcontrolador e para outra porta <i>USB</i>	66
Figura 33 – Placa de controle para o motor de passo responsável por movimentar o filtro polarizador. Tem como componente principal o circuito integrado modelo A3967	66
Figura 34 – Placa de alimentação e condicionamento de sinais para os sensores de luz.....	67
Figura 35 – Placa de alimentação para fonte de luz. Desenvolvida para fornecer corrente constante na faixa de 100 a 1000 mA, tem como principal componente o circuito integrado modelo LM2941	68
Figura 36 - Diagrama do protótipo desenvolvido com base na etapa anterior de simulação e avaliação em bancada. O protótipo é composto dos subsistemas ótico, mecânico e eletrônico	69
Figura 37 – Diagrama do sistema ótico do protótipo. Difere do diagrama do teste em bancada pela utilização de outros sensores e <i>LED</i> e também pela substituição da lente plano-convexa por uma biconvexa	70
Figura 38 – Resposta dos conjuntos D65 x $V(\lambda)$, <i>LED</i> x SFH5712 e <i>LED_n</i> x SFH5711. Onde <i>LED_n</i> indica o modelo novo utilizado. A figura mostra uma maior correlação entre as curvas do novo conjunto e a estabelecida pela norma, que aquela obtida com a utilização do conjunto antigo.....	70
Figura 39 – A intensidade da luz que emerge do conjunto ótico é dada por I_0 . Ao atravessar os óculos em teste será atenuada para I_1 em função da transmitância dos óculos (τ_0) e da eficiência de polarização (e).	71
Figura 40 – Mostra o ângulo θ_d que é o desvio angular entre a direção do filtro analisador estabelecida pelo sensor de referência e a direção da superfície de referência do equipamento	73

Figura 41 – O ângulo θ_f destacado, mostra o erro de perpendicularidade entre os eixos de polarização das duas metades do filtro analisador.....	74
Figura 42 – Configuração do protótipo no momento de aquisição da linha de base. Ressalta a ausência de filtro entre a fonte de luz e o filtro analisador.....	74
Figura 43 – Configuração do protótipo para calibração. Ressalta a utilização de um filtro calibrador cuja direção do eixo de polarização seja conhecida e, com precisão de $\pm 0,25^\circ$	76
Figura 44 – Disposição do filtro calibrador no protótipo. O eixo em verde representa a horizontal do protótipo, o ângulo do eixo de polarização do filtro calibrador é positivo se está localizado em sentido anti-horário (traço azul) ou negativo se está localizado em sentido horário (traço vermelho).....	77
Figura 45 – Mostra que para $\theta_f = 0$ o ângulo de interseção é 45°	78
Figura 46 – Mostra que para $\theta_f = 3^\circ$ o ângulo de interseção é $43,5^\circ$	79
Figura 47 – Mostra que para $\theta_f = 8^\circ$ o ângulo de interseção é 41°	80
Figura 48 – Projeto completo do sistema mecânico do protótipo. Além de suportar o sistema ótico, também é capaz de posicionar os óculos para correta medição em ambas as lentes.....	80
Figura 49 – Detalhe da nova mecânica do sistema ótico. Com componentes para fixação na base do protótipo e um novo sensor ótico de referência	81
Figura 50 – Componentes mecânicos da fonte de luz. As peças 1 e 2 foram modificadas para as novas dimensões do filtro difusor e da lente. Tais peças permitem a adaptação de diferentes distâncias entre a lente e o <i>LED</i>	82
Figura 51 – Fixadores côncavos (em amarelo) para os óculos e também, os pinos de ajuste (em roxo) para alterar a distância entre os fixadores.....	82
Figura 52 – Mecânica para movimentação vertical. Composta por um motor DC acoplado em um conjunto de polias e correia (não mostrada), a qual está engastada em mancais (verde). Também, conta com um esticador de correia	83
Figura 53 – Mecânica para movimentação horizontal. Composta por um motor de passo acoplado em um conjunto de polias e correia (não mostrada), a qual está engastada na chapa	

que suporta a mecânica para movimentação vertical, que por sua vez está conectada aos mancais (verde). Também, conta com um esticador de correia..... 83

Figura 54 – Placa principal utilizada no protótipo. Possui um microcontrolador da família Kinetis L com núcleo ARM e córtex M0 da Freescale. A placa principal foi substituída por essa ter maior poder de processamento, maior memória e conexão *USB* estável..... 84

Figura 55 – Placa de controle para o motor de passo de movimentação horizontal. Tem como principal componente o circuito A3984 da Allegro Microsystems e faz controle por corrente com limite máximo de 2.000mA. Em (1) o circuito A3984, em (2) o conector para alimentação de potência, em (3) o conector para o motor de passo e em (4) o conector para controle..... 85

Figura 56 – Placa de controle para o motor DC para movimentação vertical. Tem como principal componente o circuito A3908 da Allegro Microsystems e faz controle por PWM com limite máximo de 500mA. Em (1) o conector de controle, em (2) o circuito A3908 e em (3) o conector de alimentação e saída para o motor 85

Figura 57 – Tela de cristal líquido de sete polegadas e sensível ao toque, componente da Interface Homem-Máquina. Faz comunicação serial com o microcontrolador e possui um software proprietário para desenvolvimento de seu conteúdo 86

Figura 58 – Placa de regulação de tensão. Fornece saída regulada nas tensões de 12V, 5V e 3,3V 86

Figura 59 – Placa dos sensores de luz (esquerda lado inferior, direita lado superior) com dois conversores A/D de modelo ADS1110. A comunicação com o microcontrolador é feita pelo protocolo I²C 87

Figura 60 – Resposta do circuito de conversão luminosa em valor digital. O valor convertido está na faixa de 0 a 32.768 para, respectivamente, uma entrada luminosa de intensidade luminosa na faixa de 1 a 71.298lx..... 89

Figura 61 – Diagrama de funcionamento do *software* implementado que é baseado no conceito de máquina de estados. Em (A) tem-se a configuração inicial dos periféricos, (B) é o estado inicial do *software*, (C) são as funções do menu verificar, (D) são as funções do menu testar e (E) as funções do menu configurar 90

Figura 62 – Diagrama com as principais telas do <i>software</i> . Pode-se observar a tela de exibição dos resultados da medição em um óculos, a tela com as funções do menu verificar e a tela com as funções do menu configurar	91
Figura 63 – Ilustração, em vista superior, do algoritmo de calibração da referência pela chave ótica. (a) deslocamento do filtro em ângulo crescente de $6,18^\circ$; (b) deslocamento do ponteiro até interrupção da chave ótica; (c) deslocamento do ponteiro em sentido crescente até a interrupção da chave ótica	94
Figura 64 - Gráfico do erro em função do ângulo para o intervalo entre 0° e 180° com incrementos de 10°	96
Figura 65 - Intensidades luminosas e seus limites de desvios no intervalo angular de 0 a 180° , para os sensores 1 e 2, com e sem o uso de um filtro difusor.....	97
Figura 66 - Intensidade luminosa normalizada, na região de interesse, pela utilização dos valores da primeira medição como linha de base para as outras quatro medidas	98
Figura 67 - Posição dos óculos em relação à montagem para execução de medidas	99
Figura 68 - Medições nas quatro lentes dos quatro diferentes óculos de sol para os dois sensores.....	100
Figura 69 - Destaque da região na Figura 68 onde os sensores medem a mesma intensidade luminosa. Calculando-se a diferença entre os ângulos encontrados para a direção do eixo de transmissão dos filtros polarizadores dos óculos de sol verifica-se a variação de até $20,79^\circ$ 100	
Figura 70 - Detalhe da Figura 68 mostrando os pontos de intensidade luminosa máxima e mínima para os óculos 1. O deslocamento de aproximadamente 4° entre os pontos de máximo e mínimo sugerem um problema de alinhamento dos filtros polarizadores no analisador.....	101
Figura 71 - Detalhe da Figura 68 mostrando a região de interseção dos sinais dos sensores para os óculos 3. A resolução do sistema ótico para a medida da direção do eixo de transmissão é de $0,023^\circ$ para o sensor 1 e $0,014^\circ$ para o sensor 2.	102
Figura 72 - Detalhe da Figura 69 mostrando os pontos de intensidades máxima e mínima para os óculos 4. A eficiência calculada para este polarizador é igual ou superior a 903:1.....	103

Figura 73 – Fotografia do protótipo em seu estado de desenvolvimento atual. Observa-se a ausência das peças côncavas para fixação dos óculos para medição	104
Figura 74 – Tela do software destacando a opção Auto da função Linha de Base do menu Configurar. A opção deve ser selecionada para a aquisição da linha de base, que é a etapa inicial do processo de calibração	105
Figura 75 – Tela do <i>software</i> destacando a opção Medir da função Calibrar do menu Configurar. A opção deve ser selecionada medição do filtro de referência utilizado para calibrar o protótipo.....	105
Figura 76 – Linha de base adquirida para o processo de calibração manual onde o sensor 1 está em vermelho e o sensor 2 em azul. As medidas foram feitas em incrementos de 0,1 graus e o resultado calculado com a média de três medidas.....	106
Figura 77 – Medidas feitas no filtro de referência para o processo de calibração manual onde o sensor 1 está em vermelho e o sensor 2 em azul. As medidas foram feitas em incrementos de 0,05 graus e o resultado calculado com a média de três medidas	106
Figura 78 – Regressão dos valores medidos feita com a equação que descreve o comportamento do sistema. A figura detalha a utilização do Curve Fitting Toolbox do MatLab®	107
Figura 79 – Plotagem das equações obtidas pela regressão nos valores medidos. Os pontos de mínimo, para o sensor 1, e máximo, para o sensor 2, foram marcados	107
Figura 80 – Posicionamento dos óculos no protótipo para a execução das medições. Pela falta das peças côncavas, a armação foi apoiada na estrutura do equipamento	108
Figura 81 – Resultado obtido para o primeiro óculos. O desvio obtido para a lente esquerda é superior ao limite estabelecido pela norma.....	109
Figura 82 – Resultado obtido para o segundo óculos. Os desvios obtidos para as lentes esquerda e direita, estão fora de conformidade para esses óculos em dois critérios da norma	109
Figura 83 – Resultado obtido para o terceiro óculos. Os desvios obtidos para as lentes esquerda e o desvio mutuo, reprovam esses óculos em dois critérios da norma	110

Figura 84 – Resultado obtido para o quarto óculos. Os desvios obtidos para a lentes esquerda e o desvio mútuo, não estão em conformidade para dois critérios da norma 110

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 (ABNT, 2004).....	38
Tabela 2 - Categorias de filtros de proteção solar de uso geral em função da transmitância de luz visível.....	47
Tabela 3 – Endereço dos dados armazenados na área reservada da memória <i>flash</i> do microcontrolador.	92
Tabela 4 – Dados transmitidos para o computador no primeiro teste, que tem por objetivo verificar a capacidade da montagem de posicionar corretamente o filtro analisador.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIE	Commission International de l'Eclairage – Comissão Internacional de Iluminação
DC	Direct Current – Corrente Contínua
FPS	Filtro de Proteção Solar
I ² C	Inter-Integrated Circuit – Circuito Inter-Integrado
IHM	Interface Homem Máquina
ISO	International Organization for Standardization – Organização Internacional para Padronização
LED	Light Emitting Diode – Diodo Emissor de Luz
LIO	Laboratório de Instrumentação Oftálmica
LFO	Laboratório de Física Oftálmica
PGA	Programmable Gain Amplifier – Amplificador de Ganho Programável
PVA	Polivinil Álcool
PWM	Pulse-Width Modulation – Modulação por Largura de Pulso
USB	Universal Serial Bus
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}$	graus
lx	lux
θ_a	ângulo formado entre o eixo de polarização de umas das metades do filtro analisador e a superfície de referência do protótipo
θ_b	ângulo de Brewster
θ_d	desvio angular entre a direção do filtro analisador estabelecida pelo sensor de referência e a direção da superfície de referência do protótipo
θ_f	ângulo que indica o erro de perpendicularidade entre os eixos de polarização das duas metades do filtro analisador
θ_m	ângulo deslocado a partir do sensor de referência
θ_o	ângulo entre o eixo de polarização dos óculos em teste e a direção da superfície de referência do protótipo
n_x	índice de refração do material x
E	campo elétrico
Θ	ângulo entre os eixos de transmissão de dois polarizadores
I	intensidade luminosa
SD65(λ)	distribuição espectral do iluminante padrão D65
V(λ)	função de sensibilidade espectral para visão diurna
transp	coeficiente de transmitância para dois filtro polarizadores alinhados paralelamente
$\tau_f(\lambda)$	transmitância espectral do filtro em análise
$\tau_{fc}(\lambda)$	transmitância espectral do filtro calibrador
$\tau_o(\lambda)$	transmitância espectral dos óculos
τ_v	transmitância da luz visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	35
1.1	Objetivos.....	36
2	ÓCULOS DE SOL	37
3	POLARIZAÇÃO	41
3.1	Meios Polarizadores	41
3.1.1	Polarizadores Naturais	42
3.1.2	Polarizadores Artificiais	44
3.2	Aplicação em Óculos de Sol.....	45
4	NORMA ABNT NBR15111:2004	47
4.1	Determinação da Transmitância de Luz Visível.....	48
4.2	Filtro Polarizador.....	49
4.2.1	Eficiência	49
4.2.2	Orientação.....	50
5	METODOLOGIA.....	53
5.1	Método de Medição	53
5.1.1	Sistema Ótico.....	54
5.1.2	Sistema Mecânico	62
5.1.3	Sistema Eletrônico	65
5.2	Desenvolvimento do Protótipo	68
5.2.1	Sistema Ótico.....	69
5.2.2	Sistema Mecânico	80
5.2.3	Sistema Eletrônico	84
5.2.4	Software.....	89
6	RESULTADOS	93
6.1	Método de Medição	93

6.1.1	Posicionamento do filtro analisador	93
6.1.2	Intensidade Luminosa	96
6.1.3	Análise em Óculos de Sol	98
6.2	Protótipo.....	103
6.2.1	Procedimento para Calibração Manual	104
6.2.2	Análise em Óculos de Sol	108
7	CONCLUSÕES	111
8	PROPOSTAS PARA CONTINUIDADE E MELHORIA DO PROTÓTIPO	113
REFERÊNCIAS.....		115
ANEXO A – Diagrama de funcionamento do software desenvolvido para o protótipo.....		119

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO) foi criado em janeiro de 1996 e até 2001 era denominado Laboratório de Física Oftálmica (LFO). O LFO e o LIO foram estruturados com o objetivo de desenvolver técnicas e sistemas para Oftalmologia. Atualmente situa-se no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP e prioriza pesquisas que são de utilidade direta para a comunidade e que possam ser repassadas para uso público ou privado (LIO, 2013).

Há alguns anos, o LIO passou a concentrar seus esforços nos estudos e avaliações de óculos de sol e, para isso, participa ativamente no desenvolvimento da norma brasileira NBR15111:2004 (ABNT, 2004) e também no projeto e construção de equipamentos para executar os testes estabelecidos por essa norma.

A avaliação da qualidade dos óculos de sol envolve a medição de diversas características. Os testes utilizados nesse processo podem ser divididos em mecânicos e óticos. Testes mecânicos avaliam: a deformação da armação, a fragilidade e a inflamabilidade das lentes. Já os testes óticos avaliam: a transmitância das lentes em vários intervalos específicos do espectro eletromagnético (visível, ultravioleta e infravermelho próximo), o nível de proteção à radiação ultravioleta, a influência das lentes no reconhecimento de sinais de trânsito, a potência ótica das lentes, a qualidade dos filtros polarizadores, entre outros.

O presente trabalho insere-se neste contexto e visa o desenvolvimento de um protótipo capaz de efetuar as medidas necessárias, estabelecidas pela NBR15111:2004, para avaliar as características dos filtros polarizadores utilizados nos óculos de sol.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é desenvolver um protótipo capaz de executar as medidas necessárias para avaliação de conformidade dos filtros polarizadores de óculos de sol de acordo com a norma brasileira NBR15111:2004. O sistema deve ter uma precisão de $\pm 0,5^\circ$ para medir o ângulo do filtro polarizador e, também, a precisão mínima de $\pm 0,18\%$ para medir a transmitância das lentes.

CAPÍTULO 2

2 ÓCULOS DE SOL

O uso de lentes tingidas para proteção contra o ofuscamento da visão causado pelo sol credita-se a James Ayscough, que em 1752 já recomendava o uso de lentes verdes ou azuis (DAIN, 2003).

A produção em massa de óculos de sol teve início na década de 1920, quando San Foster encontrou, nas praias de Atlantic City (EUA), um bom mercado e passou a vender seus óculos com a marca Foster-Grant (GRANT, 2013).

Em 1929 Edwin Land desenvolveu o primeiro filtro polarizador que foi comercializado com o nome de Polaroid (POLAROID, 2013).

Até 1962, apenas 39 tingimentos eram usados pelos fabricantes de óculos e apenas dois eram fabricados para lentes de plástico; todo restante era para lentes de vidro (SASIENI, 1962).

O mercado de óculos de sol passou por uma grande expansão na década de 1970, quando foi impulsionado, inclusive, pela adoção dos mesmos por estrelas da televisão.

Atualmente, devido à grande variedade de tingimentos e materiais disponíveis, os óculos de sol são divididos em categorias em função do grau de escurecimento de suas lentes (ABNT, 2004), 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.

Tabela 1 - Classificação em categorias e recomendação de uso para óculos de sol em função do grau de escurecimento de suas lentes (ABNT, 2004)

Categoria	Coloração	Uso	Condições Ambientais
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: Figuras adaptadas de Eyekit (2013)

As lentes podem também ser tingidas em degradê, Figura 1. Este recurso estético pode ser feito com diversas cores e níveis.

Figura 1 - Óculos de sol com lente em degradê. Recurso que pode ser feito com diversas cores e níveis

Fonte: Blooming Dales (2013)

Lentes espelhadas são atraentes não só pela estética, mas também por impedirem a visualização dos olhos de quem as utiliza, Figura 2.

Figura 2 - Óculos de sol com lente espelhada. Impedem a visualização dos olhos de quem as utiliza

Fonte: Blooming Dales (2013)

A fotocromaticidade e a polarização são efeitos comumente empregados para trazer conforto aos usuários de óculos. As lentes foto cromáticas adaptam seu grau de escurecimento em função do nível de luz ambiente, mais especificamente, são ativadas no intervalo espectral de 300 – 450nm. Ainda, quanto mais frio o ambiente, melhor a ativação; mais escura elas ficam (EPPIG, SPECK et al., 2012; LOOK e JOHNSON, 1979), como ilustrado na Figura 3. Já as lentes polarizadas conseguem bloquear a luz parcialmente polarizada no ambiente e, por isso, melhoram o contraste da imagem e impedem o ofuscamento da visão de seu usuário, Figura 4.

Figura 3 - Lente fotocromática. Possui a capacidade de variar a transmitância de luz visível em função da intensidade de luz ambiente.

Fonte: Living Betterat (2013)

Figura 4 - Óculos de sol com lente polarizada. O filtro polarizador bloqueia a luz parcialmente polarizada no ambiente e, por isso, melhoram o contraste da imagem e impedem o ofuscamento da visão de seu usuário

Fonte: The Perfect Shades (2013)

É sabido, que os óculos de sol devem ser utilizados não apenas para o conforto visual ou como um elemento de moda. Eles cumprem o papel de bloquear a radiação ultravioleta oriunda do sol que é associada a diversas doenças oculares (ELLERTON, ZUJAN et al., 2009; SLINNEY, 2001; WANG, BALAGULA et al., 2010).

CAPÍTULO 3

3 POLARIZAÇÃO

A polarização é uma propriedade de ondas transversais que descreve sua direção de oscilação. Para o caso de ondas eletromagnéticas, tal propriedade é comumente associada ao vetor campo elétrico (BOHREN e CLOTHIAUX, 2008).

A luz oriunda de fontes naturais, ou seja diretamente através do sol ou refletida pela lua é não polarizada, ou no máximo parcialmente polarizada (CRONIN e MARSHALL, 2011). Entretanto, é comum a presença de luz polarizada nos ambientes naturais, uma vez que a luz não polarizada pode se tornar plano-polarizada pela interação com a matéria (FERENCE JR., 1946). Alguns dos mecanismos de polarização da luz são: absorção por alguns materiais, espalhamento por partículas, refração através de cristais e ainda por reflexão em superfícies.

3.1 Meios Polarizadores

O feixe emergente de um polarizador é plano polarizado e não depende da polarização do feixe incidente. A direção de oscilação do feixe emergente é denominada eixo principal, ou eixo de transmissão, uma vez que a maioria dos elementos polarizadores utiliza esse princípio (CLARKE, 2009).

Polarizadores ideais não existem na prática, portanto, feixes emergentes são parcialmente polarizados (DAMIAN, 2013). A capacidade de polarização de um polarizador é

chamada eficiência de polarização. Existem polarizadores naturais e artificiais, descritos a seguir.

3.1.1 Polarizadores Naturais

Entende-se por polarização natural as interações ambientais que promovem a polarização parcial da luz natural ambiente, seja por reflexão ou por espalhamento. Na polarização por reflexão, quando a luz atinge a interface de dois meios, a componente cujo campo elétrico oscila na direção perpendicular ao plano de incidência será preferencialmente refletida (polarização S), em relação à componente cuja direção de oscilação do campo elétrico oscila na direção paralela ao plano de incidência (polarização P). Ainda, a refletividade para as componentes paralela e perpendicular é função do ângulo de incidência (WILSON E HAWKES, 1983), como mostrado pela Figura 5.

Figura 5 – Polarização por reflexão. O gráfico mostra a refletividade em função do ângulo de incidência e destaca o ângulo de Brewster onde o raio refratado é perpendicular ao raio refletido

Fonte: Adaptado da RP Photonics (2013)

O ângulo destacado (θ_b) é chamado ângulo de Brewster. Nele o raio refratado é perpendicular ao raio refletido conforme estabelecido pela lei de Brewster (NUSSENZVEIG, 1998). Também, a diferença entre as intensidades das polarizações S e P é a maior, o que torna este o ângulo de incidência para a maior eficiência de polarização por reflexão. O valor desse

ângulo é função dos índices de refração dos materiais que fazem fronteira (WILSON e HAWKES, 1983), conforme mostra a Equação 1, onde n_x é o índice de refração dos materiais.

$$\tan \theta_b = \frac{n_2}{n_1} \quad 1$$

Já a polarização por espalhamento, consiste na absorção da luz e sua re-irradiação. Para o espalhamento originado por partículas menores que o comprimento de onda da luz incidente, como o gás na atmosfera, o resultado é a polarização linear total e o grau de polarização será o mesmo para qualquer comprimento de onda, o que é chamado de espalhamento de Thomson. Átomos e moléculas são mais eficientes no espalhamento de luz de menor comprimento de onda por serem mais próximos ao seu tamanho, por isso, a atmosfera terrestre apresenta cor azul em função do espalhamento mais eficiente deste comprimento de onda. Este tipo de espalhamento é conhecido por espalhamento de Rayleigh (KÖNNEN, 1985). A Figura 6, ilustra esse mecanismo de polarização.

Figura 6 - Polarização por espalhamento de Rayleigh. A figura mostra a absorção e re-emissão da luz em uma molécula de água

Fonte: Mycroscopy U (2013)

3.1.2 Polarizadores Artificiais

Os polarizadores artificiais são construídos utilizando um dos seguintes efeitos: dicroísmo, birrefringência ou reflexão (HERMANN, 2007). A maioria dos polarizadores vendidos utiliza do dicroísmo, que é a anisotropia da absorção de luz, onde o coeficiente de absorção de luz é diferente para cada tipo de polarização (IIZUKA, 2002). Esse efeito é encontrado em alguns cristais, como a turmalina e é o princípio utilizado na fabricação dos polarizadores de filme, como o polaroide (LAND, 1951).

Os polarizadores de filme utilizam cadeias esticadas do polímero condutor polivinil álcool (PVA) dopado com iodo (HOBBS, 2008). A luz que incide com o campo elétrico alinhado paralelamente às cadeias de PVA estabelece uma corrente elétrica que absorve a energia luminosa. A luz que incide com campo elétrico perpendicular às cadeias é transmitida e essa direção recebe o nome de eixo de transmissão (TIPLER, 1995). A Figura 7, ilustra o funcionamento desse tipo de polarizador que é utilizado nos atuais óculos de sol.

Figura 7 - Polarização por absorção. A luz que incide com polarização paralela às cadeias de PVA é absorvida

Fonte: Polatechno (2013)

Para a situação onde se tem a luz atravessando consecutivamente dois polarizadores na qual seus respectivos eixos de transmissão formam um ângulo θ , como mostrado na Figura 8, a intensidade da luz que emerge pode ser calculada pela Lei de Malus (BUCHWALD, 1989).

Figura 8 - Lei de Malus. Determina a intensidade luminosa que emerge através de um conjunto de polarizadores alinhados

Fonte: Astarmath Sand Physics (2013)

Seja E o campo elétrico da luz entre os dois polarizadores, assim, a parcela desse campo que irá emergir do segundo polarizador será dada por E_f . Uma vez que a intensidade da luz é proporcional ao quadrado do campo elétrico $I \propto E^2$, obtêm-se a Lei de Malus em sua forma canônica, Equação 2.

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad 2$$

Observa-se que para $\theta = 90^\circ$, situação em que os polarizadores estão cruzados, nenhuma luz irá atravessar o conjunto.

3.2 Aplicação em Óculos de Sol

O propósito principal da utilização de filtros polarizadores em óculos de sol é a eliminação do intenso brilho da luz quando refletida em determinadas superfícies. Por ser predominante a parcela dessa luz cuja polarização é horizontal, os filtros polarizadores são montados com o seu eixo de transmissão alinhado verticalmente (DAIN, 2003). Dessa forma, como mostrado pela lei de Malus, somente a luz com polarização vertical irá atingir os olhos do usuário. A Figura 9 ilustra essa situação.

Figura 9 - Aplicação do filtro polarizador em óculos de sol, mostrando o alinhamento vertical do eixo de transmissão do filtro polarizador, em função da luz refletida nos ambientes naturais ser predominantemente de polarização horizontal.

Fonte: Fuglies Sunglasses Australia (2014)

CAPÍTULO 4

4 NORMA ABNT NBR15111:2004

A norma NBR15111:2004 estabelece as características físicas (mecânicas, óticas, etc.) para óculos de sol e filtros de proteção solar (FPS) com potência nominal nula, ou seja, sem grau, 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, 2004).

Essa norma classifica os FPS em cinco categorias em função do grau de transmitância de luz visível τ_v , como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Categorias de filtros de proteção solar de uso geral em função da transmitância de luz visível

Categoria do filtro	Faixa de transmitância visível τ_v
0	80% - 100%
1	43% - 80%
2	18% - 43%
3	8% - 18%
4	3% - 8%

Fonte: Adaptado da norma ANBT NBR15111:2004

As faixas de transmitância para o espectro visível dos filtros de proteção solar estão relacionadas com o grau de escurecimento desses filtros, ou seja, filtros de menor transmitância serão vistos mais escuros e os de maior transmitância serão vistos mais claros.

A categoria de um filtro é a base para estabelecer alguns requisitos, como o nível necessário de proteção à radiação ultravioleta e a eficiência de seu filtro polarizador.

4.1 Determinação da Transmitância de Luz Visível

Segundo a NBR15111:2004 para se determinar a transmitância visível τ_v de um filtro deve-se utilizar a distribuição espectral do iluminante padrão D65 ($S_{D65\lambda}(\lambda)$), que corresponde a uma média da distribuição espectral da luz diurna e possui temperatura de cor de aproximadamente 6500K, e a função de sensibilidade espectral para a visão diurna $V(\lambda)$, respectivamente normalizadas pelas ISO/CIE 10526 e ISO/CIE 10527, aplicadas como mostrado na Equação 3.

$$\tau_v = \frac{\int_{380}^{780} \tau_f(\lambda) V(\lambda) S_{D65\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} V(\lambda) S_{D65\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad 3$$

Onde, $\tau_f(\lambda)$ é a transmitância espectral do filtro em análise.

Na prática, o processo de determinação da transmitância visível consiste em obter o τ_f utilizando um espectrofotômetro e efetuar os cálculos mostrados na Equação 3. O produto $S_{D65\lambda}(\lambda)V(\lambda)$ é fornecido no Anexo A da NBR15111:2004 em incrementos de 10nm, e apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Produto da distribuição espectral do iluminante padrão D65 pela função de sensibilidade espectral para a visão diurna (ABNT, 2004)

4.2 Filtro Polarizador

Para se adequarem a norma NBR15111:2004, os filtros polarizadores montados em filtros solares devem cumprir com os requisitos de eficiência e orientação estabelecidos. Tais requisitos se aplicam aos filtros das categorias 1, 2, 3 e 4, uma vez que não existem filtros de proteção solar dotados de filtro polarizador de categoria 0, pois o uso do filtro polarizador com uma baixa eficiência como 2:1 já reduz a transmitância da lente para, no mínimo, a faixa de transmitância da categoria 1.

4.2.1 Eficiência

Os FPS de categoria um (1) devem apresentar eficiência mínima de 4:1 (quatro para um), ou seja, para cada quatro unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular, Figura 11.

Figura 11 - Representação da eficiência de polarização de 4:1 para filtros de proteção solar de categoria 1. Para cada quatro unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização (setas verdes tracejadas), uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular (seta vermelha traço-ponto)

Para os filtros solares de categorias dois (2), três (3) ou quatro (4) a eficiência mínima deverá ser de 8:1 (oito para um), ou seja, para cada oito unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular, Figura 12.

Figura 12 - Representação da eficiência de polarização de 8:1 para filtros de proteção solar de categorias 2, 3 e 4. Para cada oito unidades de luz transmitida através de seu eixo de polarização (setas verdes tracejadas), uma unidade poderá ser transmitida na direção perpendicular (seta vermelha traço-ponto)

A NBR15111:2004 sugere um dispositivo e uma metodologia de medição para a determinação da orientação de filtros polarizadores. Entretanto, por ser baseada na observação visual, tal metodologia não é capaz de caracterizar a eficiência de polarização de um filtro, conforme será discutido a seguir.

4.2.2 Orientação

A orientação de um filtro polarizador deve se dar de forma que o eixo de polarização do filtro esteja alinhado com a vertical do usuário, ou seja, disposto na direção perpendicular a seu horizonte. Para tal, deverão ser respeitadas as seguintes tolerâncias: os filtros não poderão ter um desvio maior que $\pm 5^\circ$ entre seus eixos de polarização e a vertical, Figura 13, e não poderão ter desvio mútuo maior que 6° , Figura 14.

Figura 13 - Requisito de posicionamento vertical do filtro polarizador. Os filtros não podem apresentar desvio maior que $\pm 5^\circ$ com o eixo vertical

Figura 14 - Requisito de desvio mútuo do filtro polarizador. Os filtros não podem apresentar desvio mútuo maior que 6°

O dispositivo proposto pela NBR15111:2004 consiste em um par de polarizadores montados individualmente, sobre um vidro, com campos de visão separados e cortados de modo a formar um ângulo de até $\pm 3^\circ$ com a horizontal, Figura 15. Os polarizadores devem poder ser girados com uma alavanca ligada a um ponteiro superposto a uma escala calibrada em graus. O campo de visão é iluminado por trás por uma fonte de luz difusa, como mostrado na Figura 16.

Figura 15 - Par de polarizadores montados segundo a NBR15111:2004. Os polarizadores devem ser montados sobre um vidro, com campos de visão separados e cortados de modo a formar um ângulo de $\pm 3^\circ$ com a horizontal

Figura 16 - Dispositivo proposto pela NBR15111:2004 para determinar a direção do eixo de transmissão dos filtros polarizadores em um óculos de sol

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR15111:2004

Pela configuração desse dispositivo, a direção do eixo de transmissão será determinada no momento em que as duas metades do filtro construído transmitirem a mesma intensidade luminosa. Neste momento faz-se a leitura na escala e encontra-se o ângulo que determina tal direção.

CAPÍTULO 5

5 METODOLOGIA

O desenvolvimento do protótipo foi feito em duas etapas: método de medição elaborado por simulação computacional pelo *software* MatLab® e análise experimental em uma montagem de bancada; construção do protótipo com base nos resultados da etapa inicial.

5.1 Método de Medição

A elaboração do método de medição foi feita, inicialmente, pela avaliação do sistema ótico proposto por simulação computacional. A avaliação trouxe o conhecimento a respeito das características necessárias aos componentes utilizados. Posteriormente, o sistema ótico proposto foi montado em bancada para avaliação prática das suas características de funcionamento. A Figura 17 traz o diagrama dessa montagem, que possui os seguintes subsistemas: ótico, para tratamento do feixe de luz; mecânico, para movimentação do filtro analisador, posicionamento e sustentação das massas; eletrônico, para acionamento e controle do sistema mecânico, da fonte de luz, dos sensores e também para processamento dos dados e comunicação com um computador.

Figura 17 - Diagrama da montagem feita em bancada para avaliação prática do método de medição proposto. A montagem é composta pelos subsistemas ótico, mecânico e eletrônico

5.1.1 Sistema Ótico

O sistema ótico é composto por uma fonte de luz (conjunto *LED*, lente plano-convexa e filtro difusor), pelos óculos em teste, pelo filtro analisador, os orifícios para passagem de luz designados por *pinhole* e os sensores de luz, dispostos conforme o esquema da Figura 18.

Figura 18 - Esquema simplificado do sistema ótico proposto. Onde, I_0 é a intensidade inicial, I_1 a intensidade após os óculos, I_2 e I_3 as intensidades após o analisador

Nessa montagem, a luz emitida pelo *LED* é refratada pela lente plano-convexa, atravessa o difusor e emerge da fonte de luz com intensidade inicial I_0 . Ao atravessar os óculos em teste,

a intensidade I_0 é atenuada para I_1 e, em seguida, após o passar pelo filtro analisador (duas metades de filtros polarizadores ortogonais, dispostos em semicírculo para compor o círculo) tem a intensidade modificada e decomposta nas parcelas I_2 e I_3 , polarizadas ortogonalmente entre si, que após passar pelos *pinholes*, incidem sobre os sensores que estão montados atrás dos mesmos.

A norma utiliza, para a avaliação da transmitância do filtro, o espectro de emissão do iluminante padrão D65 em conjunto com a função de sensibilidade espectral para visão diurna $V(\lambda)$. Assim, selecionou-se um conjunto *LED* e sensores, que oferecessem resposta similar ao determinado pela norma, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Respostas dos conjuntos Iluminante padrão D65 x $V(\lambda)$ e *LED* x SFH5712

O *LED* selecionado é o de modelo LUW W5AM-LXLY-6P7R-Z e os sensores selecionados são os de modelo SFH-5712, ambos do fabricante OSRAM Opto Semiconductors. O analisador consiste em duas metades do filtro polarizador modelo A85-919 da Edmund Optics - montados com os eixos de transmissão alinhados ortogonalmente.

A disposição dos sensores atrás do filtro analisador é detalhada na Figura 20.

Figura 20 - Disposição dos sensores atrás do filtro analisador. Ao movimentar o filtro analisador, os sensores tem liberdade para descrever um movimento relativo ao filtro analisador de até 130° sem que sejam mecanicamente encobertos pela junção das metades dos filtros

O sensor 1 está posicionado a 25° em relação ao eixo horizontal da montagem e o sensor 2 a 205°. Nesta configuração, ao movimentar o filtro analisador, os sensores tem a liberdade de descrever um movimento relativo ao filtro analisador de até 130° sem que sejam mecanicamente encobertos pela junção das metades do filtros.

5.1.1.1 *Análise do Sistema Ótico*

Uma análise simplificada do sistema óptico proposto é obtida considerando-se o uso de uma fonte de luz difusa e filtros polarizadores ideais hipotéticos, na qual a eficiência de polarização é 100% e a transmitância luminosa é também de 100% para luz polarizada na direção do eixo de transmissão. Pela Lei de Malus – e sabendo-se que a intensidade I_1 é a metade de I_0 (a luz difusa pode ser interpretada por duas componentes ortogonais de mesma intensidade, assim, uma vez que o filtro polarizador ideal transmite apenas a luz em uma direção, a metade da luz incidente é bloqueada) as Equações 4,5 e 6, descrevem a intensidade da luz, relativas à intensidade inicial I_0 , nos diferentes pontos.

$$I_1 = 0,5I_0 \quad 4$$

$$I_2 = I_1 \cos^2(90 - \theta) \quad 5$$

$$I_3 = I_1 \cos^2(\theta)$$

6

Assim, a resposta desse sistema, montado com polarizadores ideais hipotéticos, é como mostrada pela Figura 21.

Figura 21 - Intensidade luminosa normalizada através do sistema utilizando filtros polarizadores ideais hipotéticos. I_0 é a intensidade luminosa emitida pela fonte de luz; I_1 a intensidade luminosa após a luz atravessar os óculos e I_2 e I_3 as intensidades após a luz atravessar o analisador

Entretanto, ao contrário dos filtros polarizadores ideais, os óculos polarizados possuem eficiência de polarização limitada e não apresentam transmitância à luz visível de 100%, conforme discutido no capítulo anterior. Portanto, uma melhor aproximação da intensidade luminosa ao longo do sistema ótico proposto é obtida pela Equação 7.

$$I_3 = \text{transm}_p (I_{1p} \cos^2(\theta) + I_{1n} \cos^2(90 - \theta)) \quad 7$$

Onde, transm_p é o coeficiente de transmitância, para dois filtros polarizadores alinhados, o qual, para o filtro utilizado, tem o valor de 0,38 fornecido pelo fabricante (OPTICS, 2013). I_{1p} e I_{1n} são as intensidades de luz que atravessam os óculos, com direções de polarização paralela e perpendicular ao eixo de polarização de sua lente e dependem da transmitância e da eficiência de polarização das lentes.

Como exemplo, procede-se com o cálculo das intensidades, paralela e perpendicular à direção de polarização, para um FPS de categoria 1, com transmitância mínima de 43%, segundo a Tabela 2, e eficiência mínima de polarização de 4:1, como mostra a Figura 11. As intensidades I_{1p} e I_{1n} serão dadas, respectivamente, pelas Equações 8 e 9.

$$I_{1p} = 0,43I_0 \left(\frac{4}{5} \right) \quad 8$$

$$I_{1n} = 0,43I_0 \left(\frac{1}{5} \right) \quad 9$$

Substituindo os valores obtidos na Equação 7, obtêm-se a intensidade para a faixa de ângulos desejada.

A Figura 22, traz o resultado do cálculo de intensidades luminosas para todas as categorias de óculos polarizados considerando as transmitâncias mínimas e máximas, além das respectivas eficiências de polarização.

Figura 22 – Transmitância relativa após o filtro analisador para todas as categorias de FPS polarizados em função do ângulo entre os eixos de transmissão do analisador e dos óculos. Foram consideradas as transmitâncias mínimas e máximas de cada uma das categorias de óculos polarizados e suas respectivas eficiências de polarização

Cabe aqui lembrar que os filtros de categoria 0 não são polarizados, pois, como mencionado anteriormente, o uso de um filtro polarizador mesmo que com baixa eficiência como 2:1 já reduz a transmitância da lente para a faixa de transmitâncias da categoria 1.

5.1.1.2 Estratégia para Medição

O eixo de polarização é determinado quando o sinal dos sensores possuem o mesmo valor numérico, pois, ao considerar o comportamento do sistema baseado na análise

simplificada, Figura 23, a derivada da curva que é o módulo da diferença entre os sinais dos sensores possui ponto de máximo para um ângulo de 45° , como mostrado pela Figura 24.

Figura 23 – Sinal nos sensores 1 e 2 e o módulo da diferença dos sinais, a partir da análise simplificada

Figura 24 - Derivada da função módulo da diferença entre os sinais dos sensores. Observa-se que o ponto de máximo da função se dá para o ângulo de 45° indicando, assim, que a faixa de ângulos entre esse ponto corresponde à região de maior variação da intensidade luminosa para um determinado deslocamento angular

Dessa forma, a variação da intensidade luminosa entre os sensores será máxima na região próxima a 45° . Ou seja, para um mesmo incremento angular essa região irá apresentar a maior variação na intensidade luminosa, tornando-a a região mais adequada para a medição da direção do eixo de transmissão do filtro polarizador dos óculos de sol.

Uma vez obtido o eixo de polarização, o filtro analisador é girado em 45° e medidas de intensidades máxima e mínima são efetuadas para o cálculo da eficiência de polarização, utilizando um dos sensores para cada medida.

5.1.1.3 Resolução das Medidas

A resolução das medidas foi inicialmente avaliada pela simulação do sistema proposto com as características reais dos componentes utilizados pelo *software* MatLab®.

O sensor SFH5712 tem resposta na faixa de 3 a 60.000 lx, possui saída digital, pelo protocolo I²C, com resolução de 16 bits e capacidade de fazer média amostral. Assim, ajustou-se a potência de emissão do *LED* para o sensor trabalhar no intervalo máximo de sua faixa de resposta e ser capaz de se adequar a todas as categorias de FPS.

Fixando a intensidade luminosa em 120.000 lx e considerando a eficiência de polarização do analisador, que é de 9.000:1 (dado do fabricante), como sendo 100%, a intensidade da luz que atinge o sensor quando não há óculos para análise é de 54.000 lx, uma vez que a transmitância do analisador é de 45% (OPTICS, 2013). Assim, a resposta do sistema é a apresentada na Figura 25, considerando a eficiência e as transmitâncias mínimas e máximas para todas as categorias de óculos polarizados.

Figura 25 - Resposta simulada do comportamento do sistema utilizando as características reais dos componentes e a intensidade do *LED* fixada em 120.000 lx, para todas as categorias de óculos polarizados. Em destaque, as regiões A, B e C que são situações críticas de operação do sistema

A região A representa a intensidade máxima de luz que atinge os sensores; ocorrerá durante o teste de uma lente de maior transmitância da categoria 1 com os eixos de polarização dos óculos e do analisador alinhados paralelamente. Conforme se pode verificar, esta intensidade será menor que 25.000 lx, não saturando o sensor utilizado.

A região B representa a intensidade mínima de luz que os sensores irão receber, ocorrerá quando do teste de uma lente de menor transmitância da categoria 4 com os eixos de polarização dos óculos e do analisador alinhados perpendicularmente. Conforme detalhado na Figura 26.

Figura 26 - Intensidade mínima de luz que atinge os sensores. Situação de teste de um FPS de categoria 4 com os eixos de polarização do FPS e do analisador cruzados

É importante que haja transmissão de luz mesmo nessa condição para que o cálculo da eficiência de polarização possa ser efetuado. Observa-se que a intensidade luminosa é da ordem de 150 lx, valor que ainda é mensurável com o sensor utilizado.

Finalmente, na região C, que é onde o sistema terá a menor sensibilidade de identificação da direção do eixo de polarização, verifica-se, através da ampliação dessa região, Figura 27, que para o incremento de 1° no ângulo formado entre os eixos de polarização dos óculos e do analisador a variação no sensor é de 18 lx. O sensor SFH5712 utilizado nesta simulação possui um conversor analógico/digital (A/D) de 16 bits e sua faixa de sensibilidade vai de 3 a 60.000 lx e, segundo o fabricante, faz a correspondência de um 1 lx no sinal de entrada para 1 nível digital no sinal de saída. Por isso, a variação na entrada de 18 lx corresponde a uma variação na saída de 18 níveis. Fazendo a divisão do incremento de 1° dado no sistema, pela variação no sinal de saída do sensor, obtêm-se a resolução de $0,056^\circ$ para esta, que é a pior situação para o sistema ótico determinar a direção do eixo de polarização.

Figura 27 - Resolução óptica mínima para a determinação do eixo de polarização dos óculos. Ocorre para os FPS de categoria 4

5.1.2 Sistema Mecânico

O conjunto mecânico deve suprir algumas necessidades fundamentais: ser capaz de girar o filtro analisador com uma resolução mínima de $0,25^\circ$, possibilitar o deslocamento do sistema para medição em ambas as lentes dos óculos, permitir o ajuste na distância entre os componentes do sistema ótico, conferir suporte adequado para a armação dos óculos e suportar todas as massas.

A Figura 28, mostra a montagem elaborada para avaliar o método de medição, o sistema ótico e a resolução de deslocamento do filtro analisador.

Figura 28 - Montagem elaborada para avaliar a metodologia de medição, o sistema ótico e a resolução de deslocamento do filtro analisador

A Figura 29, mostra com detalhes, por uma vista em corte, os componentes mecânicos que em conjunto com o sistema ótico permite a execução do método de medição. A Peça 1 é responsável por suportar os demais componentes e também possui os *pinholes* do sistema ótico. A Peça 2 se apoia na Peça 1 por um rolamento de esferas, nela os filtros polarizadores do analisador são montados em um rebaixo; aberturas permitem a passagem da luz para a faixa de ângulos entre 25° e 155° .

O movimento de rotação do filtro analisador é efetuado por um motor de passo com um redutor acoplado a Peça 2, seu controle se dá por meio de um *encoder* e uma chave ótica. Utilizou-se o motor modelo AM 1524-A-0,25-12,5-06-0904 da FAULHABER, em conjunto com a caixa de redução de relação 485:1 e 15/8 de polegada de diâmetro e o *encoder* AE23B8 ambos do mesmo fabricante. A resolução obtida através desse conjunto é de $0,031^\circ$ utilizando os dois canais do *encoder*, que gera 24 pulsos por revolução. A chave ótica, modelo OPB825 da Optek Technology, tem o propósito de referenciar o ajuste de zero do sistema no início das medições.

Figura 29 - Vista em corte dos componentes mecânicos que acomodam os componentes do sistema ótico envolvidos no movimento de rotação do filtro analisador

A fonte de luz, Figura 30, foi montada de forma a permitir o ajuste da posição da lente em relação ao *LED* e a inclusão de um filtro difusor para a avaliação do comportamento do sistema.

Figura 30 - Fonte de luz montada de forma a permitir o ajuste da posição da lente em relação ao *LED*

Os demais requisitos mecânicos: o deslocamento para medição de ambas as lentes e os suportes para os óculos e as demais massas, serão desenvolvidos no protótipo final do equipamento, uma vez que essa montagem teve foco apenas na validação do método de medição.

5.1.3 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico desenvolvido para esta montagem desempenha as seguintes funções: suprir a fonte de luz com uma corrente constante e ajustável; controlar o motor de passo responsável pelo deslocamento do filtro analisador, tendo como referência os sinais de um *encoder* e de uma chave ótica; fazer as comunicações com os sensores via I²C e com um computador, via porta *USB*.

Para cumprir tais tarefas esse sistema foi dividido em quatro placas de circuito impresso: a principal, onde estão os microcontroladores, que executam o *software* programado; a de acionamento de potência do motor de passo; a de alimentação e condicionamento de sinais para os sensores de luz; e a de alimentação para a fonte de luz.

A placa principal, Figura 31, possui dois microcontroladores de modelo PIC18f4550, da Microchip, que comunicam-se entre si pelo protocolo serial. A utilização de dois microcontroladores se dá pela necessidade de usar dois barramentos I²C para comunicação com os sensores de luz, uma vez que os sensores não oferecem possibilidade de escolha de seu endereço no barramento e esse protocolo não permite dois dispositivos com mesmo endereço em um barramento. No primeiro microcontrolador estão conectados, entre outros, a placa de controle do motor de passo, o *encoder* e a chave ótica. O segundo microcontrolador cumpre apenas o papel de comunicar com o segundo sensor e enviar os valores para o primeiro microcontrolador e para porta *USB*, conforme explicado no diagrama da Figura 32.

Figura 31 – Placa principal da montagem em bancada. Possui dois microcontroladores pela necessidade de dois barramentos de comunicação I2C, uma vez que o endereço dos sensores é o mesmo

Figura 32 – Diagrama de funcionamento da eletrônica desenvolvida para o teste em bancada. A placa principal é composta por dois microcontroladores onde, o primeiro, é responsável pela comunicação com sensores, atuadores e com uma porta *USB*; e, o segundo, apenas pela comunicação com um sensor e envio dos valores para o primeiro microcontrolador e para outra porta *USB*

A placa de acionamento de potência do motor de passo utiliza o circuito integrado de modelo A3967, da Allegro Microsystems, e faz o controle de corrente com limite máximo de 250 mA, conforme mostra a Figura 33.

Figura 33 – Placa de acionamento de potência do motor de passo responsável por movimentar o filtro polarizador. Tem como componente principal o circuito integrado modelo A3967

Na placa de alimentação e condicionamento de sinais para os sensores, Figura 34, a tensão de 5V proveniente da placa principal é regulada nas tensões de 2,5V e 1,8V para

alimentar os sensores e os circuitos de *pull-up* dos pinos de comunicação dos sensores, respectivamente.

Figura 34 – Placa de alimentação e condicionamento de sinais para os sensores de luz

A placa de alimentação para a fonte de luz, Figura 35, foi desenvolvida para fornecer corrente constante e utiliza, como principal componente, o circuito integrado modelo LM2941, da Texas Instruments, que em conjunto com os reguladores de tensão LM7806 e LM7812, ambos da Farchild Semiconductor, e o amplificador operacional CA3140, da Intersil, permitem o ajuste da corrente na fonte de luz na faixa entre 100 mA e 1000 mA. No momento, o ajuste é feito através de um *trimpot* presente na placa, entretanto no projeto final o ajuste será feito de forma automática pelo *software* no microcontrolador. Também outras alternativas de controle de corrente do *LED* serão avaliadas na tentativa de uma forma mais compacta e eficiente.

Figura 35 – Placa de alimentação para fonte de luz. Desenvolvida para fornecer corrente constante na faixa de 100 a 1000 mA, tem como principal componente o circuito integrado modelo LM2941

5.2 Desenvolvimento do Protótipo

O protótipo foi construído com base nos resultados da etapa anterior de simulações e testes em bancada. Entretanto, algumas modificações foram feitas para melhorar as características de medição e para adaptar à nova configuração mecânica, que agora tem recursos não presentes no teste em bancada. O diagrama do protótipo é mostrado na Figura 36 e é dividido nos sistemas ótico, mecânico e eletrônico para melhor explicação de seu funcionamento.

Figura 36 - Diagrama do protótipo desenvolvido com base na etapa anterior de simulação e avaliação em bancada. O protótipo é composto dos subsistemas ótico, mecânico e eletrônico

A seguir, tem-se a explicação detalhada dos subsistemas do protótipo.

5.2.1 Sistema Ótico

O sistema ótico possui a mesma configuração do anterior testado em bancada. Contudo, algumas alterações nos componentes foram feitas: os sensores foram substituídos por um de maior correlação com a função de sensibilidade para visão diurna $V(\lambda)$ e que possui resposta logarítmica, em função disso, o *LED* do conjunto ótico foi substituído pelo de modelo SSR-50-W65S-R21-GK102 da Luminus Devices, por ser mais potente que o anterior; também, em função da nova configuração mecânica, a lente da fonte de luz foi substituída por uma biconvexa de diferente distância focal. O novo arranjo do sistema ótico está apresentado no diagrama da Figura 37.

Figura 37 – Diagrama do sistema ótico do protótipo. Difere do diagrama do teste em bancada pela utilização de outros sensores e *LED* e também pela substituição da lente plano-convexa por uma biconvexa

O novo conjunto *LED* e sensores oferecem uma resposta espectral mais fiel ao conjunto iluminante padrão D65 e função de sensibilidade espectral para visão diurna $V(\lambda)$, especificada pela norma, conforme mostra as curvas da Figura 38. A mudança de *LED* foi também melhor adaptada pela característica de sensibilidade logarítmica do sensor, que é capaz de trabalhar com maior intensidade luminosa.

Figura 38 – Resposta dos conjuntos D65 x $V(\lambda)$, *LED* x SFH5712 e *LEDn* x SFH5711. Onde *LEDn* indica o modelo novo utilizado. A figura mostra uma maior correlação entre as curvas do novo conjunto e a estabelecida pela norma, que aquela obtida com a utilização do conjunto antigo

5.2.1.1 Caracterização

A caracterização do sistema é fundamental para possibilitar a medição em óculos de sol, pois é a partir dela que a calibração do sistema e a conversão de valores digitais em

transmitância poderá ser feita. A Figura 39 traz a disposição de seus componentes e é utilizada para definir a equação que rege seu funcionamento.

Figura 39 – A intensidade da luz que emerge do conjunto óptico é dada por I_0 . Ao atravessar os óculos em teste será atenuada para I_1 em função da transmitância dos óculos (τ_o) e da eficiência de polarização (e).

A eficiência de um filtro polarizador é comumente indicada na forma $e:1$, onde, e indica o número de unidades de luz que atravessa o filtro polarizador na direção de seu eixo de polarização para cada unidade de luz, que o atravessa na direção normal a esse eixo.

Sabe-se que um filtro polarizador cuja eficiência de polarização tenda ao infinito ($\infty:1$) fará com que a intensidade I_1 seja igual a metade de I_0 , da mesma forma um filtro polarizador com eficiência de polarização desprezível ($1:1$) fará com que a intensidade I_1 seja igual a intensidade I_0 , a menos da influência da transmitância do filtro τ_o . Assim a intensidade I_1 é dada por:

$$I_1 = I_0 \tau_o \left(\frac{e}{2e+1} \right) \quad 10$$

Entretanto, pelo fato da eficiência de polarização nos óculos de sol ser limitada, se faz necessário ressaltar que a intensidade de luz I_1 pode ser dada em função de suas componentes paralela I_{1p} e normal I_{1n} ao eixo de polarização dos óculos.

$$I_1 = I_{1p} + I_{1n} \quad 11$$

Segundo a definição de eficiência do filtro as componentes paralela e normal de I_1 serão dadas por:

$$I_{1p} = I_0 \tau_o \left(\frac{e}{e+1} \right) \quad 12$$

$$I_{1n} = I_0 \tau_o \left(\frac{1}{e+1} \right) \quad 13$$

Ao atravessar o filtro analisador, a luz de intensidade I_1 irá encontrar dois caminhos óticos distintos o que a decompõe nas parcelas I_2 e I_3 . Considerando que o filtro polarizador do analisador possua eficiência de polarização limitada e aplicando-se a lei de Malus para dois filtros polarizadores alinhados, tem-se a equação para intensidade I_2 em função do ângulo formado entre os eixos de polarização dos óculos e da respectiva metade do analisador.

$$I_2(\theta_a) = I_{2p}(\theta_a) + I_{2n}(\theta_a) \quad 14$$

$$I_{2p}(\theta_a) = I_{1p} \tau_a(\theta_n) \frac{e_a}{e_a+1} \cos^2(\theta_a - \theta_o) + I_{1n} \tau_a(\theta_n) \frac{e_a}{e_a+1} \cos^2(\theta_a - \theta_o + 90) \quad 15$$

$$I_{2n}(\theta_a) = I_{1n} \tau_a(\theta_n) \frac{1}{e_a+1} \cos^2(\theta_a - \theta_o) + I_{1p} \tau_a(\theta_n) \frac{1}{e_a+1} \cos^2(\theta_a - \theta_o + 90) \quad 16$$

Onde, a transmitância do filtro polarizador do analisador depende da posição angular do mesmo e é dada por $\tau_a(\theta_n)$, sua eficiência de polarização é dada por (e) e o ângulo θ_a é o formado entre o eixo de polarização de uma das metades do analisador e a superfície de referência do equipamento.

O filtro polarizador utilizado no analisador possui eficiência de polarização da ordem de 10.000:1 e o limite inferior mínimo estabelecido pela norma NBR15111:2004 para a eficiência de polarização dos óculos de sol é de 8:1. Assim, pode-se desconsiderar a parcela de luz que emerge do analisador na direção normal ao seu eixo de polarização e simplificar a equação para I_2 .

$$I_2(\theta_a) = I_{2p}(\theta_a) = I_{1p} \tau_a(\theta_n) \cos^2(\theta_a - \theta_o) + I_{1n} \tau_a(\theta_n) \cos^2(\theta_a - \theta_o + 90) \quad 17$$

Ao se ligar o equipamento o sensor de referência do analisador não fará com que haja coincidência entre a direção do eixo de polarização de uma das metades do analisador e a

superfície de referência do equipamento. Por isso, o ângulo θ_a é decomposto conforme mostrado.

$$\theta_a = \theta_m - \theta_d \quad 18$$

Onde, θ_m é o ângulo deslocado a partir do sensor de referência e θ_d é o desvio angular entre a direção do filtro analisador estabelecida pelo sensor de referência e a direção da superfície de referência do equipamento, conforme Figura 40.

Figura 40 – Mostra o ângulo θ_d que é o desvio angular entre a direção do filtro analisador estabelecida pelo sensor de referência e a direção da superfície de referência do equipamento

Assim, a partir da intensidade da fonte luminosa I_0 e considerando-se a direção estabelecida pelo sensor de referência, a intensidade I_2 que chega a um dos sensores é dada pela Equação 19.

$$I_2(\theta_m) = I_0 \frac{e}{e+1} \tau_o \tau_{a2}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) + I_0 \frac{1}{e+1} \tau_o \tau_{a2}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90) \quad 19$$

Já a intensidade luminosa I_3 que atinge o outro sensor é dada pela Equação 20.

$$I_3(\theta_m) = I_0 \frac{e}{e+1} \tau_o \tau_{a3}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90 + \theta_f) + I_0 \frac{1}{e+1} \tau_o \tau_{a3}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f) \quad 20$$

Onde, θ_f é o ângulo que indica o erro de perpendicularidade entre os eixos de polarização das duas metades do filtro analisador, conforme mostra a Figura 41.

Figura 41 – O ângulo θ_f destacado, mostra o erro de perpendicularidade entre os eixos de polarização das duas metades do filtro analisador

As equações 19 e 20, mostram que as intensidades I_2 e I_3 são função da transmitância do filtro analisador $\tau_a(\theta_n)$ que, por sua vez, depende da posição angular desse filtro θ_n . Pode-se eliminar tal dependência pela normalização das intensidades por uma linha de base.

O processo para aquisição da linha de base é feito sem a presença de quaisquer outros filtros entre a fonte de luz e o analisador, conforme Figura 42.

Figura 42 – Configuração do protótipo no momento de aquisição da linha de base. Ressalta a ausência de filtro entre a fonte de luz e o filtro analisador

Medidas são feitas para o intervalo útil de cada metade do analisador que é de aproximadamente 130 graus, por ser limitado pelo espaço ocupado pelos sensores, conforme discutido anteriormente.

A transmitância das metades do filtro analisador, por definição, é dada pelas equações 21 e 22.

$$\tau_{a2}(\theta_n) = \frac{I_{LB2}(\theta_n)}{I_0} \quad 21$$

$$\tau_{a3}(\theta_n) = \frac{I_{LB3}(\theta_n)}{I_0} \quad 22$$

A substituição das equações 21 e 22 nas equações 19 e 20 elimina a dependência da transmitância do filtro analisador nas ultimas e as torna dependentes das intensidades das linhas de base, conforme mostra as equações 23 e 24.

$$I_2(\theta_m) = \frac{e}{e+1} \tau_o I_{LB2}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) + \frac{1}{e+1} \tau_o I_{LB2}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90) \quad 23$$

$$I_3(\theta_m) = \frac{e}{e+1} \tau_o I_{LB3}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90 + \theta_f) + \frac{1}{e+1} \tau_o I_{LB3}(\theta_n) \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f) \quad 24$$

Entretanto é possível eliminar a dependência da intensidade da linha de base pela definição da transmitância, conforme descrito pelas equações 25 e 26.

$$\tau_2(\theta_m) = \frac{I_2(\theta_m)}{I_{LB2}(\theta_n)} \quad 25$$

$$\tau_3(\theta_m) = \frac{I_3(\theta_m)}{I_{LB3}(\theta_n)} \quad 26$$

As equações 27 e 28 resultado da substituição das equações 25 e 26 nas equações 23 e 24 evidenciam a independência entre o valor medido para transmitância e a intensidade da fonte de luz I_0 .

$$\tau_2(\theta_m) = \frac{\tau_o}{e+1} \left[e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90) \right] \quad 27$$

$$\tau_3(\theta_m) = \frac{\tau_o}{e+1} \left[e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90 + \theta_f) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f) \right] \quad 28$$

5.2.1.2 Calibração

A calibração do sistema consiste na determinação dos valores das constantes θ_d e θ_f . Para isso, um filtro polarizador de calibração deve ser colocado no lugar em que se coloca os óculos para medição, Figura 43. Esse filtro deve apresentar uma incerteza máxima na direção

de seu eixo de polarização de $\pm 0,25^\circ$ dado que a norma estabelece que as medidas na direção do eixo de polarização dos óculos tenha precisão de $\pm 0,5^\circ$.

Figura 43 – Configuração do protótipo para calibração. Ressalta a utilização de um filtro calibrador cuja direção do eixo de polarização seja conhecida e, com precisão de $\pm 0,25^\circ$

Também, sua eficiência de polarização deve ser muito alta em relação à eficiência esperada para os óculos de sol e, uma vez que a direção de seu eixo de polarização é conhecida, torna-se possível a determinação do ângulo θ_d pela substituição dos parâmetros desse filtro na Equação 27 conforme a Equação 29.

$$\tau_2(\theta_m) = \tau_{fc} \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) \quad 29$$

Onde τ_{fc} é a transmitância do filtro calibrador.

Sabe-se que ao girar o filtro analisador o ponto de máxima intensidade de luz no sensor se dará quando houver o alinhamento entre os eixos de polarização do filtro calibrador e sua metade do analisador. De acordo com a Equação 29 esse momento se dará quando o termo cosseno ao quadrado for igual a 1. Ou seja:

$$\theta_m - \theta_d - \theta_o = 0 + n\pi \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Uma vez que os ângulos θ_o e θ_m são conhecidos, o primeiro medido pelo equipamento por um *encoder* e o segundo especificado pelo fabricante do filtro calibrador, o ângulo θ_d é determinado de maneira trivial. Cabendo se atentar para o sentido do ângulo θ_o conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 – Disposição do filtro calibrador no protótipo. O eixo em verde representa a horizontal do protótipo, o ângulo do eixo de polarização do filtro calibrador é positivo se está localizado em sentido anti-horário (traço azul) ou negativo se está localizado em sentido horário (traço vermelho)

Na Figura 44, a direção em traço simples e cor verde é a do eixo horizontal do equipamento. Os outros dois traços representam as possíveis direções do eixo de polarização do calibrador e mostra que caso essa direção esteja deslocada em sentido anti-horário o valor do ângulo θ_o é positivo e, caso contrário, seu valor é negativo.

O próximo passo na calibração do equipamento é a determinação do ângulo θ_f , formado entre os eixos de polarização das duas metades do filtro analisador. O procedimento pode ser visto como a continuação do anterior.

Ao encontrar o ponto de máxima intensidade luminosa em um dos sensores, espera-se que o outro sensor esteja no ponto de mínima intensidade luminosa, pelo fato de que os eixos de polarização das metades do analisador estarem girados de aproximadamente 90° . Conforme discutido anteriormente, para máxima intensidade em $\tau_2(\theta_m)$, a soma dos ângulos $\theta_m - \theta_d - \theta_o$ deve ser $0^\circ + n\frac{\pi}{2} \forall n \in N$. Assim, para essa situação, a intensidade luminosa no outro sensor $\tau_3(\theta_m)$ é definida pela Equação 30.

$$\tau_3(\theta_m) = \tau_o \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f) \quad 30$$

De acordo com a Equação 30 esse momento se dará quando o termo cosseno ao quadrado for igual a 0. Ou seja:

$$\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f = \frac{\pi}{2} + n\pi \forall n \in N$$

Uma vez que os ângulos θ_o , θ_m e θ_d são conhecidos, o ângulo θ_f é determinado de maneira trivial. Seguindo a mesma definição, o ângulo θ_f é positivo se no sentido anti-horário e negativo no sentido horário.

A correta determinação desse ângulo é de fundamental importância para o funcionamento do equipamento, pois esse desvio de perpendicularidade entre os eixos de

polarização das metades do analisador tem influência direta na medida da direção do eixo de polarização de óculos em teste.

O método de medição utilizado consiste em determinar o ângulo no qual as intensidades luminosas nos sensores são coincidentes. Considerando-se $\theta_f = 0$, de acordo com as equações 27 e 28, para $\tau_2(\theta_m) = \tau_3(\theta_m)$, tem-se:

$$e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90^\circ) = e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90^\circ + \theta_f) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f)$$

Fazendo, $\theta = \theta_m - \theta_d - \theta_o$

$$\begin{aligned} e \cos^2(\theta) + \cos^2(\theta + 90^\circ) &= e \cos^2(\theta + 90^\circ) + \cos^2(\theta) \\ \cos^2(\theta) &= \cos^2(\theta + 90) \end{aligned} \quad 31$$

A equação 31 é verdadeira quando $\theta = \frac{\pi}{4} + n\pi \forall n \in \mathbb{Z}$, como mostra a Figura 45 – Mostra que para $\theta_f = 0$ o ângulo de interseção é 45° Figura 45.

Figura 45 – Mostra que para $\theta_f = 0$ o ângulo de interseção é 45°

Entretanto, dado que o valor de θ_f encontrado não é zero o ponto no qual irá ocorrer a interseção dos sinais dos sensores será dado pela Equação 32.

$$e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90) = e \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + 90 + \theta_f) + \cos^2(\theta_m - \theta_d - \theta_o + \theta_f) \quad 32$$

Fazendo, $\theta = \theta_m - \theta_d - \theta_o$

$$e \cos^2(\theta) + \cos^2(\theta + 90^\circ) = e \cos^2(\theta + 90^\circ + \theta_f) + \cos^2(\theta + \theta_f)$$

$$e \cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = e \sin^2(\theta + \theta_f) + \cos^2(\theta + \theta_f)$$

$$e \cos^2(\theta) + 1 - \cos^2(\theta) = e - e \cos^2(\theta + \theta_f) + \cos^2(\theta + \theta_f)$$

$$1 + \cos^2(\theta)(e - 1) = e - \cos^2(\theta + \theta_f)(e - 1)$$

$$\cos^2(\theta)(e - 1) = (e - 1) - \cos^2(\theta + \theta_f)(e - 1)$$

$$\cos^2(\theta) = 1 - \cos^2(\theta + \theta_f)$$

$$\cos^2(\theta) = \sin^2(\theta + \theta_f)$$

$$\cos^2(\theta) = \cos^2(\theta + 90 + \theta_f)$$

33

A Equação 33 é verdadeira quando, $\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\theta_f}{2} + n\pi \forall n \in \mathbb{Z}$. O que pode ser verificado pelos dois exemplos a seguir. Com $\theta_f = 3^\circ$, a interseção dos sinais dos sensores se dá em $43,5^\circ$, conforme mostra a Figura 46.

Figura 46 – Mostra que para $\theta_f = 3^\circ$ o ângulo de interseção é $43,5^\circ$

Com $\theta_f = 8^\circ$, a interseção dos sinais dos sensores se dá em 41° , conforme mostra a Figura 47.

Figura 47 – Mostra que para $\theta_f = 8^\circ$ o ângulo de interseção é 41°

Uma vez executado este procedimento de calibração, o equipamento estará apto a executar as medições em óculos de sol.

5.2.2 Sistema Mecânico

O sistema mecânico foi projetado e desenvolvido para, além de suportar o sistema ótico, possibilitar o deslocamento para medição em ambas as lentes e posicionar corretamente os óculos para medição. A Figura 48 mostra o projeto completo do sistema mecânico.

Figura 48 – Projeto completo do sistema mecânico do protótipo. Além de suportar o sistema ótico, também é capaz de posicionar os óculos para correta medição em ambas as lentes

A mecânica responsável por sustentar o sistema ótico dispõe de novos componentes para fixação na base do protótipo e um novo sensor ótico de referência, conforme detalhado na Figura 49. O caminho ótico da luz, descrito na mecânica da montagem em bancada, permanece o mesmo apesar de pequenas modificações na peça 1.

Figura 49 – Detalhe da nova mecânica do sistema ótico. Com componentes para fixação na base do protótipo e um novo sensor ótico de referência

Os componentes mecânicos da fonte de luz também foram alterados devido as mudanças no *LED*, na lente e no filtro difusor. O filtro difusor possui diâmetro de 28mm e espessura de 4mm, a lente tem distância focal de 16mm e diâmetro de 25,4mm, com isso, as peças 1 e 2 foram modificadas para os novos diâmetros, além de possibilitarem a adaptação de diferentes distâncias entre a lente e o *LED*. A Figura 50 detalha o aparato mecânico da fonte de luz.

Figura 50 – Componentes mecânicos da fonte de luz. As peças 1 e 2 foram modificadas para as novas dimensões do filtro difusor e da lente. Tais peças permitem a adaptação de diferentes distâncias entre a lente e o *LED*

Os óculos são presos no protótipo pela concavidade existente em quatro fixadores, mostradas em amarelo na Figura 51. Tais peças possuem um ajuste manual de distância, duas a duas, que possibilita o correto posicionamento de diferentes formatos e tamanhos de armações.

Figura 51 – Fixadores côncavos (em amarelo) para os óculos e também, os pinos de ajuste (em roxo) para alterar a distância entre os fixadores

A mecânica para movimentação vertical é composta por um motor DC acoplado em um conjunto de polias e correia, a qual está engastada nos mancais da estrutura que sustenta os fixadores e é esticada pelo esticador. Tal configuração permite que as duas partes da estrutura que sustenta os fixadores tenham o mesmo deslocamento, mantendo as lentes dos óculos sempre

centralizadas em relação ao sistema ótico. A Figura 52 detalha essa configuração, contudo, sem mostrar a correia.

Figura 52 – Mecânica para movimentação vertical. Composta por um motor DC acoplado em um conjunto de polias e correia (não mostrada), a qual está engastada em mancais (verde). Também, conta com um esticador de correia

Já a mecânica para movimentação horizontal, pela necessidade de precisão de posicionamento das lentes, utiliza um motor de passo que também está acoplado a um conjunto de polias e correia. A correia é engastada na chapa que sustenta toda a mecânica para movimentação vertical e, também, passa por um esticador. A Figura 53 ilustra sua configuração.

Figura 53 – Mecânica para movimentação horizontal. Composta por um motor de passo acoplado em um conjunto de polias e correia (não mostrada), a qual está engastada na chapa que suporta a mecânica para movimentação vertical, que por sua vez está conectada aos mancais (verde). Também, conta com um esticador de correia

5.2.3 Sistema Eletrônico

O sistema eletrônico do protótipo possui as mesmas funções do projetado para a montagem em bancada com a adição do controle de mais dois motores e dois sensores de fim de curso. Optou-se pela utilização de um microcontrolador da família Kinetis L com núcleo ARM e córtex M0 da Freescale, pois o componente conta com maior capacidade de processamento, maior memória e conexão *USB* estável. A Figura 54 mostra o microcontrolador utilizado em sua placa de desenvolvimento.

Figura 54 – Placa principal utilizada no protótipo. Possui um microcontrolador da família Kinetis L com núcleo ARM e córtex M0 da Freescale. A placa principal foi substituída por essa ter maior poder de processamento, maior memória e conexão *USB* estável

A placa de desenvolvimento foi escolhida frente à utilização do microcontrolador em uma placa proprietária pela velocidade de desenvolvimento do protótipo, por ser de baixo custo e já possuir *hardware* de programação do microcontrolador embutido.

A placa de acionamento do motor de passo do sistema ótico foi mantida, por já se adequar às necessidades do projeto. E tem como componente principal o circuito A3967 da Allegro Microsystems, que faz o controle de corrente com limite máximo de 250 mA, conforme mostra a Figura 33.

O motor de passo utilizado para movimentação horizontal requer um *driver* de maior capacidade de corrente, por isso, uma nova placa foi desenvolvida com base no circuito A3984 da Allegro Microsystems, e faz o controle de corrente com limite máximo de 2.000 mA. A Figura 55 detalha essa placa.

Figura 55 – Placa de acionamento de potência do motor de passo de movimentação horizontal. Tem como principal componente o circuito A3984 da Allegro Microsystems e faz controle por corrente com limite máximo de 2.000mA. Em (1) o circuito A3984, em (2) o conector para alimentação de potência, em (3) o conector para o motor de passo e em (4) o conector para controle

O motor DC para movimentação vertical é controlado por outra placa de *driver*, desenvolvida com base no circuito A3908 da Allegro Microsystems, e faz o controle por PWM com limite máximo de corrente de 500 mA. A Figura 56 detalha essa placa.

Figura 56 – Placa de controle para o motor DC para movimentação vertical. Tem como principal componente o circuito A3908 da Allegro Microsystems e faz controle por PWM com limite máximo de 500mA. Em (1) o conector de controle, em (2) o circuito A3908 e em (3) o conector de alimentação e saída para o motor

A Interface Homem-Máquina (IHM) é feita pela tela de cristal líquido, de sete polegadas, sensível ao toque, conforme mostra a Figura 57. Essa tela utiliza comunicação serial e possui um *software* proprietário para desenvolvimento de seu conteúdo. A tela é do modelo DMT80480C070 da Beijing DWIN Technology.

Figura 57 – Tela de cristal líquido de sete polegadas e sensível ao toque, componente da Interface Homem-Máquina. Faz comunicação serial com o microcontrolador e possui um software proprietário para desenvolvimento de seu conteúdo

As diferentes tensões de alimentação necessárias ao protótipo são obtidas pela placa de regulação de tensão, Figura 58. Essa placa proporciona saída regulada nas tensões de 12V, 5V e 3,3V para todas as demais placas.

Figura 58 – Placa de regulação de tensão. Fornece saída regulada nas tensões de 12V, 5V e 3,3V

A alteração dos sensores de luz trouxe a necessidade de uma nova placa para os mesmos, uma vez que o novo sensor adotado não possui conversor A/D integrado. Assim, como mostra a Figura 59, a nova placa tem dois conversores A/D de modelo ADS1110 da Texas Instruments, o qual tem sua entrada conectada a um resistor de precisão para conversão do sinal de corrente do sensor para tensão e, sua saída é feita por comunicação I²C com o microcontrolador.

Figura 59 – Placa dos sensores de luz (esquerda lado inferior, direita lado superior) com dois conversores A/D de modelo ADS1110. A comunicação com o microcontrolador é feita pela protocolo I²C

5.2.3.1 Caracterização dos Sensores

A característica principal dos sensores utilizados, modelo SFH5711 da Osram Opto Semiconductors, é que a corrente de saída é função logarítmica da intensidade luminosa de entrada. Isso o torna interessante para aplicação pois, quando do teste de um óculos de baixa transmitância luminosa, terá maior resolução para medição na direção de bloqueio do filtro polarizador e, por consequência, maior sensibilidade ao medir a eficiência de polarização desse tipo de óculos sem perder a resolução para a adequada medição nas lentes de maior transmitância. Ainda, como mostrado anteriormente, a curva de sensibilidade espectral desse sensor é mais próxima à função de sensibilidade espectral para visão diurna. Contudo, ele não apresenta o conversor A/D embutido como o modelo SFH5712, anteriormente usado. Seu sinal de saída é em corrente na faixa de 0 a 50μA, valor esse que corresponde a respectivamente, 1 e 100klx. A Equação 34 rege seu comportamento.

$$I_{out} = 10^{-5} (\log E_v - \log 1) \quad 34$$

Onde E_v é a intensidade de luz na entrada em lx.

Um resistor de precisão com valor de 42,2kΩ foi conectado na saída do sensor para conversão de corrente para tensão. Assim, pela Lei de Ohm, Equação 35, a resposta em tensão do sensor em função de uma entrada em luz será dada pela Equação 36, como resultado da substituição da Equação 35 na Equação 34.

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R} \quad 35$$

$$E_v = 10^{\frac{V_{out}}{0,422}} \quad 36$$

A seguir, o sinal é amostrado pelo conversor A/D de modelo ADS1110, da Texas Instruments. Este conversor apresenta resolução de até 16bits, possui amplificador de ganho programável (PGA) para os valores de 1, 2, 4 e 8 vezes e entrada simétrica de tensão com uma fonte de tensão de referência interna fixada em 2,048V. Para a taxa de amostragem configurada, de 15 amostras por segundo tem o código de saída na faixa de -32.768 a 32.768 níveis digitais que é acessível por comunicação pelo protocolo I²C. Para o PGA configurado em 1, a Equação 37 descreve seu comportamento.

$$Numero = 32.768 \frac{V_{ent}}{2,048} \quad 37$$

Com a entrada negativa do conversor ligada ao negativo e, pela substituição da Equação 37 na Equação 36, a intensidade luminosa medida pelo sensor é dada em função do código medido pela Equação 38.

$$E_v = 10^{\frac{Numero(2,048)}{32.768(0,422)}} \quad 38$$

Como se pode observar na Equação 38, o maior valor da variável “Numero” será 32.768 para a entrada de 2,048V. Isso faz com que, nessa configuração, a maior intensidade luminosa medida seja de 71.298,5lx. A Figura 60 mostra o comportamento completo desse circuito de conversão luminosa em valor digital.

Figura 60 – Resposta do circuito de conversão luminosa em valor digital. O valor convertido está na faixa de 0 a 32.768 para, respectivamente, uma entrada luminosa de intensidade luminosa na faixa de 1 a 71.298lx

5.2.4 Software

O *software* foi desenvolvido com a ferramenta CodeWarrior Development Studio for Microcontrollers v10, que é disponibilizada pelo fabricante do microcontrolador, a Freescale Semiconductor Inc. Essa ferramenta, inclui um compilador e se conecta diretamente na placa de desenvolvimento pela interface OpenSDA, além de possibilitar a programação em linguagem C. A Figura 61 traz o diagrama de funcionamento do *software* implementado que é baseado no conceito de máquina de estados. Ela também está disponível no Apêndice A em um formato maior.

Ao ligar o protótipo ele faz a configuração inicial dos periféricos e, em seguida, verifica a conexão da porta *USB* (A). Uma vez estabelecida, coloca o protótipo no estado inicial e define que a tela apresente a imagem principal (B).

A partir daí o usuário pode escolher entre três funções: testar, verificar ou configurar. Em testar (D) o sistema irá proceder com a medição automática dos óculos de sol, bastando, para isso, apenas que o usuário insira os óculos no momento em que for solicitado. Em verificar (C), o usuário encontra todas as funções básicas do equipamento como movimentação e uso dos sensores. Em configurar (E), são feitos os ajustes básicos como a calibração, a aquisição da linha de base e posicionamento inicial das partes móveis.

As imagens armazenadas na tela foram desenvolvidas com auxílio do *software* Adobe® Fireworks® e programadas pelo *kit* de desenvolvimento de software DGUS, disponibilizado pelo fabricante da tela, a Beijing DWIN Technology Co. Ltd. A comunicação com a tela é feita via porta serial e, o microcontrolador envia qual imagem deverá ser exibida e qual o valor das variáveis mostradas nessa imagem, já a tela envia qual botão foi pressionado. A Figura 62 mostra o diagrama das principais telas do *software*.

Figura 62 – Diagrama com as principais telas do *software*. Pode-se observar a tela de exibição dos resultados da medição em um óculos, a tela com as funções do menu verificar e a tela com as funções do menu configurar

As configurações feitas no protótipo são salvas em uma área reservada da memória *flash* do microcontrolador, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Endereço dos dados armazenados na área reservada da memória *flash* do microcontrolador.

Função	Variável	Faixa de Endereços
Linha de Base (1D000 – 1EFFF)	sensor1_lb	1D000 – 1DFFF
	sensor2_lb	1E000 – 1EFFF
Posição Inicial (1F000 – 1F3FF)	pos_ini_h	1F000 – 1F001
	pos_ini_v	1F002 – 1F003
	pos_ini_a	1F004 – 1F005
Distância Entre Lentes	dis_lent	1F400 – 1F7FF
Calibração (1F800 – 1FBFF)	td	1F800 – 1F801
	tf	1F802 – 1F803

A aquisição da linha de base é feita de forma automática, com incrementos de 0,1 graus para a faixa de 0 a 120 graus. Cada ponto é medido com uma média de três amostras e, em seguida, o valor é armazenado em seu respectivo endereço na memória *flash* do microcontrolador. Existe, também, um botão que possibilita o envio dos valores da linha de base adquirida pela porta *USB*, para um possível tratamento de dados no computador.

A calibração foi projetada para ser feita de forma automática e manual, entretanto a implementação do procedimento automático no microcontrolador exige o desenvolvimento de um algoritmo mais robusto que o inicialmente desenvolvido, pois os resultados obtidos não foram satisfatórios. Com isso, cabe a utilização do procedimento manual que, para o *software* embarcado, consiste em medir toda a faixa de ângulos de 0 a 120 graus, com incrementos de 0,05 graus e disponibilizá-los para tratamento no computador. Assim, uma vez que os dados tenham sido trabalhados, o valor obtido para as variáveis θ_d e θ_f são inseridos no protótipo por meio de uma tela específica. O processo de calibração manual é detalhado posteriormente.

A medição da direção do eixo de polarização nos óculos é feita pela avaliação da diferença entre as transmitâncias da lente medida pelos sensores. Para acelerar o processo de medição, o incremento angular entre dois pontos medidos é de 0,25 graus, enquanto a diferença medida é superior a 10% e passa a ser de 0,05 graus até que um valor igual ou menor que zero seja obtido. Em seguida, o filtro analisador é deslocado em 45 graus para que a transmitância mínima seja medida e é novamente deslocado de θ_f para medição da transmitância máxima e consequente cálculo da eficiência de polarização.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS

Os resultados foram divididos entre os obtidos na avaliação do método de medição e os obtidos pelo protótipo, com o intuito de facilitar o entendimento.

6.1 Método de Medição

Para verificar a capacidade da montagem em fazer medições nos óculos de sol, três testes foram executados em um processo gradual de checagem de suas funções. O primeiro teste consistiu na verificação da capacidade de posicionamento do filtro analisador pelo conjunto motor de passo, *encoder* e chave ótica. O segundo teste verifica a repetitividade das medidas de intensidade de luz nos sensores, em função do ângulo entre o filtro analisador e a direção de referência definida pela chave ótica. O terceiro analisa efetivamente os óculos de sol pela capacidade de medição da direção do filtro polarizador e pela eficiência de polarização em quatro lentes.

6.1.1 Posicionamento do filtro analisador

Esse teste foi feito para verificar a capacidade da montagem de posicionar corretamente o filtro analisador, verificar sua precisão e adequação aos requisitos da norma NBR15111:2004.

O posicionamento do filtro tem início com o ajuste de referência por uma chave ótica; em seguida, a posição passa a ser determinada pela interpretação dos sinais de um *encoder*. Dessa forma, o teste executado consiste em verificar as características do sistema ao trabalhar com esses dois sensores e utilizando dois algoritmos: um para referenciar o ângulo inicial do filtro analisador e outro para executar o deslocamento desse filtro.

O primeiro algoritmo consiste em deslocar o filtro de um ângulo crescente de $6,18^\circ$, uma vez que, caso o ponteiro indicador esteja posicionado antes da chave ótica, o mesmo seja deslocado para uma posição à frente da mesma - Figura 63a; em seguida o ponteiro é deslocado no sentido decrescente até a interrupção da chave ótica, Figura 63b; e finalmente é novamente deslocado em sentido crescente até que deixe de interromper tal chave, Figura 63c.

Figura 63 – Ilustração, em vista superior, do algoritmo de calibração da referência pela chave ótica. (a) deslocamento do filtro em ângulo crescente de $6,18^\circ$; (b) deslocamento do ponteiro até interrupção da chave ótica; (c) deslocamento do ponteiro em sentido crescente até a interrupção da chave ótica

O segundo algoritmo, consiste em dar passos no motor em incrementos de $0,06^\circ$ até que a posição mais próxima da posição desejada seja alcançada. O algoritmo trata as situações de movimentos angulares crescente e decrescente, separadamente: para o movimento angular crescente, os incrementos são aplicados enquanto o ângulo atual é menor que o ângulo desejado, e o erro atual maior que o erro para um novo incremento angular; para o movimento angular decrescente, os incrementos são aplicados enquanto o ângulo atual é maior que o ângulo desejado, e o erro atual maior que o erro para um novo incremento angular.

O procedimento ao se ligar a montagem é de: buscar a posição de referência pela chave ótica e, em seguida, girar o filtro analisador em incrementos de 10° para o intervalo entre 0 e 180° enquanto os dados de: posição desejada; posição obtida e erro são transmitidos e armazenados em um computador (vide Tabela 4).

Tabela 4 – Dados transmitidos para o computador no primeiro teste, que tem por objetivo verificar a capacidade da montagem de posicionar corretamente o filtro analisador

Ângulo Desejado [graus]	Ângulo Obtido [graus]	Erros Mínimo/Máximo [graus]
0	0,00	0,00/0,06
10	10,02	0,02/0,08
20	19,97	-0,02/0,04
30	29,99	0,00/0,06
40	40,02	0,02/0,08
50	49,97	-0,02/0,04
60	59,99	0,00/0,06
70	70,02	0,02/0,08
80	79,97	-0,02/0,04
90	90,00	0,00/0,06
100	100,02	0,02/0,08
110	109,98	-0,01/0,05
120	120,00	0,00/0,06
130	130,02	0,02/0,08
140	139,98	-0,01/0,05
150	150,00	0,00/0,06
160	160,02	0,02/0,08
170	169,98	-0,01/0,05
180	180,00	0,00/0,06

O ângulo obtido é o produto do número de pulsos do *encoder* por sua resolução, assim o filtro analisador foi efetivamente deslocado do valor do ângulo obtido; entretanto, para o intervalo entre o ângulo obtido e o próximo ângulo mensurável, dada a resolução do *encoder*, não existe a certeza quanto à posição do filtro analisador, por isso tem-se os conceitos de erros mínimo e máximo com relação à posição do filtro analisador.

Conforme se pode verificar pela coluna de erros dessa tabela, para diversas posições os erros obtidos foram maiores que a resolução do *encoder*, o que indica um possível problema com o algoritmo desenvolvido. Contudo, comparando a precisão encontrada $\pm 0,08^\circ$ com a permitida pela norma NBR15111:2004 de $\pm 0,5^\circ$, a montagem apresentou precisão dentro do limite estabelecido.

Para verificar a repetitividade do posicionamento angular, seis amostras foram tomadas para medidas no intervalo entre 0 e 180°, com incrementos de 10°, nos sentidos crescente e decrescente de deslocamento. Com os dados obtidos construiu-se o gráfico do erro em função do ângulo, mostrado na Figura 64.

Figura 64 - Gráfico do erro em função do ângulo para o intervalo entre 0° e 180° com incrementos de 10°

Observa-se, com esse teste, que a capacidade do sistema de posicionar o filtro analisador é suficiente para atender ao requisito da norma ABNT NBR15111:2004, uma vez que para todos os ângulos testados, a posição obtida ficou dentro dos limites estabelecidos por essa norma, que é representado pelas linhas vermelhas da Figura 64.

6.1.2 Intensidade Luminosa

Analisou-se a repetitividade e a possibilidade de normalização das medidas de intensidade luminosa para o intervalo angular de 25° a 155°, que é o intervalo útil para as medições necessárias à caracterização da condição do filtro polarizador dos óculos de sol.

Inicialmente, cinco conjunto de medidas foram feitas no intervalo de 0° a 180° com incrementos de 1° . Em seguida, colocou-se um filtro difusor após a lente na fonte de luz, para promover uma melhor homogeneidade na luz emitida, e mais cinco conjunto de medidas foram feitas no mesmo intervalo e com mesmo incremento anterior. A Figura 65 mostra a média dos cinco conjuntos de medidas para os sensores 1 e 2 com e sem filtro difusor, bem como os limites superior e inferior de desvio das medidas.

Figura 65 - Intensidades luminosas e seus limites de desvios no intervalo angular de 0 a 180° , para os sensores 1 e 2, com e sem o uso de um filtro difusor

Verificou-se, que a adoção do filtro difusor reduziu a intensidade de luz, porém suavizou os picos encontrados para determinados ângulos. Também, que a repetitividade das medições foi melhorada, dado que sem o filtro difusor o coeficiente de variação máximo, na região de interesse de 25 a 155° , é $0,78\%$ e com o difusor é de $0,29\%$. Ainda, visto que os sensores utilizados possuem a capacidade de medir na faixa entre 3 e 65.000 lx torna-se interessante a substituição do *LED* por um de maior fluxo luminoso, para que uma maior porção da faixa seja utilizada o que permite uma medição com maior exatidão.

Em seguida, procurou-se normalizar a faixa de interesse, pela utilização dos valores da primeira medição como linha de base para as outras quatro medições. Esse procedimento consiste em normalizar os valores da primeira medição por sua média e utilizar o resultado como divisor para as demais medições. A Figura 66 mostra a média dos quatro conjunto de medidas para os sensores 1 e 2, bem como os limites superior e inferior de desvio das medidas.

Figura 66 - Intensidade luminosa normalizada, na região de interesse, pela utilização dos valores da primeira medição como linha de base para as outras quatro medidas

Observou-se, por inspeção visual, que a normalização das medidas para a faixa de interesse foi possível. Os coeficientes de variação máximos obtidos foram 0,89% sem o filtro difusor e 0,31% com o filtro difusor, valores que são próximos aos obtidos pela utilização do valor médio, conforme mostrado na análise da figura anterior. Dessa forma, esse método de linearização, com o filtro difusor e uma medida de base, será utilizado para medição nos óculos de sol.

6.1.3 Análise em Óculos de Sol

Neste teste mediu-se a direção do eixo de transmissão e a eficiência dos filtros polarizadores em uma das lentes de quatro óculos diferentes. Os óculos foram presos a partir do centro de suas armações por um suporte e a parte superior da armação foi posicionada de forma coincidente à estrutura da montagem. A Figura 67 mostra o posicionamento dos óculos em relação à montagem, sem trazer o suporte utilizado para sua fixação.

O procedimento de medição consistiu em posicionar os óculos na montagem, proceder com o ajuste de referência do filtro analisador e, em seguida, fazer as medidas nos óculos para o intervalo de ângulos entre 25° e 130° . Feito isso, os óculos foram retirados e uma medida foi tomada para ser utilizada como linha de base da primeira.

Figura 67 - Posição dos óculos em relação à montagem para execução de medidas

Por utilizar um microcontrolador com baixa capacidade de armazenamento, os valores medidos durante o teste foram imediatamente enviados para um computador. De forma que, não foi possível encontrar, com o software embarcado no microcontrolador, o ângulo no qual as intensidades luminosas nos sensores são iguais. Assim, dado o interesse em investigar a resolução do sistema nas regiões que serão utilizadas na caracterização do filtro polarizador dos óculos: região de mesma intensidade de sinais; e regiões de máxima e mínima transmissões; as medidas foram feitas em incrementos de $0,25^\circ$ para as faixas entre 33° e 60° e 75° e 105° , e em incrementos de 1° para as faixas entre 25° e 30° , 60° e 75° e 105° e 130° .

Os resultados das medições nas quatro lentes dos quatro diferentes óculos de sol já normalizados por suas respectivas linhas de base são apresentados na Figura 68. Os ângulos mostrados para as curvas levantadas não estão calibrados, ou seja, não é possível utilizar tais valores para especificar a real direção do filtro polarizador nos óculos de sol.

Figura 68 - Medições nas quatro lentes dos quatro diferentes óculos de sol para os dois sensores

Na região onde os sensores apresentam a mesma intensidade luminosa, detalhada na Figura 69 por meio de retas verticais, percebe-se que os ângulos encontrados para a direção do eixo de transmissão dos filtros polarizadores dos óculos de sol apresentam uma variação de até 20,79°.

Figura 69 - Destaque da região na Figura 68 onde os sensores medem a mesma intensidade luminosa. Calculando-se a diferença entre os ângulos encontrados para a direção do eixo de transmissão dos filtros polarizadores dos óculos de sol verifica-se a variação de até 20,79°

Uma vez que os limites da norma são $\pm 5^\circ$ para o desvio relativo à direção vertical e a referência, que é a estrutura da montagem, e esta referência foi mantida, o resultado encontrado sugere uma possível inadequação em alguma das lentes dos óculos testados.

Considerando os pontos de máximo e mínimo obtidos para os mesmo óculos, conforme mostra a Figura 70 para os óculos 1, é possível verificar que estão deslocados em aproximadamente 4° , valor que é superior ao limite de $\pm 3^\circ$ estabelecido pela norma e que sugere um problema de alinhamento dos filtros polarizadores do analisador, que pode ter ocorrido durante a montagem do analisador.

Figura 70 - Detalhe da Figura 68 mostrando os pontos de intensidade luminosa máxima e mínima para os óculos 1. O deslocamento de aproximadamente 4° entre os pontos de máximo e mínimo sugerem um problema de alinhamento dos filtros polarizadores no analisador

A caracterização da direção do eixo de polarização dos óculos testados não é possível de ser feita, por não se ter calibrado a referência do sistema de deslocamento do filtro analisador com o eixo horizontal (estrutura da montagem). A Figura 71 detalha a região onde os sensores indicam a mesma intensidade luminosa para os óculos 3. A resolução do sistema ótico, para esta caracterização, foi verificada pelos pontos adjacentes local de interseção dos sinais dos sensores 1 e 2. O intervalo de $0,25^\circ$ entre os pontos foi medido com 11 níveis digitais pelo sensor 1 e 18 níveis digitais pelo sensor 2. Assim, a resolução do sistema ótico para essa medida, nesses óculos, é de $0,023^\circ$ e $0,014^\circ$, respectivamente, para os sensores 1 e 2.

Figura 71 - Detalhe da Figura 68 mostrando a região de interseção dos sinais dos sensores para os óculos 3. A resolução do sistema ótico para a medida da direção do eixo de transmissão é de $0,023^\circ$ para o sensor 1 e $0,014^\circ$ para o sensor 2.

Tomando como exemplo os óculos 4, a Figura 72 detalha a região da Figura 68 onde estão localizados os pontos de máxima e mínima transmissão. O ponto de máximo é 2.709 lx e o ponto de mínimo é 3,98 lx, e, uma vez que o valor mínimo de leitura do sensor é 3 lx e sua variação na resposta é de ± 10 lx, pode-se considerar o valor medido como o valor mínimo possível. A eficiência calculada para este polarizador é igual ou superior a 903:1. Sabendo que esses óculos são de categoria dois, para o qual a eficiência de polarização deve ser de no mínimo 8:1, o resultado mostra a adequação da eficiência do filtro em relação a norma NBR15111:2004.

Figura 72 - Detalhe da Figura 69 mostrando os pontos de intensidades máxima e mínima para os óculos 4. A eficiência calculada para este polarizador é igual ou superior a 903:1

6.2 Protótipo

O protótipo foi avaliado por meio de testes nos óculos de sol polarizados disponíveis. Entretanto, pela falta de um filtro polarizador de referência, ou seja, um filtro polarizador com a direção do eixo de polarização conhecida e com precisão de $\pm 0,25$ graus, a calibração do equipamento foi feita utilizando a lente de um dos óculos como referência, assim os resultados obtidos no teste são relativos à essa lente e não ao real eixo vertical.

O projeto mecânico ainda não foi completamente fabricado. Uma fotografia do protótipo em seu estado atual pode ser observada na Figura 73, na qual o sistema de fixação dos óculos de sol no protótipo não estão presentes, o que inviabilizou testes de repetitividade nas medidas dos óculos, dado que a posição de sua fixação e, por consequência, os valores medidos, mudariam entre as medições.

Figura 73 – Fotografia do protótipo em seu estado de desenvolvimento atual. Observa-se a ausência das peças côncavas para fixação dos óculos para medição

Os testes foram feitos em duas etapas: a calibração inicial utilizando a lente de um dos óculos e, em seguida, as medições nos demais óculos. A calibração do protótipo foi feita pelo método manual pois, como discutido anteriormente, o método automático irá necessitar da implementação de um algoritmo mais robusto do que o inicialmente proposto. O procedimento de calibração manual é detalhado a seguir.

6.2.1 Procedimento para Calibração Manual

A calibração manual do protótipo tem início com a aquisição da linha de base e seu envio para o computador. O *software* irá medir a faixa de 0° a 120° , com incrementos de $0,1^{\circ}$ e fará a média de três medidas. Este procedimento é iniciado com a opção *Auto* na função *Linha de Base* do menu *Configurar*, mostrado na Figura 74.

Figura 74 – Tela do software destacando a opção Auto da função Linha de Base do menu Configurar. A opção deve ser selecionada para a aquisição da linha de base, que é a etapa inicial do processo de calibração

Feito isso, deve-se colocar o filtro de referência no equipamento com o seu eixo de polarização, preferencialmente, alinhado com a vertical. Com isso, a medição e o simultâneo envio para o computador deverá ser feito pela opção Medir, que se encontra dentro da função *Manual* do menu *Calibração*, Figura 75. O teste mede a faixa de 0° a 120° graus, com incrementos de $0,05^{\circ}$ e faz a média de três medidas.

Figura 75 – Tela do *software* destacando a opção Medir da função Calibrar do menu Configurar. A opção deve ser selecionada medição do filtro de referência utilizado para calibrar o protótipo

Com esses dados já no computador, utiliza-se um *software* para fazer a regressão dos valores medidos com a equação que descreve o comportamento do sistema. Nesse teste o *software* utilizado para trabalhar os dados foi o MatLab®. A Figura 76 e a Figura 77 trazem, respectivamente, os gráficos construídos com o resultado das medições na linha de base e com o filtro de referência.

Figura 76 – Linha de base adquirida para o processo de calibração manual onde o sensor 1 está em vermelho e o sensor 2 em azul. As medidas foram feitas em incrementos de 0,1 graus e o resultado calculado com a média de três medidas

Figura 77 – Medidas feitas no filtro de referência para o processo de calibração manual onde o sensor 1 está em vermelho e o sensor 2 em azul. As medidas foram feitas em incrementos de 0,05 graus e o resultado calculado com a média de três medidas

Na regressão, utiliza-se apenas uma parte dos dados pois, conforme se observa na Figura 77, a faixa entre 0° e $27,5^{\circ}$ é a região onde os sensores estão mecanicamente encobertos pela estrutura do filtro analisador. Também, os dados da medição já devem ter sido ponderados pelos da linha de base. Assim, a regressão é feita utilizando o *Curve Fitting Toolbox*, conforme mostra a Figura 78. A Regressão é feita utilizando as equações 27 e 28.

Figura 78 – Regressão dos valores medidos feita com a equação que descreve o comportamento do sistema. A figura detalha a utilização do Curve Fitting Toolbox do MatLab®

Os coeficientes de correlação calculados para as regressões foram 1 e 0,9998, respectivamente, para o sensor 1 e para o sensor 2. Com os dados da regressão, as equações devem ser plotadas e os pontos de mínimo, para o sensor 1, e máximo, para o sensor 2, devem ser localizados, conforme mostra a Figura 79.

Figura 79 – Plotagem das equações obtidas pela regressão nos valores medidos. Os pontos de mínimo, para o sensor 1, e máximo, para o sensor 2, foram marcados

O sensor 1 serve como referência para calibração, assim, seu ponto de mínimo deve estar localizado a 90° . O valor obtido, de $91,5^\circ$, indica que o valor estabelecido para o θ_d está incorreto em $1,5^\circ$. Dessa forma, deve-se subtrair essa quantia do valor atual de θ_d . Ainda, a diferença entre os ângulos para o ponto de mínimo do sensor 1 e o ponto de máximo do sensor 2 é de $1,1^\circ$. Esse valor é o que deverá ser atribuído ao θ_r , que corresponde ao erro de perpendicularidade entre os eixos de polarização das metades do filtro analisador.

Terminado esse procedimento, o protótipo está calibrado e uma nova aquisição da linha de base deverá ser feita para dar início às medições nos óculos, o que será discutido a seguir.

6.2.2 *Análise em Óculos de Sol*

Foram feitas medições em quatro óculos de sol polarizados. Eles foram posicionados no protótipo com a parte superior da armação apoiada na estrutura e voltada para a parte traseira do mesmo, conforme mostra a Figura 80.

Figura 80 – Posicionamento dos óculos no protótipo para a execução das medições. Pela falta das peças côncavas, a armação foi apoiada na estrutura do equipamento

Os testes foram realizados em ambiente escuro.

O primeiro dos óculos apresentou um desvio de $+7,8^\circ$ na lente esquerda e $+3,7^\circ$ na lente direita, esse desvio, por ser maior que $\pm 5^\circ$, já reprova os óculos pelos critérios da norma. O

desvio entre as lentes foi de $4,1^\circ$ e a eficiência de polarização foi de 123:1 para lente esquerda e de 693:1 para lente direita, conforme se pode ver na Figura 81.

Figura 81 – Resultado obtido para o primeiro óculos. O desvio obtido para a lente esquerda é superior ao limite estabelecido pela norma

O segundo óculos apresentou um desvio de $-10,65^\circ$ na lente esquerda e $+8,75^\circ$ na lente direita, ainda, o desvio entre as lentes foi de $19,4^\circ$, o que reprova esses óculos em dois critérios da norma. A eficiência de polarização foi de 525:1 para lente esquerda e de 45:1 para lente direita, conforme se pode ver na Figura 82.

Figura 82 – Resultado obtido para o segundo óculos. Os desvios obtidos para as lentes esquerda e direita, estão fora de conformidade para esses óculos em dois critérios da norma

O terceiro óculos apresentou um desvio de $-5,70^\circ$ na lente esquerda e $+2,05^\circ$ na lente direita, ainda, o desvio entre as lentes foi de $7,75^\circ$, o que reprova esses óculos pelo desvio da lente esquerda e pelo desvio mútuo entre as lentes. A eficiência de polarização foi de 994:1 para lente esquerda e de 358:1 para lente direita, conforme mostra a Figura 83.

Figura 83 – Resultado obtido para o terceiro óculos. Os desvios obtidos para as lentes esquerda e o desvio mútuo, reprovam esses óculos em dois critérios da norma

O quarto e último óculos apresentou um desvio de $-5,10^\circ$ na lente esquerda e $+2,05^\circ$ na lente direita, ainda, o desvio entre as lentes foi de $7,15^\circ$, o que reprova esses óculos pelo desvio da lente esquerda e pelo desvio mútuo entre as lentes. A eficiência de polarização foi de 84:1 para lente esquerda e de 820:1 para lente direita, conforme mostra a Figura 84.

Figura 84 – Resultado obtido para o quarto óculos. Os desvios obtidos para a lentes esquerda e o desvio mútuo, não estão em conformidade para dois critérios da norma

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um protótipo capaz de executar medidas em óculos de sol e determinar a adequação dos mesmos segundo a norma brasileira ABNT NBR15111:2004.

Os estudos do método de medição, pelos experimentos em bancada foram úteis para avaliação da capacidade de posicionamento do filtro analisador. Verificou-se que a precisão obtida de $\pm 0,08^\circ$ é adequada ao requisito da norma NBR15111, cuja precisão mínima requerida é de $\pm 0,5^\circ$. Também, para determinar a utilização do filtro difusor na fonte de luz, que trouxe homogeneidade à distribuição da luz e melhorou o coeficiente de variação de 0,89% para 0,39% com sua adoção. Ainda, a análise em óculos de sol conseguiu detectar pelo menos um dos óculos de sol com problema de posicionamento do filtro polarizador e também indicou a possibilidade de um problema no alinhamento dos filtros polarizadores montados no analisador. Esta análise mostrou que a resolução ótica para a determinação da direção do eixo de polarização em um par de óculos testado foi de $0,023^\circ$ e $0,014^\circ$ respectivamente, para os sensores 1 e 2; e também, que a eficiência de polarização desse óculos é maior ou igual a 903:1.

O protótipo construído foi capaz de aplicar o método de medição desenvolvido para caracterizar os óculos de sol, de acordo com as recomendações da norma. Sua estrutura mecânica é robusta e, apesar de não ter sido completamente fabricada, possibilitou algumas das medições necessárias. Ainda, por ser flexível, permite o estudo e desenvolvimento de outros métodos de medição e a inserção de outras funções. A IHM possui interface simples e de fácil entendimento, todas as funções básicas necessárias à medição foram desenvolvidas e os dados podem ser facilmente enviados para um computador.

É notório que apenas com a calibração feita com um filtro calibrador adequado no futura, irá possibilitar a correta análise dos óculos medidos.

CAPÍTULO 8

8 PROPOSTAS PARA CONTINUIDADE E MELHORIA DO PROTÓTIPO

Este trabalho, por ter se iniciado da proposta de um método de medição, irá necessitar de uma continuidade em seu desenvolvimento, uma vez que o tempo disponível em um mestrado é curto para a completa confecção e avaliação do protótipo. Assim, as propostas para continuidade e melhoria foram divididas em categorias para um melhor entendimento.

Começando pela mecânica, essa se mostrou adequada para os testes, contudo a fabricação da mesma deverá ser concluída e as seguintes modificações podem ser feitas:

- A peça, denominada acoplador, que une o eixo do motor ao eixo do filtro analisador deve ser substituída por um acoplador flexível;
- A altura do filtro analisador deve ser reduzida para que o mesmo fique mais próximo da lente dos óculos, pois se acredita que isso irá reduzir a influência da luz externa;
- O desenvolvimento de uma peça em formato trapezoidal para simulação do apoio no nariz seria de grande utilidade para posicionar os óculos na região central do equipamento. Além, de viabilizar medidas de repetitividade;
- A substituição do ventilador do sistema ótico deverá ser providenciada, pois já apresenta ruídos por desgaste.

A eletrônica foi capaz de satisfazer todos os requisitos necessários. Entretanto, os seguintes pontos devem ser avaliados:

- Possibilidade de fabricar uma única placa de circuito impresso para inserção de todas as funções para conseguir compactação e redução de fios e conexões;

- Avaliação criteriosa de ruídos. Identificar a fonte de ruídos nos sensores e possivelmente substituir as atuais fontes chaveadas por outras blindadas;

O sistema ótico, por sua vez, deve passar por uma reformulação na fonte de luz para que essa possa se tornar mais difusa. Nesse sentido, as seguintes ações podem ser tomadas:

- Mudança no arranjo dos componentes óticos com a inserção de uma placa com um furo central, com mais lentes e filtros difusores;
- Inserção de um filtro despolarizador na saída da fonte de luz;
- Substituição dos filtros polarizadores do analisador por outros com tratamento antirreflexo;

O software pode ser consideravelmente melhorado pois além de pequenas correções na parcela desenvolvida, muito pode ser feito para a otimização e praticidade de uso. São essas algumas alterações propostas:

- Correção de um erro encontrado na tela que é o de não se atualizar quando de um clique em um botão, não trocando a tela e conseqüentemente não destacando o botão pressionado. Isso pode ser feito pelo envio da tela correspondente ao botão clicado pelo microcontrolador;
- Em telas onde é necessária a entrada de dados inserir a opção do usuário preencher o campo com auxílio de um teclado numérico virtual;
- Desenvolvimento de um algoritmo para calibração automática do protótipo com base no procedimento executado com auxílio de um software para regressão dos valores medidos;
- Melhoria do algoritmo para medição nos óculos para torná-lo mais ágil;
- A validação do algoritmo de posicionamento do filtro analisador pela utilização de um *encoder* de maior resolução em conjunto com uma placa de aquisição de dados.

Acredita-se que com essas modificações o protótipo estará em uma condição ótima para executar as medições propostas.

REFERÊNCIAS

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, 2004. 32 p.

ASTARMATH SAND PHYSICS. Disponível em: <<http://astarmathsandphysics.com/a-level-physics-notes/waves-and-oscillations/a-level-physics-notes-maluss-law.html>>. Acesso em: 01 abril 2014.

BLOOMING DALES. Disponível em: <<http://www1.bloomingdales.com/>>. Acesso em: 01 abril 2014.

BOHREN, C. F.; CLOTHIAUX, E. E. **Fundamentals of Atmospheric Radiation: Polarization: The Hidden Variable**. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008. p.345-395. ISBN 9783527618620.

BUCHWALD, J. Z. **The Rise of the Wave Theory of Light**: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century. University of Chicago Press, 1989. ISBN 9780226078861.

CLARKE, D. **Stellar Polarimetry**: The Basics of Polarimetric Elements. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. p.101-126. ISBN 9783527628322.

CRONIN, T. W.; MARSHALL, J. Patterns and properties of polarized light in air and water. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 366, n. 1565, p.619-626, March 12, 2011.

DAIN, S. J. Sunglasses and sunglass standards. **Clinical and Experimental Optometry**, v. 86, n. 2, p. 77-90, 2003.

DAMIAN, I. Malus' Law for a Real Polarizer. **Scientific Bulletin of "Politehnica" University of Timisoara**, 2004.

EDMUND OPTICS. Disponível em: <<http://www.edmundoptics.com/optics/polarizers/linear-polarizers/high-contrast-plastic-linear-polarizers/3434>>. Acesso em: 15 fev. 2013.

ELLERTON, J. A. et al. Eye Problems in Mountain and Remote Areas: Prevention and Onsite Treatment-Official Recommendations of the International Commission for Mountain Emergency Medicine ICAR MEDCOM. **Wilderness & Environmental Medicine**, v. 20, n. 2, p. 169-175, Sum 2009. ISSN 1080-6032.

EPPIG, T. et al. Photochromic dynamics of ophthalmic lenses. **Appl. Opt.**, v. 51, n. 2, p. 133-138, 01/10 2012.

Eyekit. Disponível em: < <http://www.eyekit.co/information/lenses/lens-categories-explained.html> >. Acesso em: 01 abril 2014.

FOSTER GRANT. Disponível em: <<http://www.fostergrant.com>>. Acesso em: 12 jan. 2013.

HERMANN, G. **The Optics Encyclopedia: Polarization Optics, Polarimeters and Polarization Spectrometers**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. ISBN 9783527600441.

HOBBS, P. C. D. **Building Electro-Optical Systems: Polarization**. John Wiley & Sons, Inc., 2008. p.208-232. ISBN 9780470466339.

IIZUKA, K. **Elements of Photonics: Polarization of Light**. John Wiley & Sons, Inc., 2002. p.362-450. ISBN 9780471221074.

REFERENCE JR., M. **Curso de Física: Ondas (som e luz)**. Edgard Blucher, 1946. 224p.

KÖNNEN, G. P. **Polarized Light in Nature**. Cambridge University Press, 1985. ISBN 9780521258623.

LAND, E. H. Some Aspects of the Development of Sheet Polarizers. **Journal of the Optical Society of America**, v. 41, n. 12, p. 957-962, 1951.

LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO OFTÁLMICA. Disponível em: <<http://www.sel.eesc.usp.br/lio>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

LIVING BETTERAT. Disponível em: < <http://livingbetter50.com/rx-eyeglasses-change-light/> >. Acesso em: 01 abril 2014.

LOOK, D. C.; JOHNSON, W. L. Transmittance of photochromic glass at environmental extremes. **Appl. Opt.**, v. 18, n. 5, p. 595-597, 03/01 1979.

MYCROSCOPY U. Disponível em: < <http://www.microscopyu.com/articles/polarized/polarizedlightintro.html> >. Acesso em: 01 abril 2014.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 4 Ótica, Relatividade, Física Quântica. 1**. Edgard Blucher Ltda, 1998. 437p. ISBN 85-212-0163-X.

POLAROID. Disponível em: <<http://www.polaroideyewear.com/index.php/default/about-polaroid-eyewear.html>>. Acesso em: 16 fev. 2013.

POLATECHNO. Disponível em: < http://www.polatechno.co.jp/english/products/film_index.html >. Acesso em: 01 abril 2014.

RP PHOTONICS. Disponível em: < http://www.rp-photonics.com/brewster_plates.html >. Acesso em: 01 abril 2014.

SASIENI, L. S. **The Principles and Practice of Optical Dispensing Andfitting**. Hammond, 1962.

SLINEY, D. H. 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.

THE PERFECT SHADES. Disponível em: < <http://www.theperfectshades.com/polarizedlenses.html> >. Acesso em: 12 jan. 2013.

TIPLER, P. A. **Física para cientistas e engenheiros**. v.3. LTC, 1995. 451p.

WANG, S. Q.; BALAGULA, Y.; OSTERWALDER, U. Photoprotection: a Review of the Current and Future Technologies. **Dermatologic Therapy**, v. 23, n. 1, p. 31-47, 2010. ISSN 1529-8019.

WILSON, J.; HAWKES, J. F. B. **Optoelectronics, an introduction**. Prentice-Hall, 1983. ISBN 9780136383956.

Anexo A

DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE
DESENVOLVIDO PARA O PROTÓTIPO