

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA TESTES SEMAFÓRICOS EM
LENTE DE ÓCULOS DE SOL

RICARDO ALEXANDRE KONDA
Orientador: Prof.^a Dr.^a Liliane Ventura

São Carlos

2012

RICARDO ALEXANDRE KONDA

SISTEMA AUTOMÁTICO PARA TESTES SEMAFÓRICOS EM LENTES DE ÓCULOS DE SOL

Trabalho de Conclusão de Curso

Apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos,

Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica

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

São Carlos

2012

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

Konda, Ricardo Alexandre

K82s Sistema Automático para Testes Semafóricos em Lentes de Óculos de Sol / Ricardo Alexandre Konda; orientadora Liliane Ventura. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Transmitância luminosa. 2. Óculos de sol.
3. Luz de trânsito. 4. Quociente de Atenuação Visual.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Ricardo Alexandre Konda

Título: "Sistema Automático para Testes Semafóricos em Lentes de Óculos de Sol"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 22/11/2012,*

com NOTA 10,0 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:

Profa. Associada Liliane Ventura Schiabel (Orientadora)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino
SEL/EESC/USP

Dr. Francisco Ednilson Alves dos Santos
IFSC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Ricardo e Neuza e minha irmã Erika, que sempre me apoiam e fazem de tudo para que eu possa ter sucesso em minha trajetória. Sem vocês eu não teria conseguido chegar até aqui. Agradeço muito a Deus pela sorte de ter vocês ao meu lado.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar saúde e sempre me guiar durante momentos difíceis.

Aos meus pais, minha irmã, meus primos e todos os meus familiares pelo apoio e torcida pelo meu sucesso.

A professora Liliane, pela oportunidade de realizar este trabalho, pelo apoio e ideias para que o projeto se desenvolvesse da melhor maneira possível.

A todos os colegas de Laboratório, pela parceria, tornando o ambiente de trabalho mais leve e o projeto mais prazeroso, em especial ao Márcio e ao Luís Eduardo, pela ajuda técnica e didática.

À FAPESP (processo 2011/06079-2) e ao Laboratório de Instrumentação Oftálmica, pelo apoio financeiro deste projeto.

Aos meus amigos de Rio Preto, por sempre me proporcionar ótimos momentos de companheirismo e longa amizade.

Ao amigo Pedro, com quem compartilhei quatro dos cinco anos de faculdade, pela parceria.

E aos amigos de turma, que fizeram com que esses cinco anos de faculdade fossem sensacionais. Jamais vou esquecer as festas, os churrascos, as noites mal dormidas estudando e fazendo projetos, as risadas, as piadas e tudo mais. Eletrônica 08 inesquecível.

Sumário

Lista de Tabelas	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Siglas	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
1. Objetivo do Trabalho.....	1
2. Introdução.....	3
A Norma NBR 15111/2004	3
2.1. Transmitância e categorias de filtros	3
2.2. Requisitos de filtros adequados para transitar ou dirigir	4
2.2.1. Quociente de Atenuação Visual Relativo (Q) para reconhecimento de luz de trânsito (semáforo).....	5
3. Metodologia	7
3.1. Conjuntos de LEDs utilizados.....	11
3.2. Sensor Ótico BPW21R	13
3.3. Sensor Ótico TCS3771	15
3.4. Sistema Eletrônico.....	18
3.4.1. Placa de LEDs e Driver	18
3.4.2. Placa do sensor BPW	19
3.4.3. Placa do sensor TCS3771	20
3.4.4. Microcontrolador PIC 18F4550	20
3.4.5. Display LCD.....	22
3.5. Validação do Método.....	22
3.5.1. Teste das fontes de Iluminação	24
3.5.2. Comparativo entre os LEDs 5 mm e SMDs	25
3.5.3. Teste de variação de espectro dos LEDs	26
3.5.4. Aproximação teórica da transmitância luminosa	26
3.5.5. Teste Experimental da transmitância luminosa com o sensor BPW.....	26
3.5.6. Teste de comportamento do sensor TCS	28
4. Resultados.....	29
4.1. Teste das fontes de iluminação	29
4.2. Comparativo entre os LEDs 5 mm e SMDs	31
4.3. Teste de variação de espectro dos LEDs	31

4.4.	Aproximação teórica da transmitância luminosa.....	32
4.5.	Teste experimental da transmitância luminosa	36
4.6.	Análise de comportamento do sensor TCS3771	41
4.7.	Protótipo do Sistema	43
5.	Discussão	45
6.	Conclusão	47
	Referências Bibliográficas.....	49
	Apêndice.....	51
	Publicações	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valor das transmitâncias para filtros de proteção solar de uso geral [Alterada de: NBR 15111/2004 - Proteção pessoal dos olhos - Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral, em 11/06/2012]	4
Tabela 2 - Produto da distribuição espectral da luz de sinalização e do iluminante-padrão D65 segundo a ISO/CIE 10526, pelo grau de sensibilidade espectral do olho humano à claridade para visão diurna, segundo a ISO/CIE 10527 [NBR 15111/2004].....	8
Tabela 3 - Polinômios para cálculo da transmitância com TCS [Retirada de: Barcelos, Robson - Novo Método de mapeamento de espaços de cor através de redes neurais artificiais especializadas. 2011, em 21/07/2012]	17
Tabela 4 - Correlação das medidas experimentais com a medida-padrão	40

Lista de Figuras

Figura 1 - Símbolo de advertência “impróprio para transitar/dirigir” [Alterada de: http://portaldoconsumidor.files.wordpress.com/2009/08/rel_final-_oculos-de-sol_11_uv_.pdf , em 04/06/2012].....	1
Figura 2 - Espectro do padrão iluminante D65 [Alterada de http://www.f-legrand.fr/scidoc/figures/sciphys/optique/ciexyz/plotC.png].....	7
Figura 3 - Curvas de Ponderação Semafórica e Visível	9
Figura 4 - Filtros para a Ponderação Semafórica.....	10
Figura 5 - LEDs 5 mm utilizados (verde, amarelo, vermelho).....	11
Figura 6 - LEDs tipo SMD utilizados	11
Figura 7 - Análise comparativa entre LEDs e curvas de ponderação semafóricas	12
Figura 8 - Análise comparativa entre LEDs SMD e curvas de ponderação semafórica	13
Figura 9 - Encapsulamento do sensor BPW21R [Alterada de: http://www.digikey.com/Web%20Export/techzone/sensor/VishaySemi-Featured7.jpg , em 06/08/2012].....	13
Figura 10 - Comparativo entre as curvas de resposta do olho humano e do BPW21R [Alterada da folha de dados do componente].....	14
Figura 11 - Esquemático do Amplificador de Transimpedância.....	15
Figura 12 - Conversor ADS1110 e sua pinagem [retirada da folha de dados do componente]	15
Figura 13 - Encapsulamento do sensor TCS3771 [Alterada de: http://www.opto-sensor.com.tw/upload/2011/07/20110708164858.jpg , em 06/08/2012].....	16
Figura 14 - Curva de resposta do TCS3771 [retirada da folha de dados do componente] ...	16
Figura 15 - Resposta espectral do filtro para faixa visível utilizado	18
Figura 16 - Placa de LEDs SMD a) Face dos LEDs b) Face do <i>Driver</i>	19
Figura 17 - Placa do Sensor BPW - a) Face do Sensor b) Face do Amplificador de Transimpedância	19
Figura 18 - Placa do sensor TCS3771	20
Figura 19 - a) Foto do PIC18F4550; b) Pinagem do PIC18F4550 [Alterada da folha de dados do componente].	21
Figura 20 - Diagrama de Blocos do sistema	21
Figura 21 - Display LCD e sua pinagem.....	22
Figura 22 - Espectrofotômetro Cary 5000, Varian	23
Figura 23 - Limite de desvio das transmitâncias adotado para o padrão de referência	23
Figura 24 - Amostras de Óculos utilizadas para os testes.....	24

Figura 25 - Foto do Espectrofotômetro <i>USB2000+</i>	25
Figura 26 - Sistema manual utilizado para testes iniciais	27
Figura 27 - Coluna 1: Aproximação da função de ponderação visível. Coluna 2: Transmitância comparada utilizando a função proposta.....	30
Figura 28 - Gráficos comparativos dos LEDs 5 mm e SMD. Espectro de emissão dos LEDs medidos no espectrofotômetro Ocean Optics USB 2000.	31
Figura 29 - Deslocamento do pico dos espectros dos LEDs em função da variação da corrente	32
Figura 30 – Transmitância teórica do LED verde de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semafórica	33
Figura 31 – Transmitância teórica do LED amarelo de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semafórica	33
Figura 32 – Transmitância teórica do LED vermelho de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semafórica	34
Figura 33 - Transmitância teórica do LED verde SMD comparada à transmitância semafórica	34
Figura 34 - Transmitância teórica do LED amarelo SMD comparada à transmitância semafórica	35
Figura 35 - Transmitância teórica do LED vermelho SMD comparada à transmitância semafórica	35
Figura 36 - Transmitância teórica do LED azul SMD comparada à transmitância semafórica	36
Figura 37 – Transmitância medida experimentalmente com LED verde de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica.....	37
Figura 38 – Transmitância medida experimentalmente com LED amarelo de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica.....	37
Figura 39 – Transmitância medida experimentalmente com LED vermelho de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica.....	38
Figura 40 - Transmitância medida experimentalmente com LED verde SMD comparada a transmitância semafórica	38
Figura 41 - Transmitância medida experimentalmente com LED amarelo SMD comparada a transmitância semafórica	39
Figura 42 - Transmitância medida experimentalmente com LED vermelho SMD comparada a transmitância semafórica	39
Figura 43 - Transmitância medida experimentalmente com LED azul SMD comparada a transmitância semafórica	40

Figura 44 - Função com BPW e Incandescente e transmitância calculada para filtros teóricos	41
Figura 45 - Transmitância de filtros teóricos utilizando regressão polinomial	42
Figura 46 - Transmitância das lentes com o BPW e a lâmpada Incandescente	42
Figura 47 - Transmitância das lentes utilizando um polinômio ajustado	43
Figura 48 - Protótipo do Sistema	44

Lista de Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

Q – Quociente de atenuação visual

CIE – Comitê Internacional de Iluminação

τ_{sinal} - transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente à distribuição espectral da luz de sinalização de trânsito

τ_V - transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente ao iluminante-padrão D65 da CIE (ver ISO/CIE 10526)

$S_{A\lambda}(\lambda)$ - distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão A da CIE (ou fonte de radiação de 3.200K para luz de sinalização azul)

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

$V(\lambda)$ - função da visibilidade espectral para a visão com luz diurna

$\tau_s(\lambda)$ - transmitância espectral das lentes dos sinalizadores de trânsito (semáforos)

$\tau_F(\lambda)$ - transmitância espectral dos filtros de proteção solar

LED – *Light Emitting Diode*

SMD – Surface-mount Technology

Si – Silício

RGB – *Green Red Blue*

A/D – Analógico/Digital

LCD – *Liquid Crystal Display*

USB – *Universal Serial Bus*

Resumo

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui uma norma, a NBR 15111/2004, para reger conteúdos associados à proteção pessoal dos olhos – óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral. Este trabalho tem enfoque principal ao item que se refere à proteção dos óculos para uso no trânsito. Este trabalho é parte da atualização de um totem de autoatendimento, para que o consumidor possa aferir a proteção ultravioleta de seus óculos de sol e também a proteção para uso dos mesmos no trânsito.

A relação para reconhecimento de luz de trânsito (semáforo) é dada por um quociente de atenuação visual Q que é dado pela razão entre a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente a um iluminante padrão D65 da CIE e a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente à distribuição espectral da luz de sinalização de trânsito. Através de testes experimentais e simulações matemáticas encontrou-se o conjunto LED – SENSOR, que melhor se adequa aos requisitos da norma brasileira. Foi desenvolvido um sistema de iluminação com LEDs SMD para quatro cores: vermelho, verde, azul e amarelo. O sensor utilizado para cada conjunto foi O BPW21R. Uma eletrônica de controle para a iluminação da lente testada individualmente para cada cor foi desenvolvida, bem como a interface para o usuário, em linguagem C. Testes em lentes de óculos de sol foram realizados e comparados com o espectrofotômetro CARY 5000 – VARIAN. Os fatores de correlação para as cores vermelho, verde, azul e amarelo são respectivamente: $r^2=0,9932$; $r^2=0,9971$; $r^2=0,9815$; $r^2=0,9915$ para as lentes esquerdas; e $r^2=0,9824$; $r^2=0,9957$; $r^2=0,9798$; $r^2=0,9918$ para as lentes direitas; O protótipo desenvolvido neste projeto é capaz de, através das transmitâncias luminosas, e conseqüentemente do cálculo do quociente de atenuação (Q), testar os óculos de sol, para que o usuário saiba se estes estão de acordo, ou não, com a norma NBR 15111/2004.

Palavras-chave: transmitância luminosa, óculos de sol, luz de trânsito, quociente de atenuação visual, normas para óculos de sol.

Abstract

The Brazilian Association of Technical Standards (ABNT) has a particular standard, NBR 15111/2004, which rules contents associated with the personal protection of the eyes – sunglasses and solar rays protection filters for general use. This work is focused on a particular item of the referred standard on protection of sunglasses used for driving. This work is a part of an upgrade of a self-service kiosk that consumers are able to test the ultraviolet protection of their sunglasses and will now be able to test their protection for driving.

The relation to recognition of traffic lights (semaphoric lights) is given by a visual attenuation quotient Q , which is the ratio between the luminous transmittance of Sun protection filter for a standard illuminant D65 of the CIE and the luminous transmittance of Sun protection filter for the spectral distribution of the light traffic signaling. Through experimental tests and mathematical simulations the set-up LED – SENSOR which would best fit the requirements of the Brazilian standard was found. It was developed an illumination system with SMD LEDs for four colors: red, green, blue and yellow. The photodiode sensor used for each set. An electronic control for the individually tested lenses illumination for each color was developed, as the interface for the user, with C language. Tests were made in the sunglasses lenses and compared with the spectrophotometer CARY 5000 – VARIAN. The correlation factors for the colors red, green, blue and yellow are, respectively: : $r^2=0,9932$; $r^2=0,9971$; $r^2=0,9815$; $r^2=0,9915$ for the left lenses; and $r^2=0,9824$; $r^2=0,9957$; $r^2=0,9798$; $r^2=0,9918$ for the right lenses; The prototype developed in this project is able to, through the light transmission, and hence calculate the attenuation quotient (Q), test your sunglasses, so that the user knows whether they agree or not with the Standard NBR 15111/2004.

Keywords: Luminous transmittance, sunglasses, traffic lights, visual attenuation quotient, sunglasses standards.

1. Objetivo do Trabalho

Ao dirigir é de extrema importância a percepção correta das cores de sinalização no trânsito. Portanto, os óculos de sol não podem prejudicar o reconhecimento das cores. A norma técnica brasileira NBR 15111/2004, que regulamenta conteúdos com relação à proteção pessoal dos olhos, exige que óculos de sol cujas lentes não permitam uma percepção adequada das cores apresentem em sua etiqueta, embalagem ou armação, uma advertência de “impróprio para transitar/dirigir”. Óculos de sol pertencentes à categoria quatro (4), ou seja, com lentes muito escuras, também devem levar este aviso.



Figura 1 - Símbolo de advertência “impróprio para transitar/dirigir” [Alterada de: http://portaldodoconsumidor.files.wordpress.com/2009/08/rel_final-_oculos-de-sol_11_uv_.pdf, em 04/06/2012]

Lentes excessivamente escuras são inseguras para dirigir pelo fato de limitar a habilidade do usuário de identificar objetos em sombras, como por exemplo, a entrada de um túnel [Dain, S. J; 2003], problema que também pode ser causado por óculos de sol de lentes coloridas. Estas lentes podem alterar prejudicialmente a detecção e reconhecimento das cores do semáforo de maneira rápida e segura. Os efeitos entre detecção e reconhecimento de cores são diferentes entre si. A habilidade de ver (detectar) um sinal colorido depende das lentes transmitirem luz suficiente na banda de passagem do comprimento de onda da cor para que o limiar de visualização seja excedido. Um exemplo são os óculos de sol cujas lentes não transmitam suficientemente a cor vermelha, fazendo com que a sinalização vermelha do semáforo seja “invisível” para o usuário. O reconhecimento de cores pode também ser alterado por lentes coloridas, mas isto somente é provável para a cor verde, pois esta tem uma largura de banda mais ampla e pode ser deslocada por lentes que bloqueiam o azul ou o vermelho [Dain, S. J; 2003]. Este problema com a cor verde, citado acima, é a explicação pela qual a CIE (International Commission of Illumination) restringe o domínio de cores para a sinalização verde. O objetivo é manter esta cor dos semáforos distantes do amarelo e do vermelho, evitando assim confusões no reconhecimento correto de cada cor da sinalização. É por isso que o verde das sinalizações de tráfego tem um tom “verde azulado”.

Fundamentalmente, o protótipo deste projeto propõe, através das medidas de transmitâncias luminosas, testar os óculos de sol, para que o usuário saiba se estes estão

de acordo, ou não, com a norma NBR 15111/2004. Este trabalho faz parte de um de projeto maior do Laboratório de Instrumentação Oftálmica (LIO), que busca contemplar a norma NBR 15111/2004 de uma forma geral. Vários projetos estão se desenvolvendo dentro do LIO, cada um envolvendo uma seção desta norma. A intenção é ter sistemas disponíveis ao público, para que o tema da “proteção visual” seja mais bem compreendido pela população.

2. Introdução

Este trabalho trata-se de tornar o teste de um dos itens requeridos pela norma brasileira NBR15111(2004), acessível ao público para realizarem o teste em um totem de autoatendimento. Este teste, para certificação, é realizado por profissionais especializados, através de um espectrofotômetro, com resolução de 10nm. Porém, a proposta aqui, é oferecer ao público um sistema em que possam medir seus óculos de sol, sem grau, tipo “self-service” e obterem uma medida com boa correlação com as medidas espectroscópicas.

A Norma NBR 15111/2004

A NBR15111 de 2004 é uma norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, a ABNT. Ela foi elaborada no Comitê Brasileiro de Óptica e Instrumentos Ópticos (ABNT/CB-49), pela Comissão de Estudo de Armações Solares (CE-49:000.03) e é baseada em uma norma europeia, a EN 1836:1997.

O objetivo desta norma é estabelecer padrões mecânicos e físicos para óculos de sol e filtros de proteção solar 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.

Este trabalho tem ênfase nas subseções da NBR15111 que tratam dos requisitos de transmitância luminosa dos filtros de proteção solar, portanto a seguir são apresentados trechos das subseções da norma que tratam deste assunto.

2.1. Transmitância e categorias de filtros

Existem cinco categorias de filtros de proteção solar. A categoria zero (0) é representada pelos filtros com a transmitância luminosa acima de 80% no ponto de referência, ou ponto médio geométrico e para filtros que, apesar de terem uma transmitância superior a 80%, precisam de uma proteção especial contra qualquer região do espectro solar. Para a categoria um (1) o valor mínimo de transmitância é de 43%, para a categoria dois (2) 18%, para a três (3) 8% e para a categoria quatro (4) a transmitância mínima deve ser de 3%. A Tabela 1 apresentada a seguir se encontra na seção 4 da NBR15111/2004 e mostra informações completas sobre as transmitâncias para as categorias de filtros.

Categoria de filtros	Requisitos básicos					
	Região ultravioleta do espectro			Região visível do espectro		Absorção maior do infravermelho ¹⁾
	Valor máximo da transmitância espectral $\tau_F(\lambda)$		Valor máximo da transmitância do UVA solar τ_{SUVA}	Região da transmitância luminosa τ_V		Valor máximo da transmitância do infravermelho solar τ_{SIR}
	280 nm até 315 nm	Acima de 315 nm até 350 nm	315 nm até 380 nm	Acima de %	Até %	
0	$0,1 \cdot \tau_V$	τ_V	τ_V	80,0	100	τ_V
1				43,0	80,0	
2				18,0	43,0	
3		$0,5 \cdot \tau_V$	$0,5 \cdot \tau_V$	8,0	18,0	
4				3,0	8,0	

¹⁾ Utilizar somente para os filtros de proteção solar que forem recomendados pelo fabricante para proteção contra radiação infravermelha.

Tabela 1 - Valor das transmitâncias para filtros de proteção solar de uso geral [Alterada de: NBR 15111/2004 - Proteção pessoal dos olhos - Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral, em 11/06/2012]

É importante salientar que, no caso de o fabricante do filtro declarar valor para a transmitância luminosa, o limite de desvio desse valor deve ser de $\pm 3\%$ (absoluto) para as classes de 0 a 3 e de $\pm 30\%$ relativo ao valor da transmitância, para a classe 4. É admitido também variações da transmitância luminosa por motivo de alterações da espessura condicionadas à fabricação.

2.2. Requisitos de filtros adequados para transitar ou dirigir

Os filtros pertencentes à categoria 4, ou seja, que possuem transmitância luminosa menor que 8%, não são adequados para trânsito. Já os de categoria 0, 1, 2 e 3 devem seguir alguns requisitos: primeiramente, a transmitância espectral dos filtros recomendados não deve ser inferior a $0,2 \cdot \tau_V$, onde τ_V é a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente ao iluminante-padrão D65 da CIE (ver ISO/CIE 10526); em segundo lugar, os filtros devem seguir certas especificações para um parâmetro chamado de quociente de atenuação visual relativo (Q), que será explicado a seguir.

2.2.1. Quociente de Atenuação Visual Relativo (Q) para reconhecimento de luz de trânsito (semáforo)

O quociente de atenuação visual relativo (Q) é dado pela equação 1:

$$Q = \frac{\tau_{\text{signal}}}{\tau_V} \quad (1)$$

onde τ_V é a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente ao iluminante-padrão D65 da CIE (ver ISO/CIE 10526) e é dada por:

$$\tau_V = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \tau_F(\lambda) \times V(\lambda) \times S_{D65\lambda}(\lambda) \times d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} V(\lambda) \times S_{D65\lambda}(\lambda) \times d\lambda} \quad (2)$$

e τ_{signal} é a transmitância luminosa do filtro de proteção solar referente à distribuição espectral da luz de sinalização de trânsito. τ_{signal} é dada por:

$$\tau_{\text{signal}} = \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \tau_F(\lambda) \times \tau_s(\lambda) \times V(\lambda) \times S_{A\lambda}(\lambda) \times d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \tau_s(\lambda) \times V(\lambda) \times S_{A\lambda}(\lambda) \times d\lambda} \quad (3)$$

onde:

- $S_{A\lambda}(\lambda)$ é a distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão A da CIE (ou fonte de radiação de 3.200K para luz de sinalização azul) (ver ISO/CIE 10526);
- $S_{D65\lambda}(\lambda)$ é a distribuição espectral da radiação do iluminante-padrão D65 da CIE (ver ISO/CIE 10526);
- $V(\lambda)$ é a função da visibilidade espectral para a visão com luz diurna (ver ISO/CIE 10527);
- $\tau_s(\lambda)$ é a transmitância espectral das lentes dos sinalizadores de trânsito (semáforos);
- $\tau_F(\lambda)$ é a transmitância espectral dos filtros de proteção solar.

Nota-se que a equação do quociente de atenuação (Q) é uma fórmula intuitiva e empírica: nada mais é do que a razão entre a luminância do sinal através do filtro pela luminância sem o filtro, normalizada com relação a uma razão similar da luz do dia através do filtro e sem o filtro.

Os detalhes exatos de transmitância dos filtros não são definidos, porém isto não tem grande importância desde que a cromaticidade esteja dentro da faixa permitida pelas especificações da CIE. As cores de sinalização de tráfego definidas por esta comissão são: vermelho, amarelo, verde e azul.

Estes filtros devem satisfazer o seguinte: o quociente de atenuação visual relativo (Q) dos filtros pertencentes às categorias 0, 1, 2 e 3 para as luzes de sinalização vermelha e amarela não deve ser inferior a 0,80; para a luz de sinalização azul não deve ser inferior a 0,40; e para a luz de sinalização verde não deve ser inferior a 0,60 (de acordo com a norma NBR 15111/2004).

3. Metodologia

O protótipo construído durante este trabalho tem como objetivo simular separadamente cada cor das luzes do semáforo (vermelho, verde, amarelo e azul), além de determinar a categoria a qual os óculos de sol pertencem. Portanto, o sistema é capaz de iluminar as lentes com cada cor semafórica e também com uma fonte que simule a “luz do dia”. O padrão utilizado para esta simulação é o chamado padrão D65, ou padrão *Daylight*, definido pela CIE. A Figura 2 apresenta o espectro deste padrão iluminante.

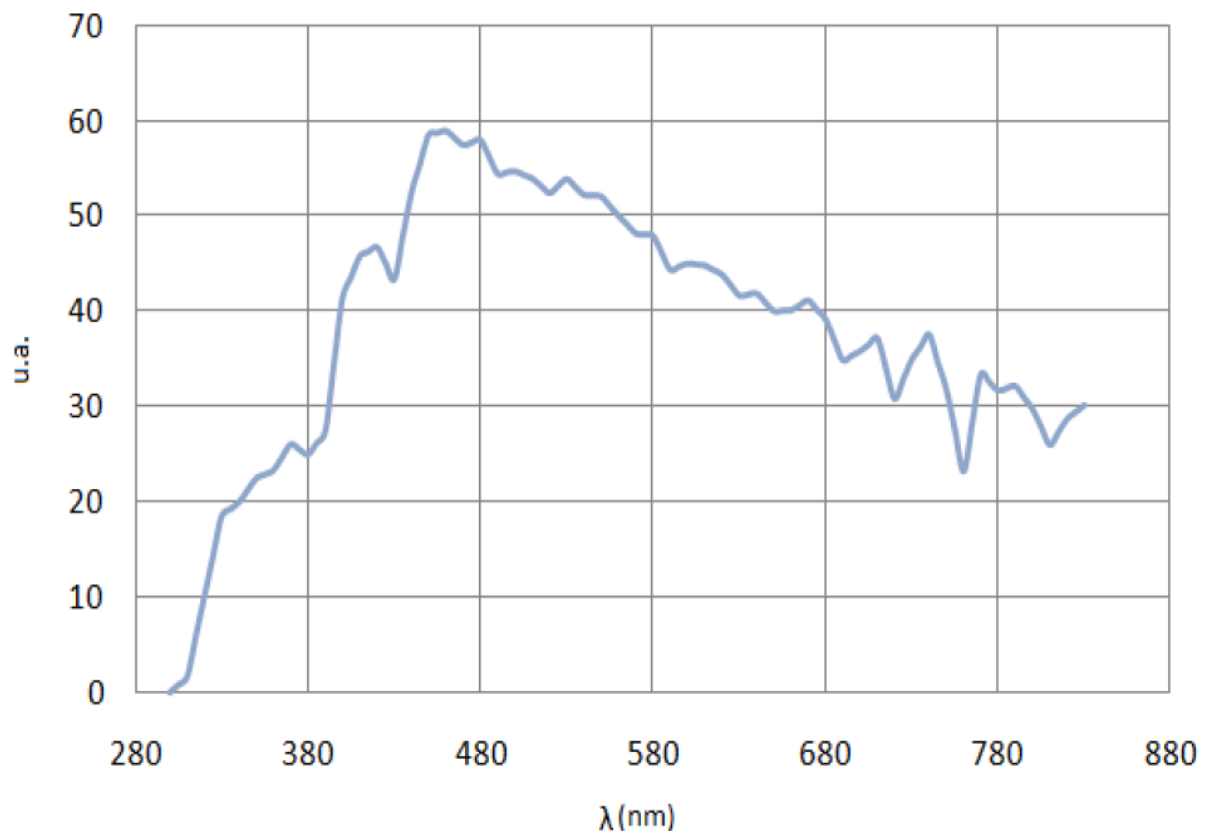


Figura 2 - Espectro do padrão iluminante D65 [Alterada de <http://www.f-legrand.fr/scidoc/figures/sciphys/optique/ciexyz/plotC.png>].

A tabela do produto da distribuição espectral da luz de sinalização e do iluminante padrão D65 segundo a ISO/CIE 10526, pelo grau de sensibilidade espectral do olho humano à claridade para visão diurna, segundo a ISO/CIE 10527, que está presente no anexo A da norma brasileira, é apresentada a seguir.

Tabela 2 - Produto da distribuição espectral da luz de sinalização e do iluminante-padrão D65 segundo a ISO/CIE 10526, pelo grau de sensibilidade espectral do olho humano à claridade para visão diurna, segundo a ISO/CIE 10527 [NBR 15111/2004]

Comprimentos de onda λ (nm)	$S_{\lambda}(\lambda) \times V(\lambda) \times T_S(\lambda)$				$S_{D65\lambda}(\lambda) \times V(\lambda)$
	Vermelho	Amarelo	Verde	Azul	
380	0	0	0	0,0001	0
390	0	0	0	0,0008	0,0005
400	0	0	0,0014	0,0042	0,0031
410	0	0	0,0047	0,0194	0,0104
420	0	0	0,0171	0,0887	0,0354
430	0	0	0,0569	0,3528	0,0952
440	0	0	0,1284	0,8671	0,2283
450	0	0	0,2522	1,5961	0,4207
460	0	0	0,4852	2,6380	0,6688
470	0	0	0,9021	4,0405	0,9894
480	0	0	1,6718	5,9025	1,5245
490	0	0	2,9976	7,8862	2,1415
500	0	0	5,3553	10,1566	3,3438
510	0	0	9,0832	13,0560	5,1311
520	0	0,1817	13,0180	12,8363	7,0412
530	0	0,9515	14,9085	9,6637	8,7851
540	0	3,2794	14,7624	7,2061	9,4248
550	0	7,5187	12,4687	5,7806	9,7922
560	0	10,7342	9,4061	3,2543	9,4156
570	0	12,0536	6,3281	1,3975	8,6754
580	0,4289	12,2634	3,8967	0,8489	7,8870
590	6,6289	11,6601	2,1640	1,0155	6,3540
600	18,2382	10,5217	1,1276	1,0020	5,3740
610	20,3826	8,9654	0,6194	0,6396	4,2648
620	17,6544	7,2549	0,2965	0,3253	3,1619
630	13,2919	5,3532	0,0481	0,3358	2,0889
640	9,3843	3,7352	0	0,9695	1,3861
650	6,0698	2,4064	0	2,2454	0,8100
660	3,6464	1,4418	0	1,3599	0,4629
670	2,0058	0,7892	0	0,6308	0,2492
680	1,1149	0,4376	0	1,2166	0,1260

690	0,5590	0,2191	0	1,1493	0,0541
700	0,2902	0,1137	0	0,7120	0,2788
710	0,1533	0,0601	0	0,3918	0,0148
720	0,0742	0,0290	0	0,2055	0,0058
730	0,0386	0,0152	0	0,1049	0,0033
740	0,0232	0,0089	0	0,0516	0,0014
750	0,0077	0,0030	0	0,0254	0,0006
760	0,0045	0,0017	0	0,0129	0,0004
770	0,0022	0,0009	0	0,0065	0
780	0,0010	0,0004	0	0,0033	0
SOMA	100	100	100	100	100

Os gráficos que representam a tabela acima, para cada cor de sinalização são apresentados na Figura 3.

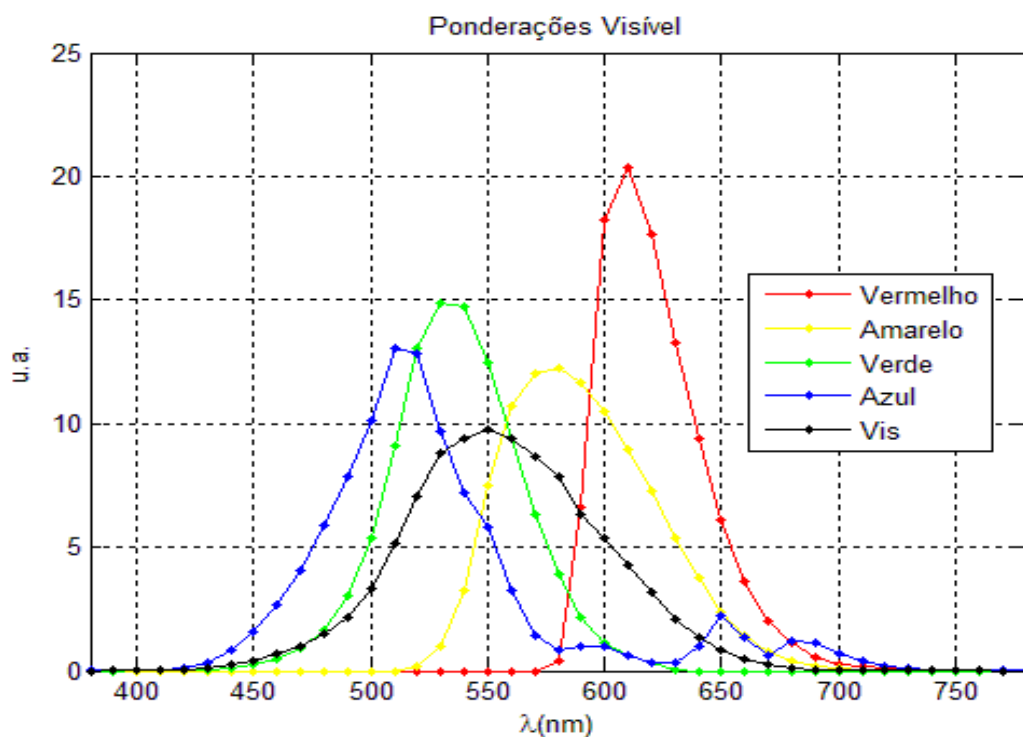


Figura 3 - Curvas de Ponderação Semafórica e Visível

A tentativa de conseguir aproximar essas funções, utilizando diferentes fontes de iluminação e sensores, é a base da metodologia proposta. Essa tentativa foi validada com simulações das situações propostas.

Para a ponderação semafórica, também foram testados possíveis filtros (Figura 4), que representariam o τ_s da fórmula do quociente de atenuação Q .

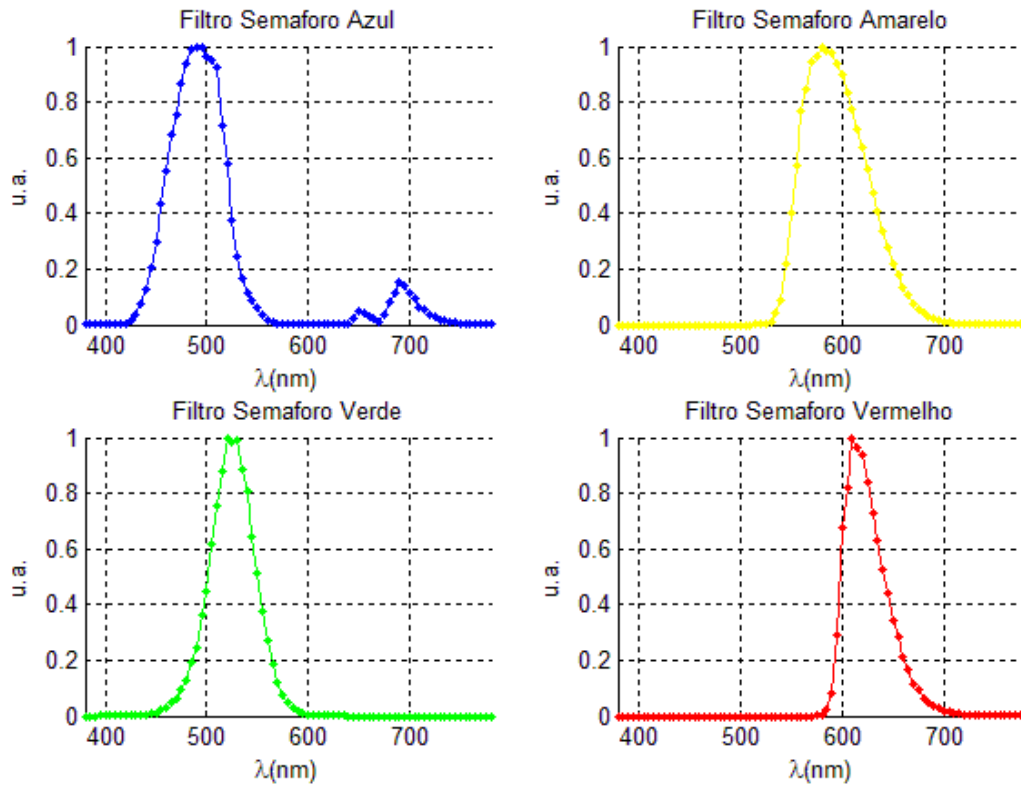


Figura 4 - Filtros para a Ponderação Semafórica

Foram estudados diversos conjuntos de fontes de iluminação e sensores óticos, para se determinar o conjunto responsável por uma melhor aproximação teórica da função de ponderação para a região visível do espectro de cores. Optou-se pela utilização de LEDs, devido à menor flutuação relativamente a lâmpadas; menos ruídos e sistema de iluminação mais compacto para uso no protótipo final.

Outro fator que se é necessário considerar é a visibilidade espectral com luz diurna, para a escolha dos sensores, representada pelo termo $V(\lambda)$ nas equações previamente descritas. Essa ponderação (tabela do anexo A da norma) representa a sensibilidade visual do olho humano para diferentes comprimentos de onda e também está apresentada na Figura 3, pela curva de cor preta.

É fundamental que o sensor de detecção do sinal emitido tenha uma curva de resposta que se aproxime bem da resposta de sensibilidade do olho humano. Assim, foram escolhidos dois sensores óticos para testes: o BPW21R e o TCS3771.

Segue uma breve descrição dos LEDs utilizados para os testes, assim como uma análise de cada um dos sensores e a motivação para a escolha de cada um deles.

3.1. Conjuntos de LEDs utilizados

Para o teste semafórico, a proposta inicial foi utilizar 4 LEDs de 5mm de diâmetro (Figura 5) com picos coincidentes com os picos das curvas de ponderação para o teste semafórico. Porém não foi possível encontrar no mercado nacional um LED de 5 mm com um pico de comprimento de onda requerido para o teste na região do azul (510 nm). Por isso, foram adquiridos também 8 LEDs importados pelo LIO do tipo SMD, (Figura 6), na faixa espectral visível, na tentativa de abranger todo o espectro para o teste de transmitância visível (necessária para a definição da categoria dos óculos de sol).



Figura 5 - LEDs 5 mm utilizados (verde, amarelo, vermelho)



Figura 6 - LEDs tipo SMD utilizados

Os LEDs de 5 mm testados se aproximam da ponderação da norma para os testes semafóricos de acordo com a Figura 7.

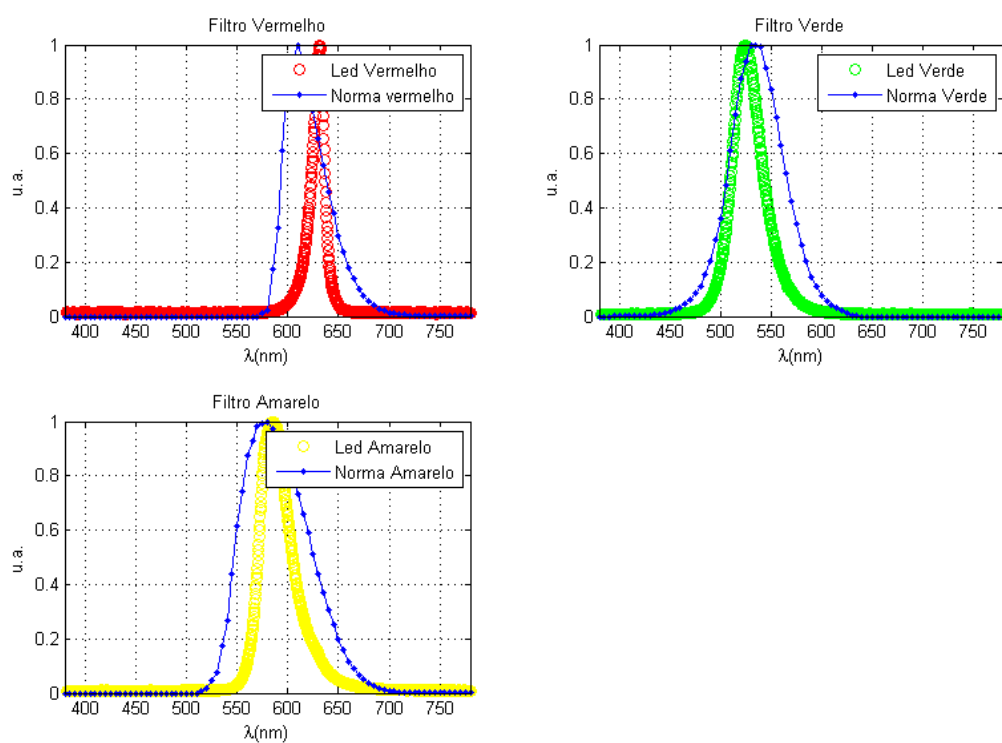


Figura 7 - Análise comparativa entre LEDs e curvas de ponderação semafóricas

Para os LEDs SMD os mesmos gráficos comparativos tiveram o comportamento apresentado na Figura 8.

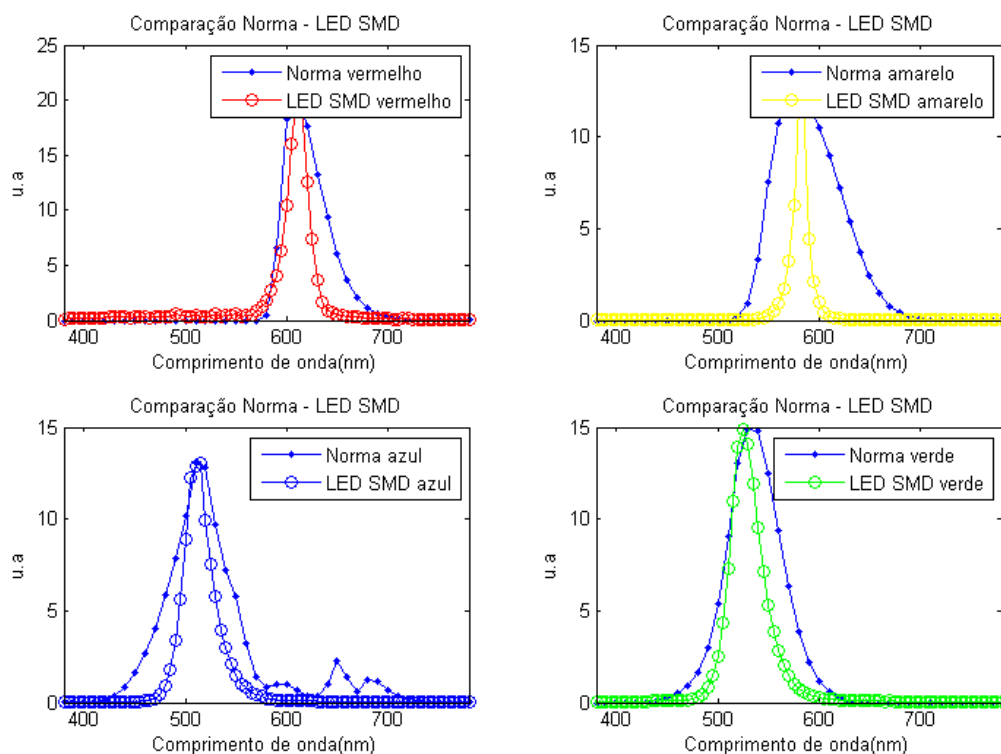


Figura 8 - Análise comparativa entre LEDs SMD e curvas de ponderação semafórica

Esta análise comparativa entre os espectros dão base para os testes de validação do método, que serão discutidos mais a frente.

3.2. Sensor Ótico BPW21R

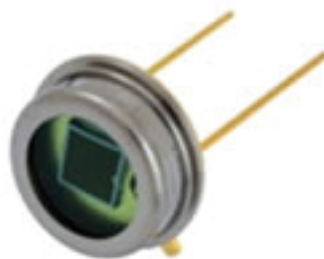


Figura 9 - Encapsulamento do sensor BPW21R [Alterada de: <http://www.digikey.com/Web%20Export/techzone/sensor/VishaySemi-Featured7.jpg>, em 06/08/2012]

A escolha do BPW21R para os primeiros testes deve-se à sua curva de resposta que é bem próxima da curva de resposta de sensibilidade do olho humano, como pode ser visto na Figura 10, a seguir.

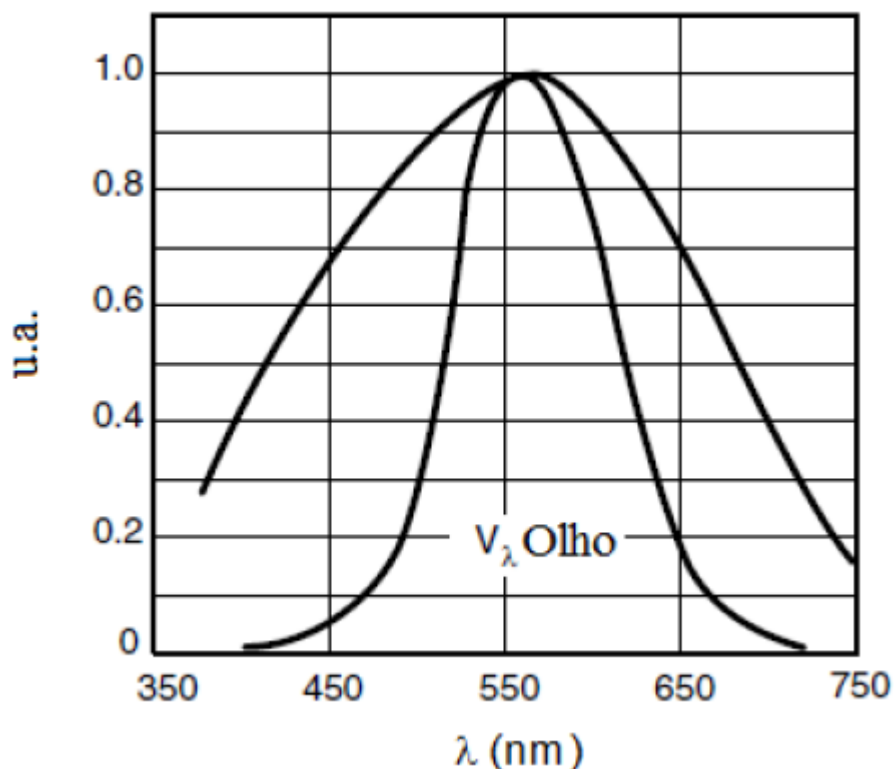


Figura 10 - Comparativo entre as curvas de resposta do olho humano e do BPW21R [Alterada da folha de dados do componente]

O BPW21R é um fotodiodo planar de silício (Si) fabricado pela *Vishay*, desenvolvido especialmente para aplicações de alta precisão em linearidade, isso devido à sua alta resistência de escuro (*Dark Resistance*), que faz com que o circuito de fotocorrente seja linear para mais de sete décadas de níveis de iluminação. O dispositivo é equipado com uma janela de vidro achatada com um filtro para correção de cores, o que gera uma resposta aproximada à resposta do olho humano.

Para a utilização do BPW, foi implementado também um amplificador de transimpedância, apresentado na Figura 11, com o objetivo de aumentar a ordem de grandeza da tensão na saída do sistema, além de diminuir ruídos e se alcançar maior exatidão. Para aquisição do sinal, foi utilizado um conversor ADS1110, Figura 12, conversor analógico-digital com 16 bits de resolução e interface I2C de comunicação, escolhido para maior precisão, pois a conversão do sinal pode ser feita próxima ao amplificador, reduzindo ruídos.

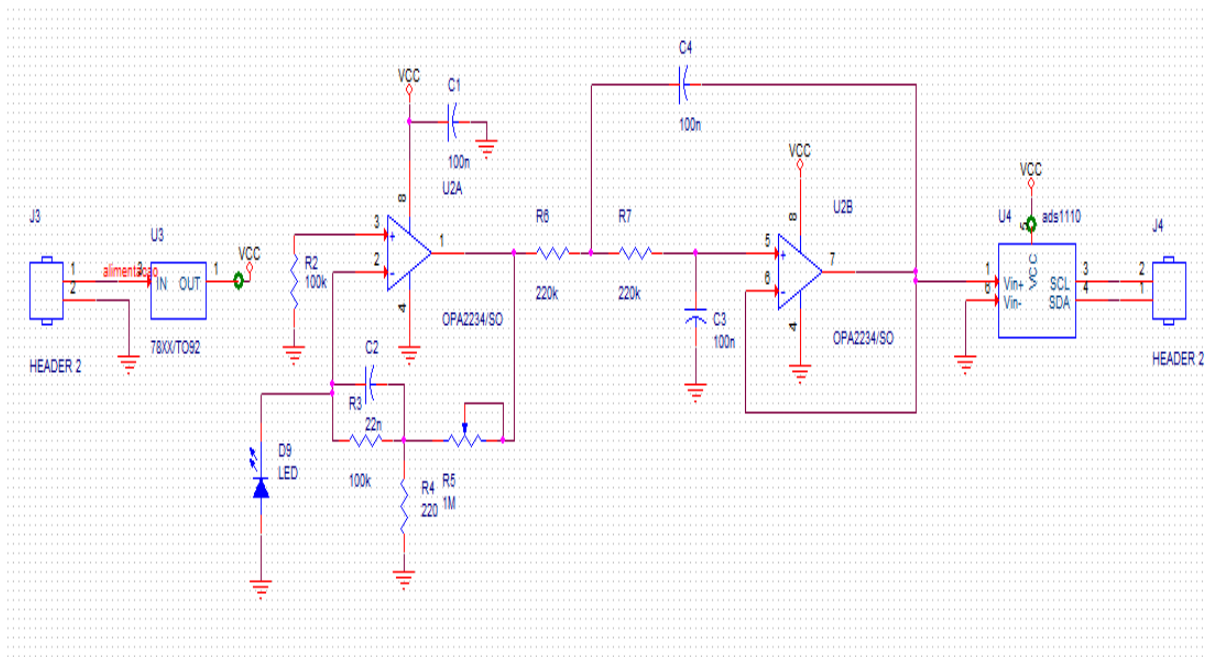


Figura 11 - Esquemático do Amplificador de Transimpedância



Figura 12 - Conversor ADS1110 e sua pinagem [retirada da folha de dados do componente]

O circuito de transimpedância é composto por um conjunto de resistores e capacitores com valores que otimizam a utilização do circuito, diminuindo ruídos e interferências externas. São utilizados também dois potenciômetros *trimpot*: um para controle de ganho do sensor e outro para ajuste de *offset*, para garantir que a tensão no sensor seja nula, quando este não recebe luminosidade.

3.3. Sensor Ótico TCS3771

O TCS3771 é um sensor de luz RGB com detector de proximidade, que faz a conversão direta luz-digital. Ele é composto por um arranjo 4x4 de fotodiodos, com amplificadores e conversores A/D integrados, com uma resolução de 16 bits. Este

componente é capaz de fazer a detecção em variadas condições de luminosidade e através de vários materiais atenuadores. Possui, ainda, um baixo consumo de potência, devido a um estado de máquina interno. A figura 13 ilustra o encapsulamento do sensor TCS3771.

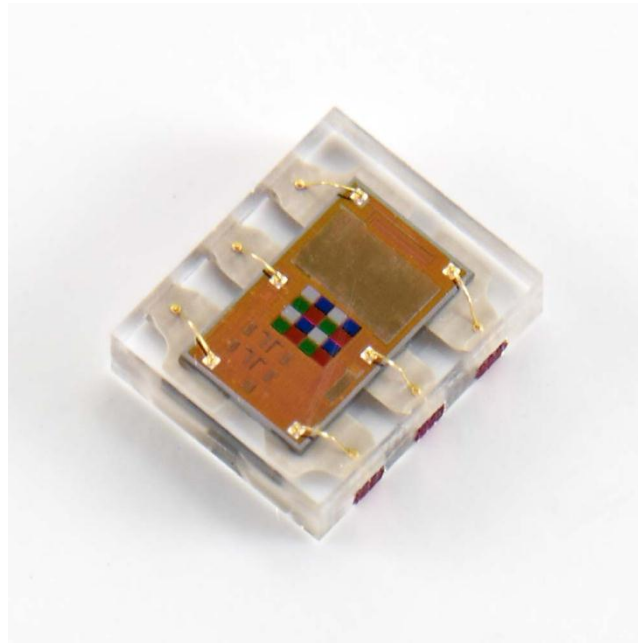


Figura 13 - Encapsulamento do sensor TCS3771 [Alterada de: <http://www.opto-sensor.com.tw/upload/2011/07/20110708164858.jpg>, em 06/08/2012]

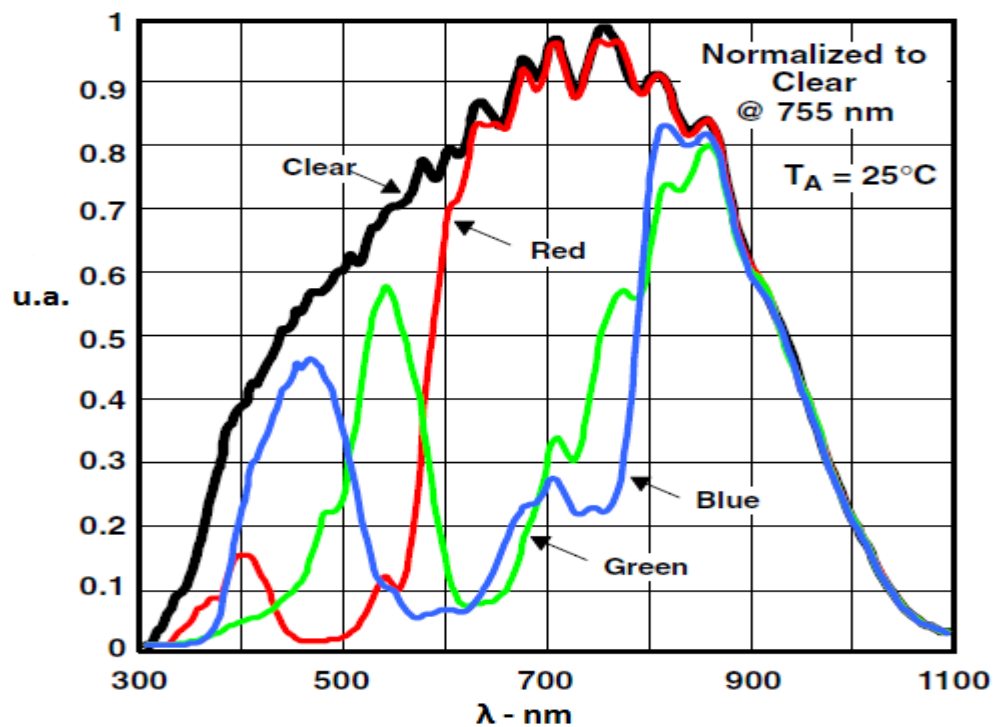


Figura 14 - Curva de resposta do TCS3771 [retirada da folha de dados do componente]

O sensor TCS possui uma resposta para cada canal: vermelho, verde e azul ($X(\lambda)$, $Y(\lambda)$ e $Z(\lambda)$, respectivamente) e possibilita uma combinação linear dessas funções para se obter diferentes espectros.

Um dos métodos usados para aproximar um espectro é a regressão polinomial [Barcelos, Robson, 2011], que é utilizada da seguinte maneira: escolhe-se um polinômio para o cálculo da transmitância utilizando as respostas X, Y e Z do sensor (tabela no Apêndice). Para determinar os coeficientes do polinômio, utiliza-se valores de transmitância, sempre em número maior que o número de coeficientes do polinômio [KANG, H.R. 2006].

Tabela 3 - Polinômios para cálculo da transmitância com TCS [Retirada de: Barcelos, Robson - Novo Método de mapeamento de espaços de cor através de redes neurais artificiais especializadas. 2011, em 21/07/2012]

Nº de Termos	Polinômio
3	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z$
4	$P(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z$
6	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ$
8	$P(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7XYZ$
9	$P(X, Y, Z) = c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2$
11	$P(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2 + c_{10}XYZ$
14	$P(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2 + c_{10}XYZ + c_{11}X^3 + c_{12}Y^3 + c_{13}Z^3$
20	$P(X, Y, Z) = c_0 + c_1X + c_2Y + c_3Z + c_4XY + c_5XZ + c_6YZ + c_7X^2 + c_8Y^2 + c_9Z^2 + c_{10}XYZ + c_{11}X^3 + c_{12}Y^3 + c_{13}Z^3 + c_{14}XY^2 + c_{15}XZ^2 + c_{16}YZ^2 + c_{17}YX^2 + c_{18}ZX^2 + c_{19}ZY^2$

Pode-se observar na Figura 14 que a resposta espectral do sensor se estende acima do espectro visível, o que é indesejável. Para solucionar este problema, utiliza-se um filtro próximo da faixa visível para evitar que outros comprimentos de onda influenciem na medida, Figura 15.

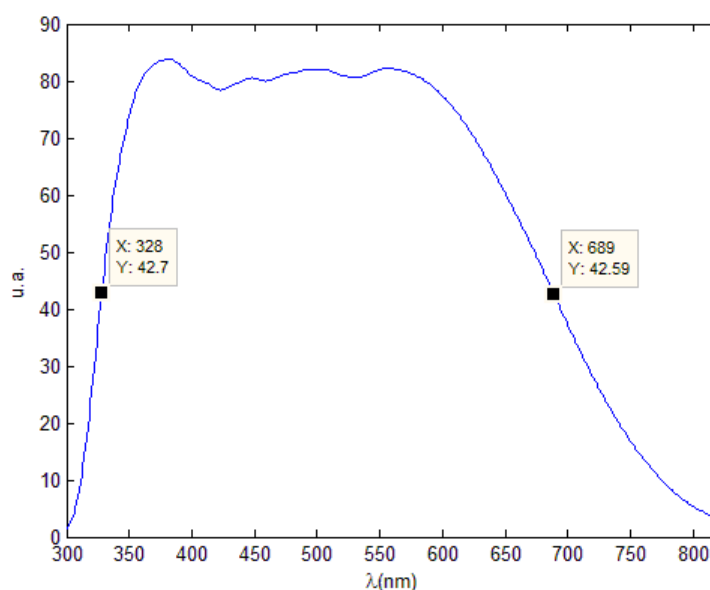


Figura 15 - Resposta espectral do filtro para faixa visível utilizado

3.4. Sistema Eletrônico

A parte eletrônica do projeto é dividida em duas placas: em uma placa estão os LEDs e o *driver* de corrente, utilizado para controlar a intensidade de corrente da fonte de iluminação; na outra placa estão o sensor ótico, o amplificador de transimpedância e o microcontrolador PIC 18F4550, utilizado para fazer todo o controle de iluminação de tratamento de resultados. Este microcontrolador envia estes resultados para o display LCD que será responsável pela interface sistema-usuário.

3.4.1. Placa de LEDs e Driver

Para efeito de testes e simulações os LEDs 5 mm foram utilizados em *protoboard*, para que não houvesse gastos desnecessários com confecção de placas. Os LEDs SMD necessitam de uma placa de circuito impresso para que possa ser utilizada, já que não trabalha com “perfuração” de superfícies. Por isso foi desenvolvida uma placa para o conjunto de LEDs do tipo SMD. Esta placa é composta pelos oito LEDs que em conjunto cobrem o espectro visível e o *driver* ADS1110 para controle da intensidade de corrente. A Figura 16 mostra a placa desenvolvida para os LEDs SMD utilizados no sistema.

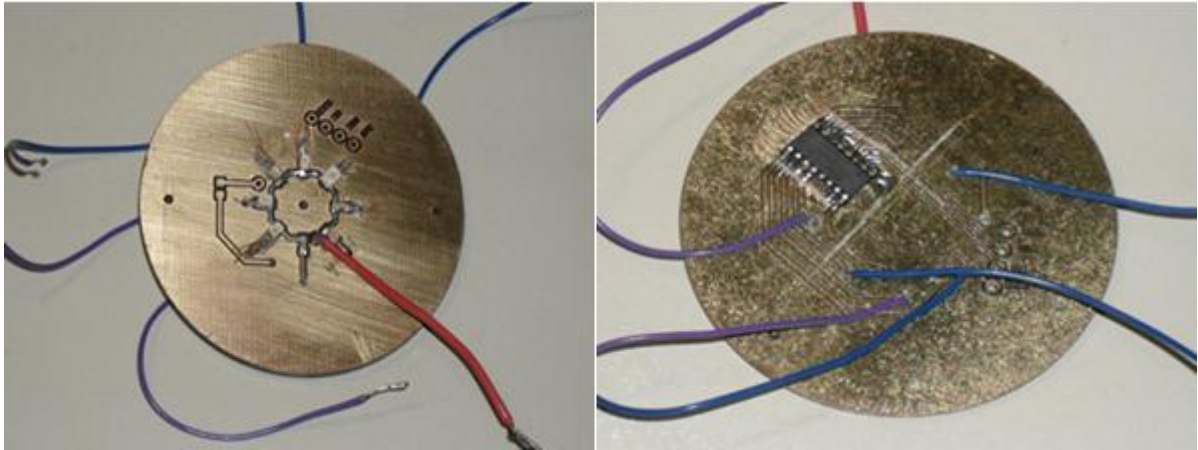


Figura 16 - Placa de LEDs SMD a) Face dos LEDs b) Face do *Driver*

3.4.2. Placa do sensor BPW

Para a utilização do sensor BPW21R, foi implementado um amplificador de transimpedância (Figura 17) para ajuste do sinal do sensor. Assim, a resposta do sensor amplificado pode ser escrita como:

$$V_{BPW} = k. \int I(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda \quad (4)$$

onde, $I(\lambda)$ é a intensidade luminosa que atinge o sensor, $BPW(\lambda)$ é a curva de resposta do sensor, k é uma constante de conversão (luz-corrente, corrente-tensão) e V_{BPW} é a tensão fornecida na saída do amplificador.

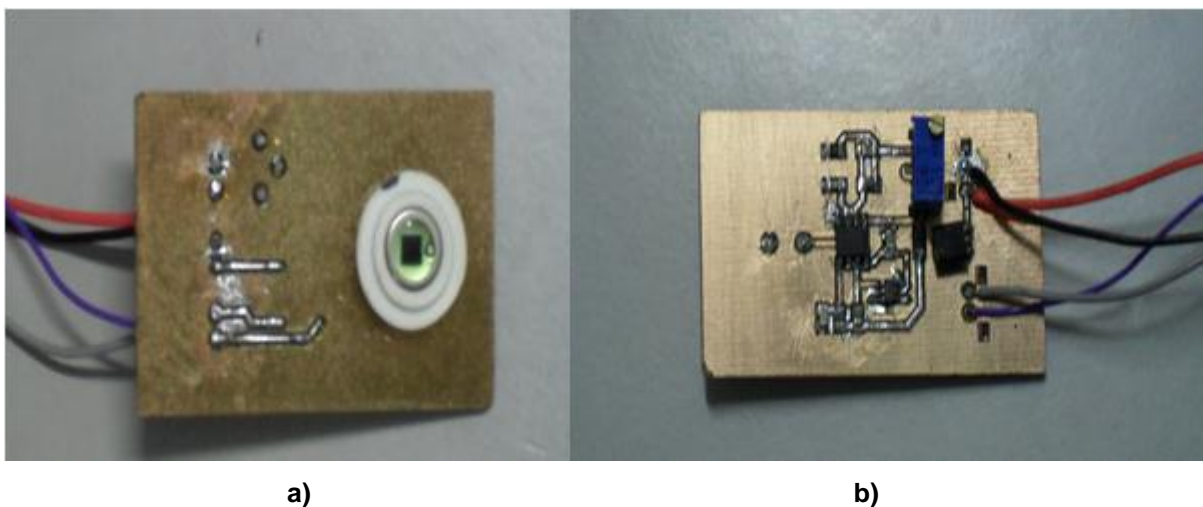


Figura 17 - Placa do Sensor BPW - a) Face do Sensor b) Face do Amplificador de Transimpedância

3.4.3. Placa do sensor TCS3771

O sensor TCS3771 não necessita de um circuito de transimpedância como o BPW. Por esta razão o circuito eletrônico que constitui sua placa é bem mais simples. A figura 18 mostra uma foto da placa desenvolvida.

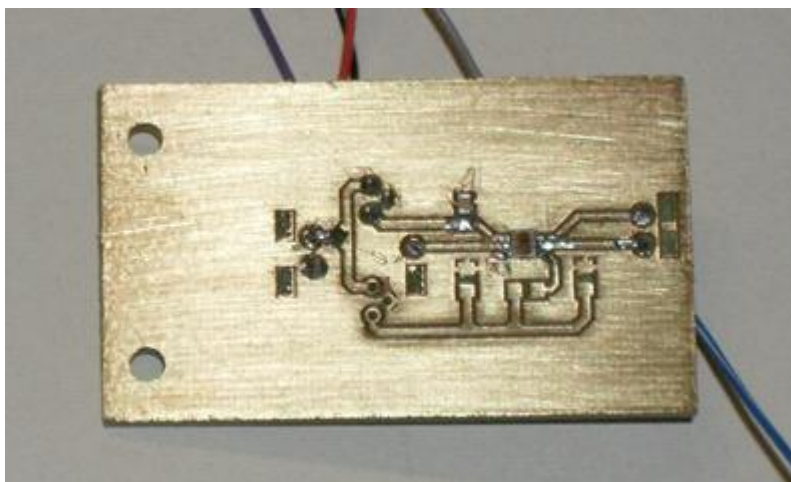


Figura 18 - Placa do sensor TCS3771

3.4.4. Microcontrolador PIC 18F4550

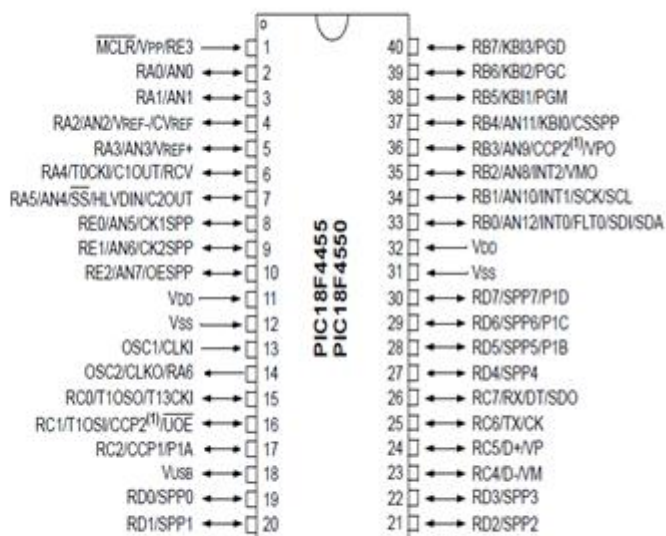
A utilização do microcontrolador possibilita o controle automático do sistema de maneira muito simples. Com ele é possível tratar operações complexas e funções específicas, fazendo com que o sistema seja controlado automaticamente. A utilização do microcontrolador também facilita o envio de informações para o display LCD que mostrará os resultados para o usuário.

A escolha pelo microcontrolador PIC 18F4550 deveu-se a algumas vantagens que este PIC possui, tais como: conversor A/D interno, existência de bibliotecas prontas de programação através do software “*MPLAB IDE*”, flexibilidade na estrutura de osciladores, além de ser de fácil acesso no mercado. O PIC 18F4550 possui encapsulamento PDIP, com 40 pinos, conversor A/D interno de 10 bits em até 8 canais.

A figura 19 mostra a foto e a pinagem do PIC 18F4550.



a)



b)

Figura 19 - a) Foto do PIC18F4550; b) Pinagem do PIC18F4550 [Alterada da folha de dados do componente].

O diagrama de blocos que representa o sistema é apresentado a seguir.

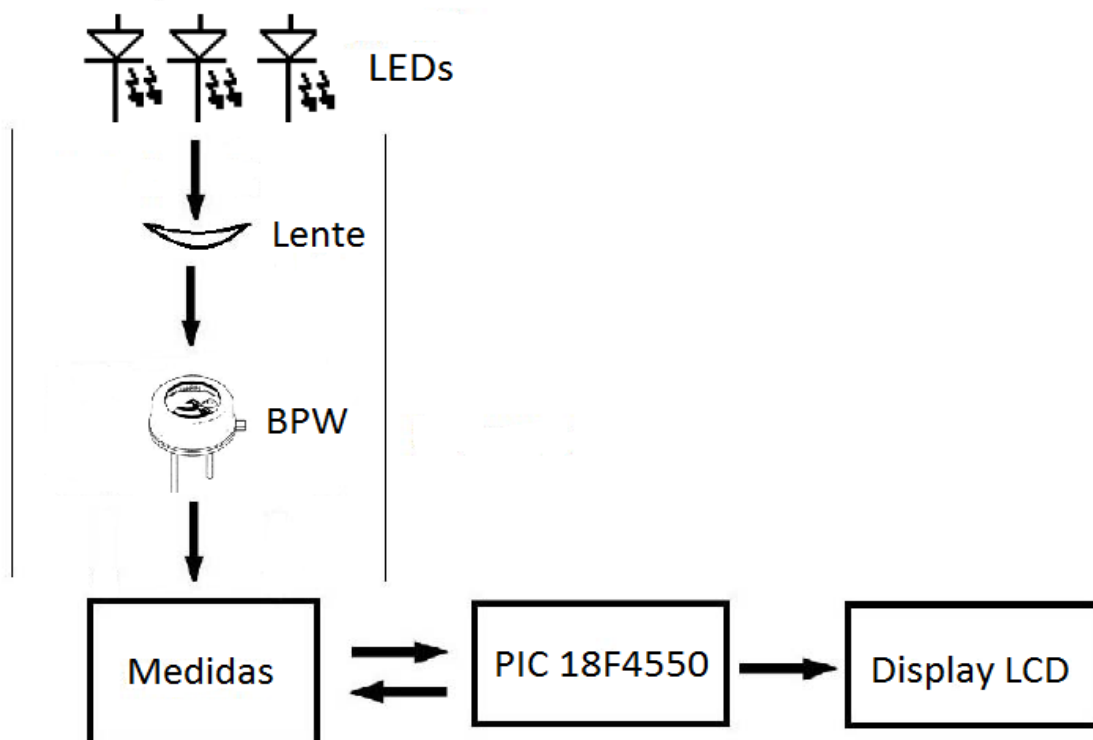


Figura 20 - Diagrama de Blocos do sistema

3.4.5. Display LCD

Um *Display* de LCD (*Liquid Crystal Display*) foi utilizado para realizar a interface entre sistema automático e usuário. Através dele é possível iniciar o sistema e ler os resultados das medidas obtidas. O modelo utilizado neste projeto foi o JHD204A, que é um *display* 20CHAR x 4ROW, ou seja, 20 caracteres e 4 linhas. É um tamanho que permite fácil leitura do usuário e é facilmente encontrado no mercado. A Figura 21 mostra o *Display* utilizado e sua pinagem.

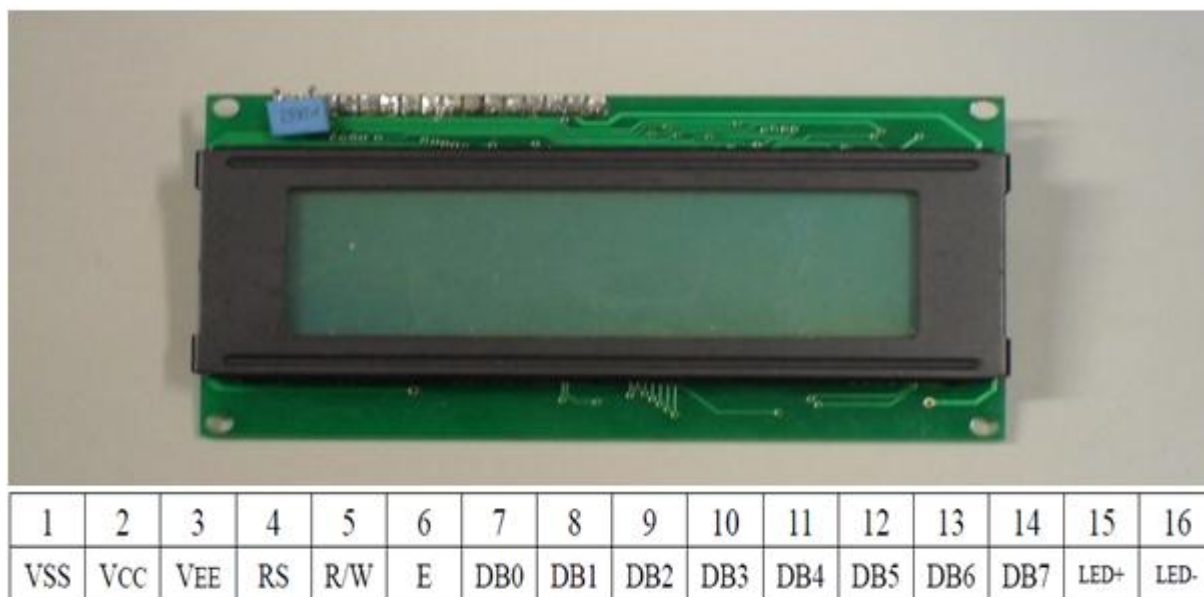


Figura 21 - Display LCD e sua pinagem

3.5. Validação do Método

A norma diz: "No caso de o fornecedor dos filtros declarar valor para a transmitância luminosa, o limite do desvio desse valor será $\pm 3\%$ (absoluto) para a transmitância nas classes de 0 a 3 e de $\pm 30\%$ relativo ao valor da transmitância, para a classe 4". Deste modo, foram adotados estes valores como requisitos para o projeto. Este limite pode ser visto como uma região delimitada pelos pontos vermelhos no gráfico das transmitâncias calculadas com o espectrofotômetro Cary 5000, Varian (Figura 22), do LIO, em comparação com a transmitância obtida com o equipamento, Figura 23.



Figura 22 - Espectrofotômetro Cary 5000, Varian

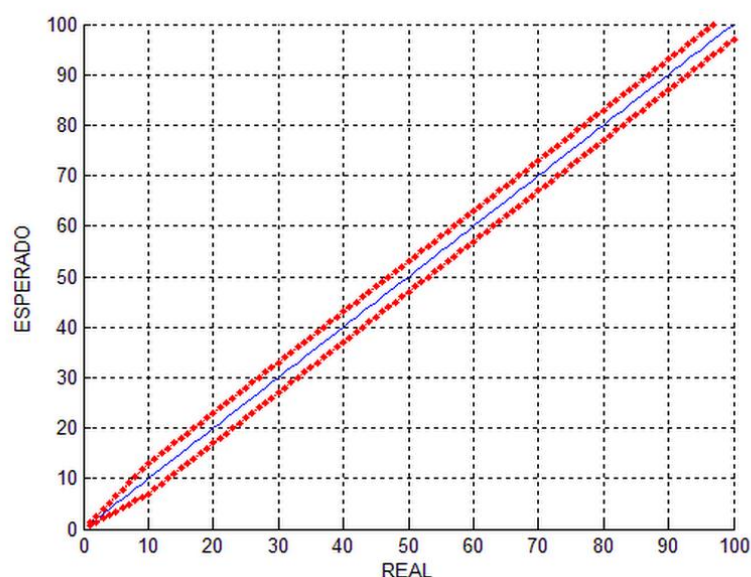


Figura 23 - Limite de desvio das transmitâncias adotado para o padrão de referência

Foram obtidos os espectros de transmissão de 30 lentes, ou seja, 15 óculos de sol (Figura 24) na faixa de 380 a 780 nm a cada 10 nm com o espectrofotômetro *Cary 5000*, *Varian*, como amostras para medidas da transmitância luminosa.



Figura 24 - Amostras de Óculos utilizadas para os testes

A seguir são descritos diversos testes e simulações realizados em laboratório, com o objetivo de garantir a conformidade do sistema com os requisitos da norma NBR 15111/2004, de acordo com sua margem de tolerância de erro.

3.5.1. Teste das fontes de iluminação

O primeiro teste realizado reúne espectros de diversas fontes de iluminação e utiliza a curva de resposta do sensor BPW21R para determinar a fonte responsável para a melhor aproximação teórica da função de ponderação para transmitância no espectro visível.

Um espectrofotômetro *USB2000+*, da *Ocean Optics* (Figura 25), do LIO, que possui uma fibra ótica capaz de captar o caminho ótico da luz e criar seu espectro através de um *software*, foi utilizado para aquisição dos espectros de fontes luminosas: uma lâmpada incandescente, duas fluorescentes, e um conjunto de LEDs (com picos em 525, 560, 585 e 630 nm).



Figura 25 - Foto do Espectrofotômetro *USB2000+*

As transmitâncias foram calculadas com a função da norma e comparou-se com a transmitância teórica obtida (equação 5) com a função resultante da multiplicação do espectro de emissão da fonte de luz com a resposta espectral do sensor BPW (equação 6).

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

$$\tau_{V_teste1} = \frac{\int_{380nm}^{780nm} \tau_F(\lambda) \cdot BPW(\lambda) \cdot Lamp(\lambda) d\lambda}{\int_{380nm}^{780nm} BPW(\lambda) \cdot Lamp(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

3.5.2. Comparativo entre os LEDs 5 mm e SMDs

Com o auxílio do espectrofotômetro *USB2000+* (*Ocean Optics*), o espectro de cada LED adquirido para o sistema pôde ser analisado. A partir dos espectros pôde-se fazer uma análise comparativa entre os espectros teóricos (tabelados pela norma) e os espectros dos LEDs alcançados em laboratório. Com o tratamento matemático dos espectros, através do *software MATLAB* e alguns LEDs testados, foi encontrado o conjunto que melhor se adequava aos requisitos requeridos.

Como explicado anteriormente, o teste com LEDs do tipo SMD foi realizado porque não foram encontrados LEDs 5 mm com um pico de comprimento de onda próximo a 510

nm (azul), que é o que a norma brasileira exige. Ainda, os componentes SMD possuem ângulo de abertura maior e tamanho reduzido no sistema.

Os mesmos testes feitos com os LEDs 5 mm foram feitos com os SMDs e assim, foi possível fazer uma análise comparativa para a decisão do melhor conjunto de LEDs a se utilizar.

3.5.3. Teste de variação de espectro dos LEDs

É necessário alterar as intensidades luminosas dos LEDs de modo a ajustar o espectro para que ele se adeque à ponderação da região visível, por isso foi feita a análise do deslocamento do pico de intensidade em dois LEDs com a variação da corrente através do componente. Este teste mostra o quanto pode variar o espectro de acordo com o ajuste da intensidade dos LEDs. Como parâmetros, foram utilizados os LEDs 5 mm de cor verde e de cor vermelha.

3.5.4. Aproximação teórica da transmitância luminosa

Foi feita uma aproximação teórica da transmitância que os óculos teriam usando os LEDs e o sensor BPW. A transmitância luminosa através da lente dos óculos é calculada como a média ponderada do espectro do filtro com a função ponderação BPW*LED, onde LED é o espectro obtido dos LEDs com o *USB2000+*, e BPW é a curva de resposta do sensor (equação 7).

$$\tau_{V_{teste4}} = \frac{\int \tau_F(\lambda).LED(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda}{\int LED(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda} \quad (7)$$

3.5.5. Teste Experimental da transmitância luminosa com o sensor BPW

Os primeiros testes experimentais de transmitância foram realizados com a utilização dos LEDs 5 mm e o sensor BPW21R.

Em um protoboard montou-se um circuito básico para os LEDs, com um amperímetro monitorando a corrente dos LEDs sempre em 20 mA. Com o auxílio de uma presilha regulável, colocou-se a placa do BPW logo acima do circuito montado, com os centros

óticos alinhados, afim de que a captação luminosa fosse maximizada. Foram utilizadas como parâmetros as 30 amostras de lentes de óculos de sol, apresentadas anteriormente na Figura 24.

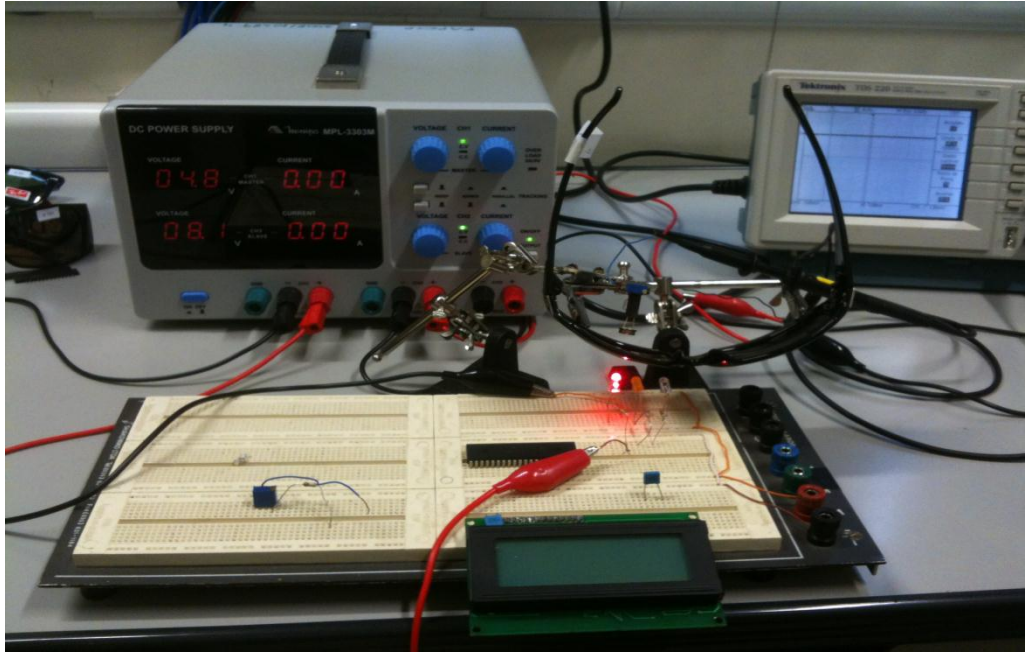


Figura 26 - Sistema manual utilizado para testes iniciais

Antes do início das medições, foi feito o ajuste de *offset* do amplificador para garantir uma tensão nula na saída quando o sensor não estivesse recebendo luminosidade, e ajuste de ganho, para evitar a saturação da tensão no sensor durante os testes. Os dois ajustes são feitos com potenciômetros. Os testes foram realizados em uma sala escura, reduzindo a luminosidade externa, para que esta não tivesse influência na resposta do sensor. As lentes foram colocadas bem próximas ao sensor, para evitar influência da sua curvatura nas medidas.

Após ajustes, as primeiras medições foram feitas da seguinte maneira: com o LED aceso próximo da sua máxima intensidade anotou-se o nível de tensão na saída do sensor ótico. Posteriormente, colocou-se uma lente amostra entre o LED e o sensor e anotou-se o valor de saída. A divisão entre os dois valores obtidos equivale à transmitância luminosa através da lente dos óculos.

$$\tau_{sinal_{teste4}} = \frac{\int \tau_F(\lambda).LED(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda}{\int LED(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda} = \frac{\int I_{depois}(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda}{\int I_{antes}(\lambda).BPW(\lambda)d\lambda} = \frac{V_{depois}}{V_{antes}} \quad (8)$$

onde, I é a intensidade que atinge o sensor. A intensidade antes de colocar a lente é correspondente à iluminação do LED. Após o posicionamento da lente, a intensidade é proporcional à radiação do LED e à transmitância do filtro.

O mesmo teste experimental foi realizado com os LEDs SMD e os resultados puderam ser analisados e comparados para decisão do melhor conjunto ótico.

3.5.6. Teste de comportamento do sensor TCS

O objetivo do teste é analisar a viabilidade de se usar o sensor TCS para calcular a transmitância visível e semafórica.

A primeira parte consiste em usar filtros teóricos passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e gaussiano em conjunto com uma lâmpada incandescente e o sensor BPW, e calcular as transmitâncias teóricas de cada filtro.

Com a resposta do sensor TCS e utilizando a resposta da mesma lâmpada incandescente, obtêm-se os valores de X , Y e Z . Fazendo a regressão polinomial, encontram-se os coeficientes do polinômio que ajusta os valores de transmitância para os valores almejados. Também, como o mesmo polinômio, calcula-se a transmitância de 30 lentes.

O resultado final é a comparação entre as transmitâncias com o sensor BPW e com o sensor TCS para a lâmpada incandescente.

4. Resultados

4.1. Teste das fontes de iluminação

A análise comparativa da função ponderação para a transmitância visível com a curva teórica obtida com as fontes de luz e sensor BPW está na coluna esquerda da Figura 27. A lâmpada incandescente mostra uma ponderação alta na região próxima ao vermelho, enquanto as lâmpadas fluorescentes possuem picos de emissão curtos, e com alta energia.

Também é visto, à direita, a transmitância visível calculada para 30 lentes com a função da norma comparada à obtida teoricamente. Para estes gráficos, o ideal é que as medições fiquem dentro das margens de erro esperadas pela norma, mostradas como linhas pontilhadas.

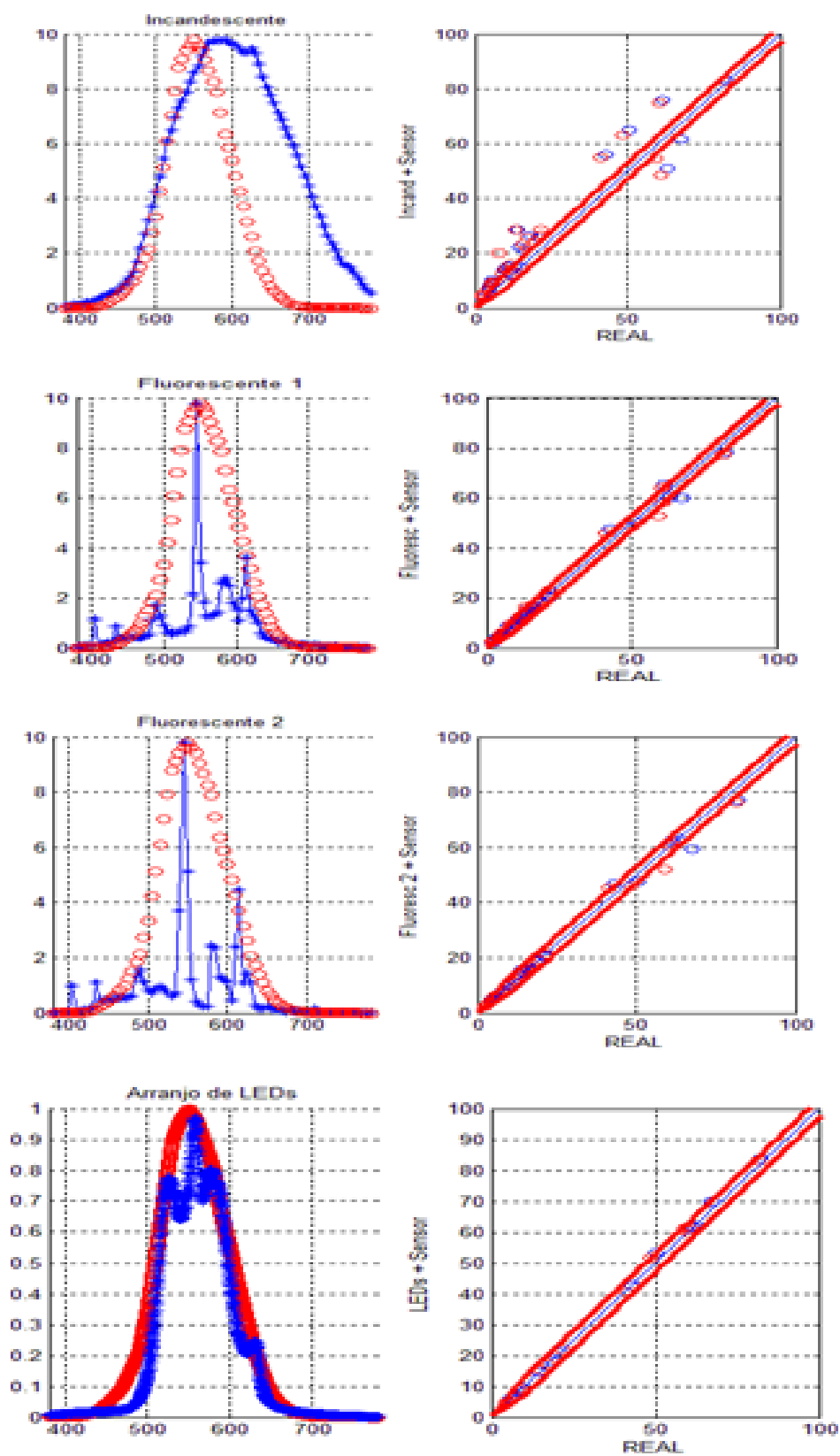


Figura 27 - Coluna 1: Aproximação da função de ponderação visível. Coluna 2: Transmitância comparada utilizando a função proposta.

4.2. Comparativo entre os LEDs 5 mm e SMDs

Para o teste semafórico, os gráficos comparativos são os apresentados na Figura 28, onde são mostrados os espectros de emissão medidos dos LEDs. É possível notar que a aproximação das curvas de ponderação é melhor para os LEDs SMD, exceto para a cor amarela.

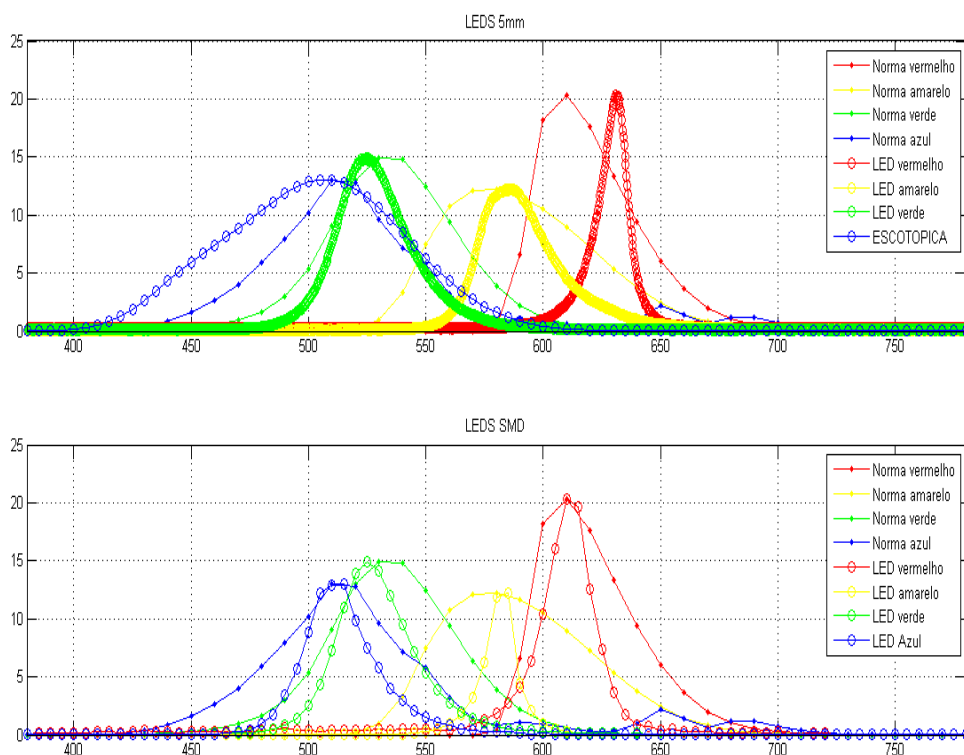


Figura 28 - Gráficos comparativos dos LEDs 5 mm e SMD. Espectro de emissão dos LEDs medidos no espectrofotômetro Ocean Optics USB 2000.

4.3. Teste de variação de espectro dos LEDs

O resultado da intensidade luminosa do LED pela corrente a que o LED está sujeito está apresentado na Figura 29. É possível observar um deslocamento no pico de emissão de 1,3 nm para o LED(a), e de 10,1 nm para o LED(b).

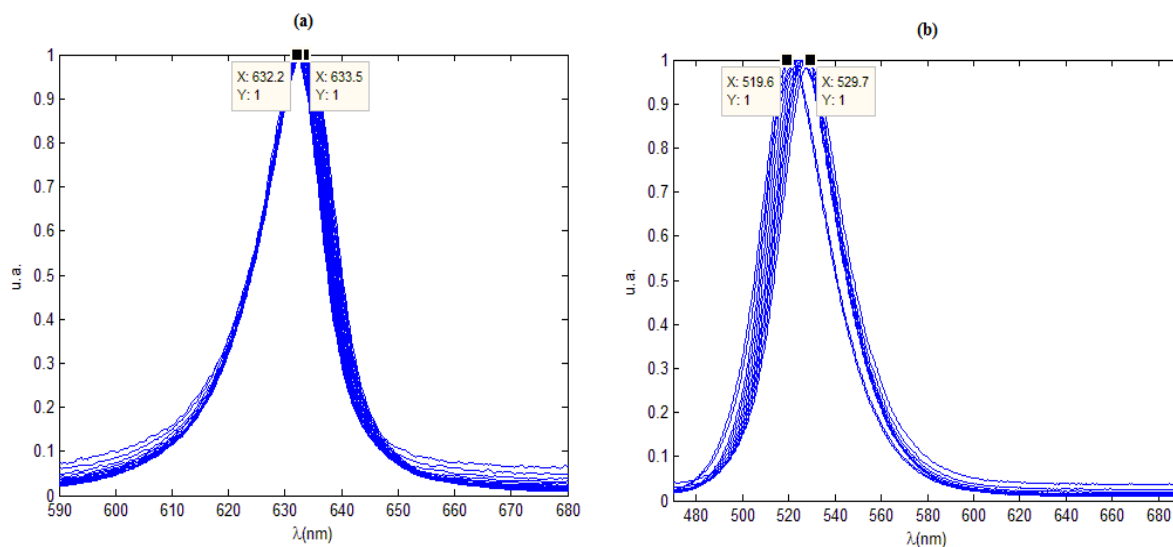


Figura 29 - Deslocamento do pico dos espectros dos LEDs em função da variação da corrente

Essa variação de espectro não apresenta nenhum tipo de padrão ou regularidade, o que pode ser prejudicial para o sistema, já que cada cor das luzes de sinalização apresenta uma variação diferente de acordo com a corrente que passa pelo LED. Para minimizar este problema, nos testes semafóricos, utilizou-se os LEDs sempre com 20 mA de corrente passante, que é um valor próximo da máxima corrente suportada pelo componente.

4.4. Aproximação teórica da transmitância luminosa

Os resultados das ponderações teóricas com os LEDs 5 mm estão apresentados nas Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

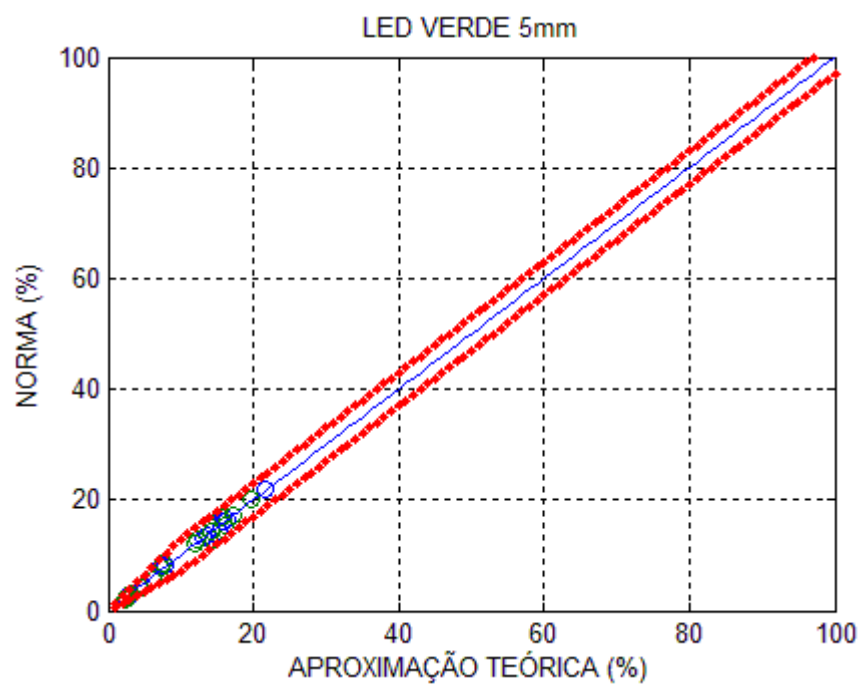


Figura 30 – Transmitância teórica do LED verde de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semaforica

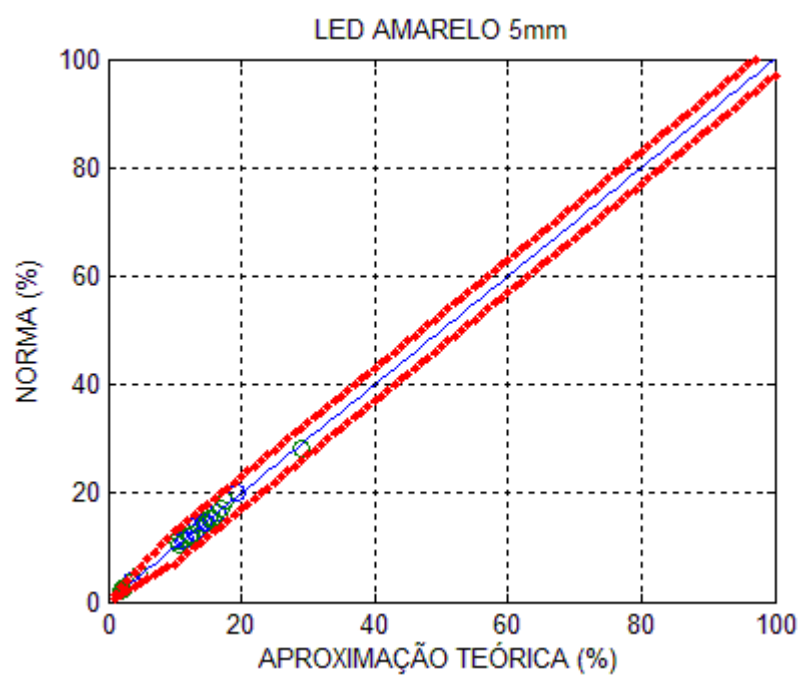


Figura 31 – Transmitância teórica do LED amarelo de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semaforica

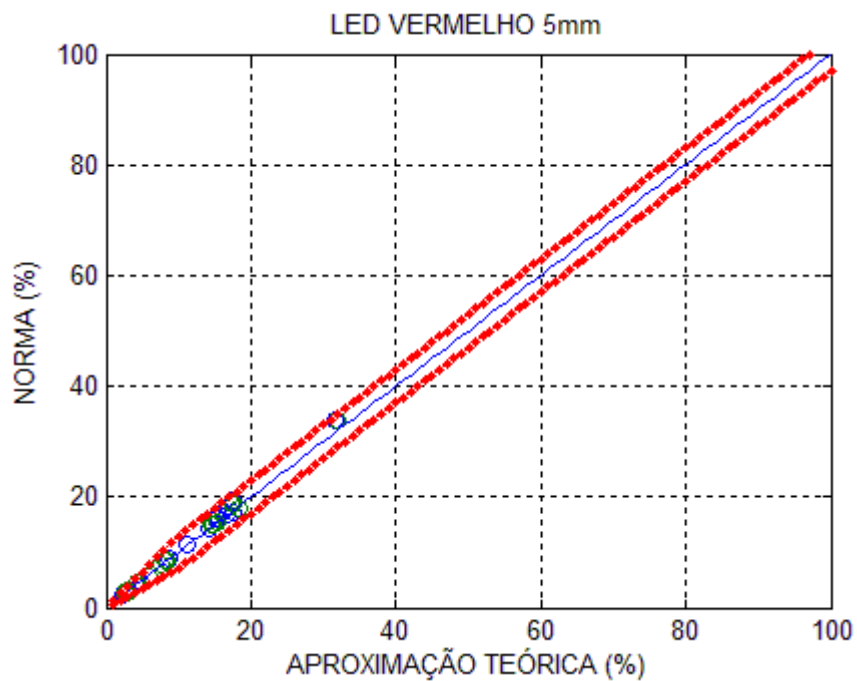


Figura 32 – Transmitância teórica do LED vermelho de $\varnothing = 5$ mm comparada à transmitância semafórica

Para os LEDs SMD os resultados foram os apresentados a seguir, nas Figura 33, Figura 34, Figura 36 e Figura 36.

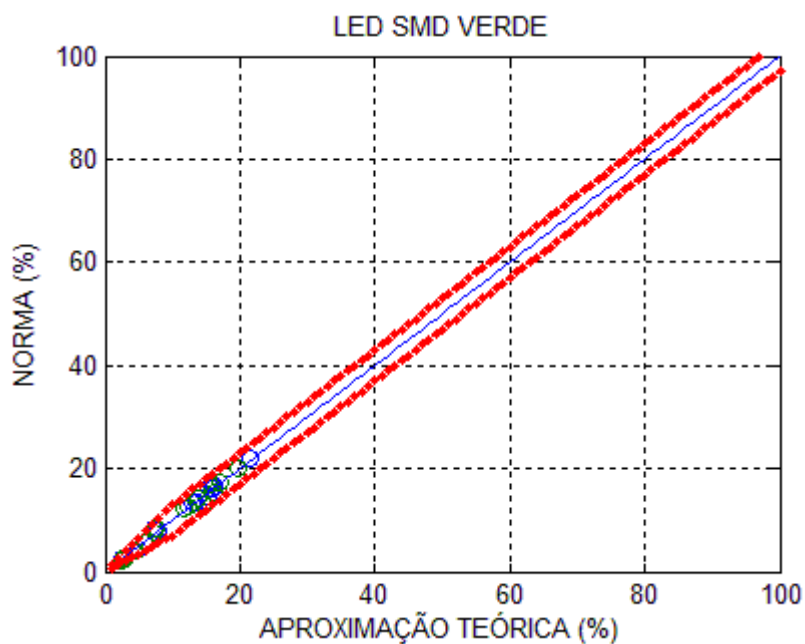


Figura 33 - Transmitância teórica do LED verde SMD comparada à transmitância semafórica

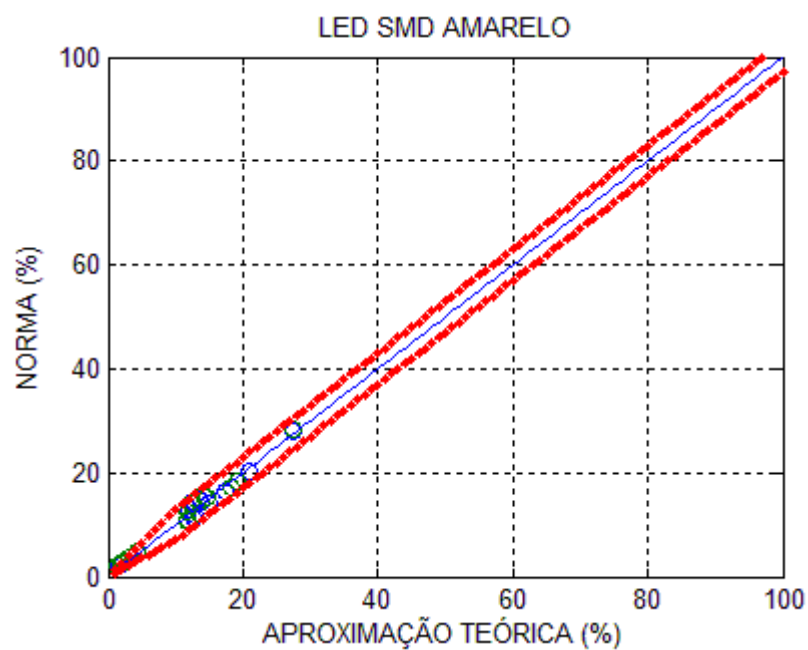


Figura 34 - Transmitância teórica do LED amarelo SMD comparada à transmitância semafórica

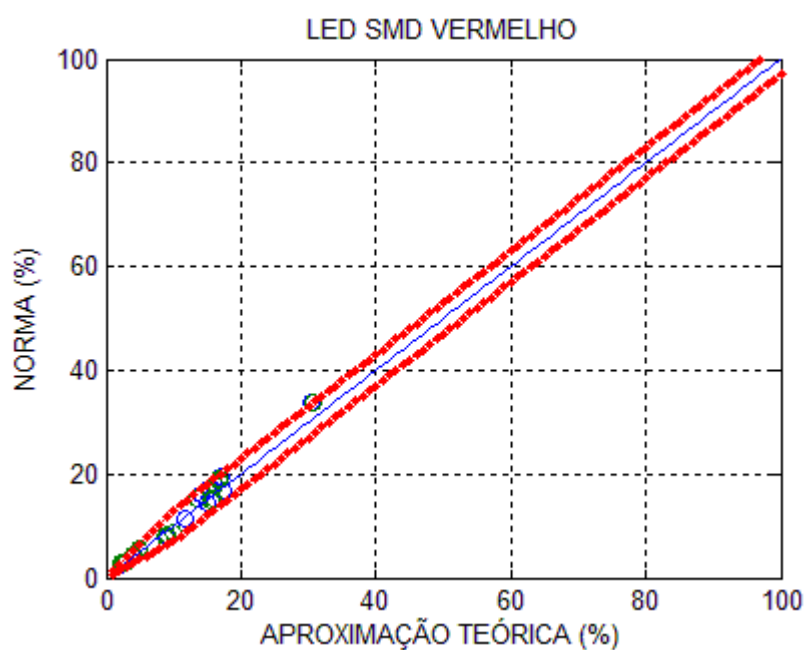


Figura 35 - Transmitância teórica do LED vermelho SMD comparada à transmitância semafórica

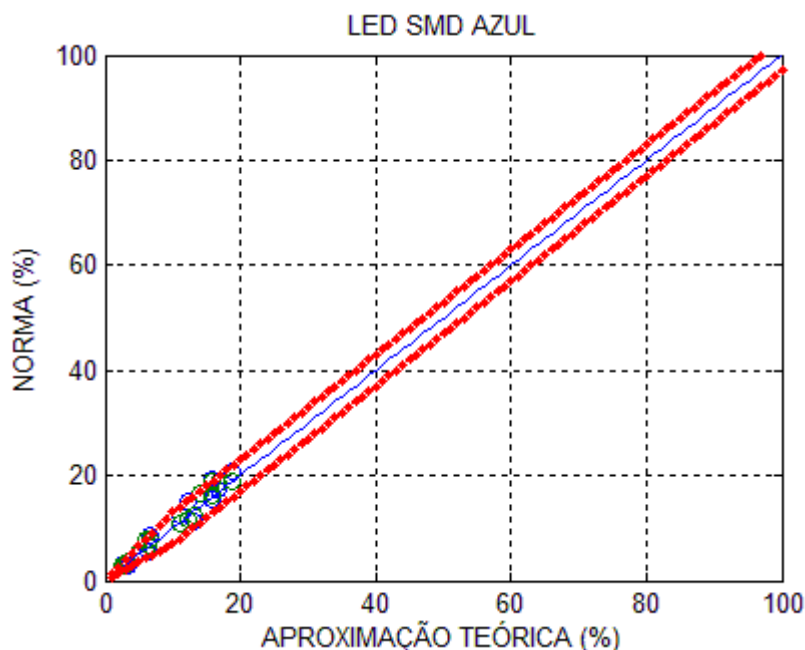


Figura 36 - Transmitância teórica do LED azul SMD comparada à transmitância semafórica

Os gráficos das aproximações teóricas com relação aos espectros requeridos pela norma brasileira mostram que tanto os LEDs de $\varnothing = 5$ mm, quanto os LEDs SMD têm, em conjunto com o sensor BPW, uma resposta dentro da faixa de tolerância permitida pela norma, para o espectro teórico das trinta amostras de lentes.

4.5. Teste experimental da transmitância luminosa

Para os testes experimentais realizados em laboratório, os resultados com os LEDs de $\varnothing = 5$ mm são apresentados nas Figura 38, Figura 39, e Figura 44.

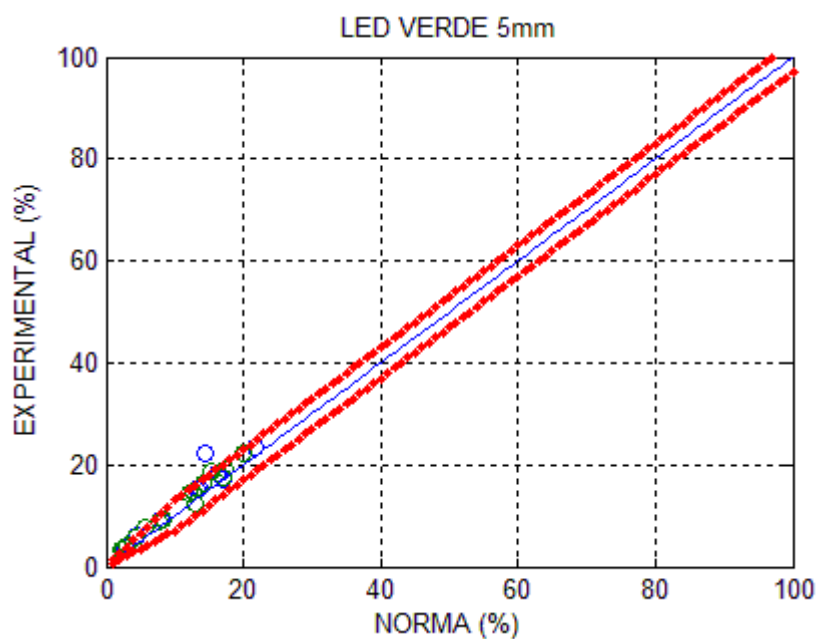


Figura 37 – Transmitância medida experimentalmente com LED verde de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica

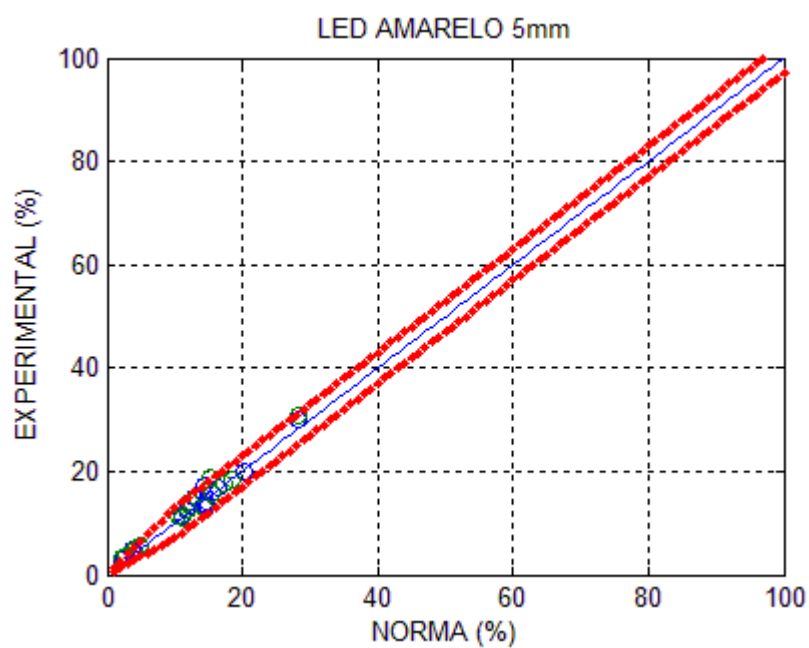


Figura 38 – Transmitância medida experimentalmente com LED amarelo de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica

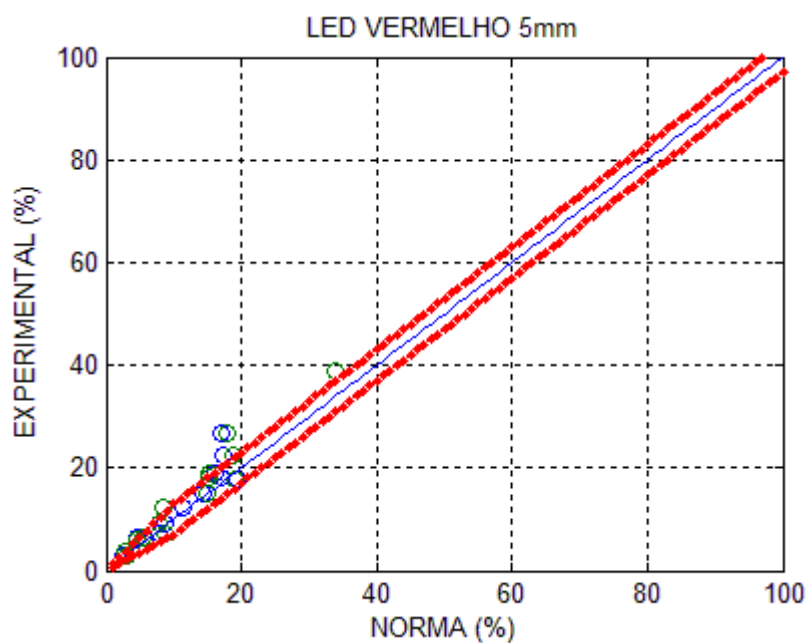


Figura 39 – Transmitância medida experimentalmente com LED vermelho de $\varnothing = 5$ mm comparada a transmitância semafórica

Os mesmos testes experimentais realizados com os LEDs do tipo SMD resultam nos seguintes gráficos.

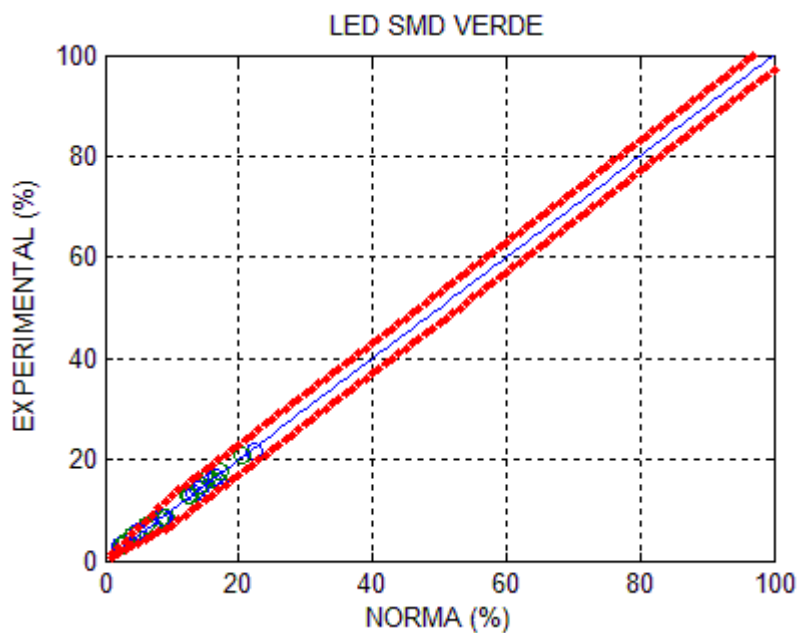


Figura 40 - Transmitância medida experimentalmente com LED verde SMD comparada a transmitância semafórica

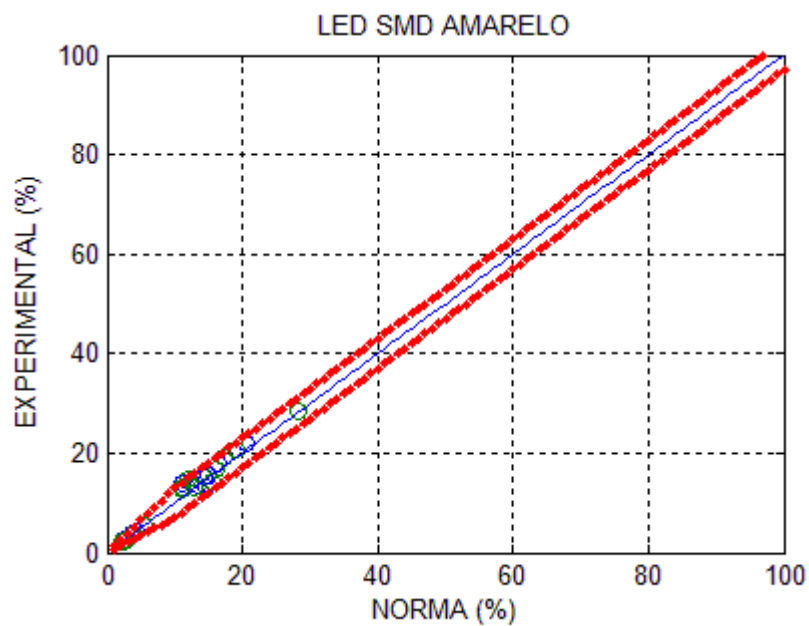


Figura 41 - Transmitância medida experimentalmente com LED amarelo SMD comparada a transmitância semafórica

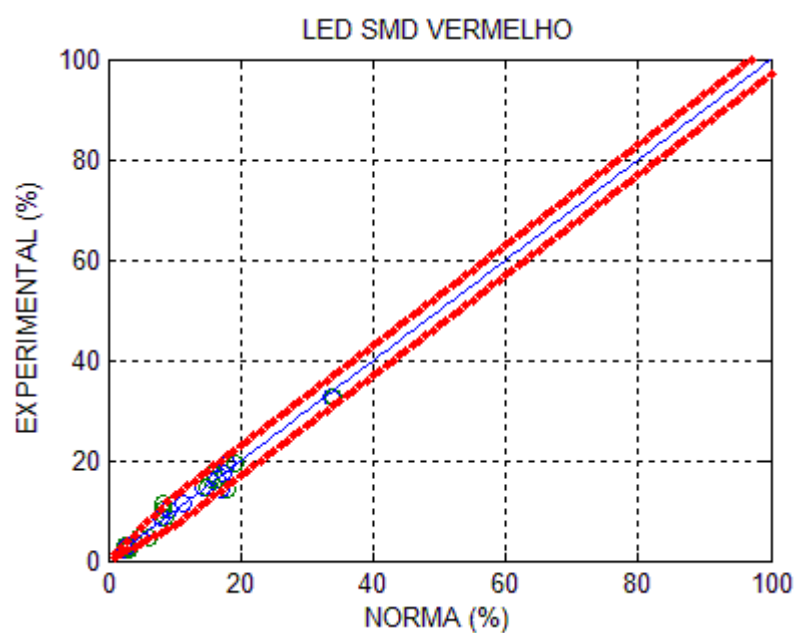


Figura 42 - Transmitância medida experimentalmente com LED vermelho SMD comparada a transmitância semafórica

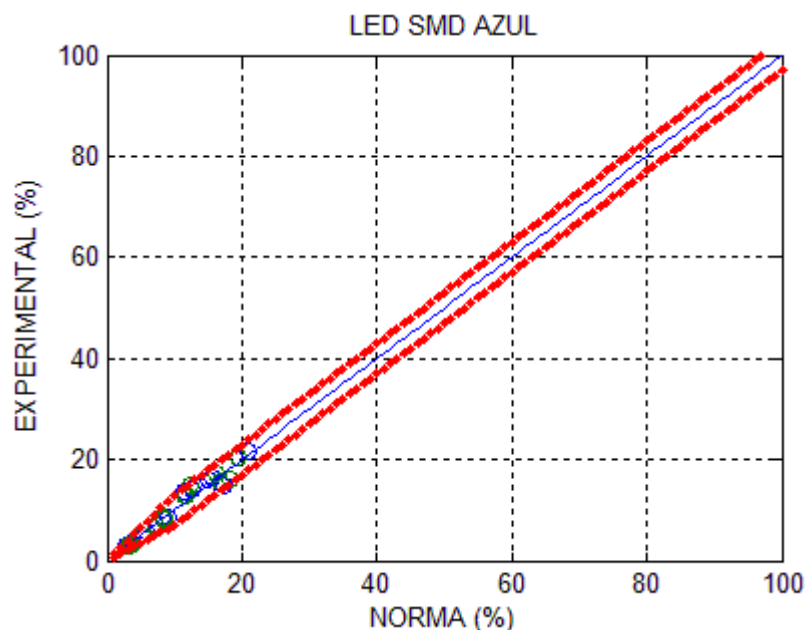


Figura 43 - Transmitância medida experimentalmente com LED azul SMD comparada a transmitância semafórica

Com o auxílio da função “corr” do *MATLAB* é possível obter a função de correlação r^2 das medidas alcançadas com a medida-padrão, ou seja, os valores alcançados com o espectrofotômetro *CARY 5000*. Esse cálculo é uma ótima forma de se mostrar o quão próximo estão as medidas experimentais das medidas padrões.

Tabela 4 - Correlação das medidas experimentais com a medida-padrão

Cor / Tipo	Lente	Correlação
Verde 5 mm	Esquerda	0,9678
Verde 5 mm	Direita	0,9932
Amarelo 5 mm	Esquerda	0,9928
Amarelo 5 mm	Direita	0,9938
Vermelho 5 mm	Esquerda	0,9767
Vermelho 5 mm	Direita	0,9800
Verde SMD	Esquerda	0,9971
Verde SMD	Direita	0,9957
Amarelo SMD	Esquerda	0,9915
Amarelo SMD	Direita	0,9918
Vermelho SMD	Esquerda	0,9932

Vermelho SMD	Direita	0,9824
Azul SMD	Esquerda	0,9815
Azul SMD	Direita	0,9798

É possível observar pelos gráficos dos testes anteriores e pela tabela de correlação, que a utilização dos LEDs SMD se encaixa mais apropriadamente na faixa de tolerância, principalmente para a cor vermelha, na qual, para cinco lentes os pontos ficaram fora da margem de erro permitida. A partir da análise destes resultados conclui-se que a utilização dos LEDs do tipo SMD é mais vantajosa com relação aos LEDs de $\varnothing = 5$ mm, mesmo para a cor amarela, que possui um espectro mais próximo da norma para o de $\varnothing = 5$ mm.

4.6. Análise de comportamento do sensor TCS3771

A Figura 44 mostra à esquerda a função de ponderação para transmitância visível comparada com uma fonte de luz incandescente e o sensor BPW. À direita, está a comparação das transmitâncias dos filtros teóricos, calculadas com a função da norma e com a função (lâmpada + BPW).

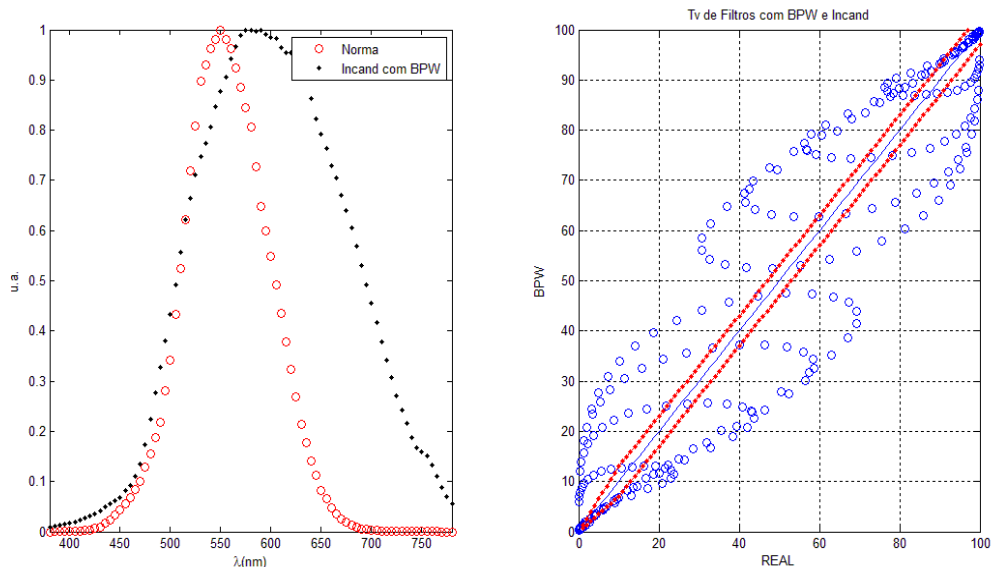


Figura 44 - Função com BPW e Incandescente e transmitância calculada para filtros teóricos

Percebe-se que a lâmpada e o BPW não calculariam transmitâncias dentro da margem esperada. Os filtros teóricos então são usados para cálculo dos coeficientes do

polinômio. As transmitâncias para os filtros teóricos criados utilizando a resposta do sensor TCS e o polinômio obtido está apresentado na Figura 45.

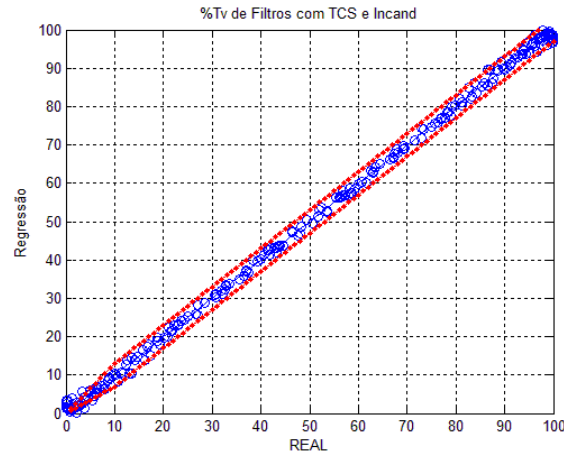


Figura 45 - Transmitância de filtros teóricos utilizando regressão polinomial

Resta saber se o polinômio calculado valeria para as lentes solares. Assim, o mesmo foi feito utilizando a espectrofotometria das lentes, porém, foi utilizado o mesmo polinômio obtido com os cálculos para os filtros teóricos. A Figura 46, mostra a transmitância usando apenas a lâmpada e o sensor BPW para as lentes solares e a Figura 47 mostra a transmitância utilizando o polinômio.

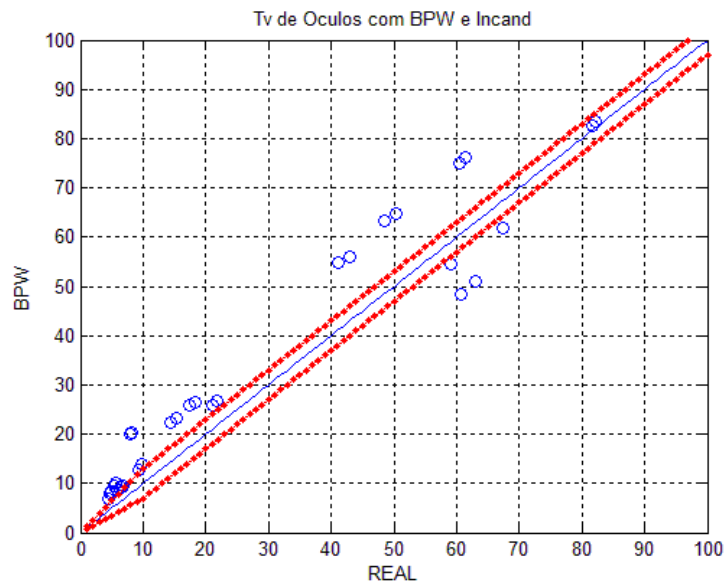


Figura 46 - Transmitância das lentes com o BPW e a lâmpada Incandescente

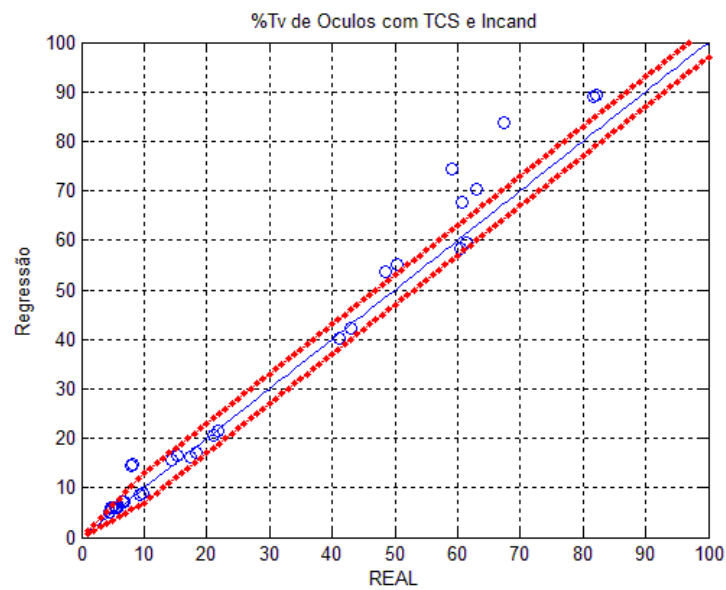


Figura 47 - Transmitância das lentes utilizando um polinômio ajustado

Os Testes foram realizados em quinze (15) óculos de sol.

4.7. Protótipo do Sistema

Após os testes e um conjunto de componentes devidamente definidos, construiu-se um protótipo para o sistema. Este protótipo pode ser visto na Figura 48.

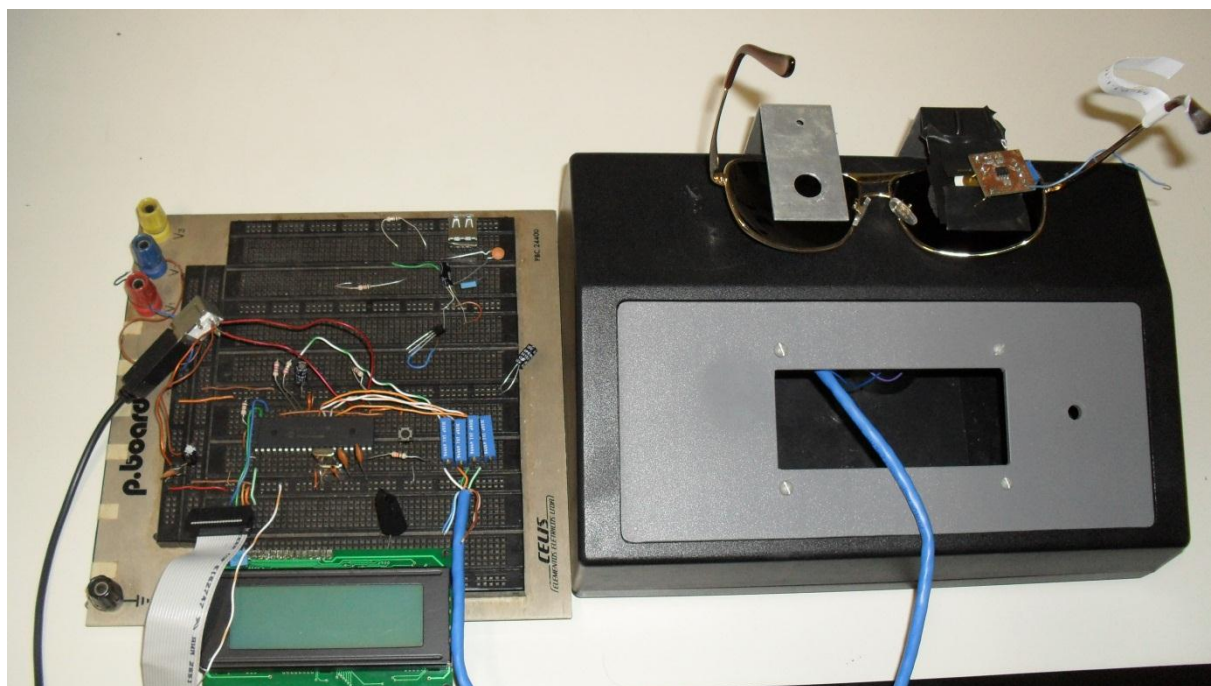


Figura 48 - Protótipo do Sistema

5. Discussão

Durante o desenvolvimento do projeto foram consideradas várias opções de componentes para compor o sistema. Os testes realizados mostraram que a melhor opção para o sistema ótico do protótipo é a utilização dos LEDs do tipo SMD em conjunto com o sensor BPW21R.

As simulações teóricas, ou seja, aquelas que se valeram dos espectros obtidos com o espectrofotômetro *Ocean Optics USB2000+*, se apresentaram bem de acordo com o requerido pela norma 15111/2004, tanto com os LEDs SMD, quanto com os LEDs de $\varnothing = 5$ mm. A utilização de lâmpadas convencionais não mostra um resultado adequado para a obtenção da função de ponderação juntamente com a utilização do sensor BPW21R, pois desvios significativos da transmitância luminosa calculada com relação a reta ideal esperada aparecem, em comparação com os valores reais obtidos com a função da norma.

Por outro lado, a função obtida com o arranjo de LEDs testados no laboratório tem uma melhor aproximação do resultado necessário, sendo essa proximidade o motivo para que os cálculos da transmitância das lentes fiquem mais próximos do real.

O conjunto de LEDs SMD mostra a possibilidade de melhora na função, com resultados dentro da margem de erro almejado. Além disso, a montagem com LEDs SMD mostra ser uma alternativa interessante devido ao baixo custo, tamanho reduzido e baixo consumo de potência para os medidores portáteis. Porém, esta fonte de iluminação também apresenta o problema visto na seção 4.3 deste trabalho, que é o deslocamento do pico de emissão de acordo com a corrente que atravessa sua seção.

No início do desenvolvimento dos testes, os resultados montados em bancada apresentaram discordância com os valores teóricos, muito provavelmente pela falta de um caminho ótico isolado para as medidas. Por isso o sistema mecânico apresentado na Figura 48, passou a ser utilizado para os testes. Com a utilização desta “carcaça” para o sistema, as medidas passaram a ter uma concordância muito boa com as simulações teóricas, como pode ser comprovado pelos gráficos apresentados na seção de resultados. Foi possível perceber durante os testes que a distância que as lentes estavam do sensor interferiam nas medidas.

Os resultados com o sensor TCS mostraram a viabilidade de usá-lo para os testes, porém o esforço matemático necessário para o processamento de dados e aquisição de resultados, devido à utilização de três parâmetros (X, Y e Z) e a necessidade de polinômios para a calibração do sistema, fizeram com que este sensor fosse descartado para esta primeira versão do trabalho.

6. Conclusão

O objetivo do trabalho de se transformar uma medida num espectrofotômetro, por uma pessoa especializada, em um módulo acessível para leigos realizarem as medidas semafóricas em seus próprios óculos de sol, foi atingido.

O sistema ainda encontra-se em bancada, e o *design* final do equipamento para uso público está sendo feito no LIO, para que então, o sistema possa ser inserido dentro do mesmo.

Foi desenvolvido um sistema de iluminação com LEDs SMD para quatro cores: vermelho, verde, azul e amarelo. O sensor utilizado para cada conjunto foi O BPW21R. Uma eletrônica de controle para a iluminação da lente testada individualmente para cada cor foi desenvolvida, bem como a interface para o usuário, em linguagem C. Testes em lentes de óculos de sol foram realizados e comparados com o espectrofotômetro CARY 5000 – VARIAN. Os fatores de correlação para as cores vermelho, verde, azul e amarelo são respectivamente: $r^2=0,9932$; $r^2=0,9971$; $r^2=0,9815$; $r^2=0,9915$ para as lentes esquerdas; e $r^2=0,9824$; $r^2=0,9957$; $r^2=0,9798$; $r^2=0,9918$ para as lentes direitas;

Referências Bibliográficas

ABNT NBR 15111: 2004. Proteção pessoal dos olhos – Óculos de sol e filtros de proteção contra raios solares para uso geral.

CIE. Standard Illuminants for Colorimetry. ISO 10526:1999/CIE S005/E-1998

CIE. Eye sensitivity function $V(\lambda)$ in the scotopic vision regime, 1951

CIE. Eye sensitivity function $V(\lambda)$ in the photopic vision regime, 1978

Barcelos, Robson - Novo Método de mapeamento de espaços de cor através de redes neurais artificiais especializadas. 2011; p. 29 – 34.

Clark, Barry A. J. Coloured Lenses and Car Driving. Acta Ophthalmologica. 1971; p. 673 – 677.

Cole, Barry L. - Should Sunglasses Be Required To Comply With the Sunglasses Standard. 2003; p. 1 – 3.

Dain, Stephen John - Sunglasses and Sunglass Standards. 2003; p. 1 – 14.

Institute of Transportation Engineers - Vehicle Traffic Control Signal Heads. 2005; p. 17 – 20.

Kiyanitza, Ivan – Cromaticidade de Semáforos de Leds. 2007; p. 1 – 7.

Lima, Anderson L. de - Uso de Leds em Semáforos Um Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica. 2008; p. 5 – 8.

Palmer, David A., Mellerio, John, Cutler, Amanda - Traffic Signal Light Detection through Sunglare Filters of Different Q Factors. 1996; 1 – 8.

Apêndice

Resposta do Sensor BPW21R para cada comprimento de onda:

λ (nm)	BPW (u.a.)
380	0,3091
385	0,3362
390	0,3637
395	0,3917
400	0,4197
405	0,4478
410	0,4756
415	0,5031
420	0,53
425	0,5563
430	0,5818
435	0,6065
440	0,6304
445	0,6534
450	0,6756
455	0,6969
460	0,7176
465	0,7376
470	0,757
475	0,7759
480	0,7943
485	0,8124
490	0,8301
495	0,8474
500	0,8644
505	0,8809

510	0,8968
515	0,9121
520	0,9267
530	0,9526
535	0,9636
540	0,9732
545	0,9811
550	0,9871
555	0,9912
560	0,9931
565	0,9929
570	0,9905
575	0,9858
580	0,9789
585	0,9698
590	0,9586
595	0,9453
600	0,9301
605	0,9131
610	0,8943
615	0,874
620	0,8521
625	0,829
630	0,8046
635	0,7791
640	0,7526
645	0,7253

650	0,6971
655	0,6683
660	0,639
665	0,6092
670	0,579
675	0,5487
680	0,5183
685	0,4879
690	0,4577
695	0,4278
700	0,3984
705	0,3696
710	0,3415
715	0,3142
720	0,2879
725	0,2627
730	0,2386
735	0,2158
740	0,1942
745	0,174
750	0,1552
755	0,1377
760	0,1217
765	0,1069
770	0,0935
775	0,0814
780	0,0705

Resposta do Sensor TCS3771 por comprimento de onda:

λ (nm)	Azul(u.a.)	Verde(u.a.)	Vermelho(λ)
380	0.0848	0.0321	0.0858
385	0.1197	0.0356	0.1091
390	0.1546	0.0387	0.133
395	0.1963	0.0417	0.1454
400	0.2274	0.0448	0.1483
405	0.2552	0.0478	0.1483
410	0.3	0.0519	0.1421
415	0.3155	0.056	0.1308
420	0.331	0.0602	0.1171
425	0.3465	0.0643	0.1013
430	0.3703	0.0685	0.0824
435	0.3944	0.0743	0.0627
440	0.4092	0.0805	0.043
445	0.4216	0.0867	0.031
450	0.4423	0.0944	0.0245
455	0.4546	0.1044	0.0191
460	0.4547	0.1143	0.0181
465	0.459	0.1329	0.0171
470	0.4623	0.1589	0.0161
475	0.4534	0.1846	0.0157
480	0.444	0.2166	0.0166
485	0.4293	0.222	0.0175
490	0.4063	0.2237	0.0185
495	0.3848	0.2259	0.0201
500	0.3565	0.2485	0.0246
505	0.312	0.2906	0.0292
510	0.2741	0.3549	0.0337
515	0.2408	0.3822	0.0382
520	0.2058	0.4546	0.054
525	0.1696	0.5112	0.0706
530	0.1303	0.5465	0.0892
535	0.117	0.5634	0.1088
540	0.1076	0.5775	0.1129
545	0.1013	0.5685	0.1106
550	0.0956	0.5491	0.1043
555	0.0797	0.517	0.1004
560	0.0684	0.4864	0.1121
565	0.0615	0.4573	0.1415
570	0.058	0.4303	0.1833
575	0.0545	0.3972	0.2765

580	0.0547	0.3383	0.3984
585	0.0557	0.2806	0.4913
590	0.0572	0.2287	0.5542
595	0.0588	0.188	0.6164
600	0.0604	0.1445	0.6734
605	0.062	0.1103	0.7056
610	0.0636	0.0925	0.7088
615	0.065	0.0752	0.726
620	0.0663	0.0764	0.7569
625	0.0691	0.0777	0.8059
630	0.0804	0.0789	0.8381
635	0.0917	0.079	0.8381
640	0.1031	0.0801	0.8331
645	0.1174	0.0828	0.835
650	0.1328	0.0854	0.8347
655	0.1525	0.0912	0.8317
660	0.1788	0.0997	0.8285
665	0.1992	0.1139	0.8453
670	0.2132	0.134	0.8831
675	0.22	0.1641	0.9188
680	0.2281	0.185	0.9165
685	0.2345	0.2059	0.9049
690	0.2379	0.2397	0.8984
695	0.2457	0.2752	0.9118
700	0.262	0.3102	0.9441
705	0.2697	0.3292	0.9637
710	0.2681	0.3297	0.9619
715	0.2552	0.3241	0.9367
720	0.2408	0.3143	0.9059
725	0.227	0.3098	0.882
730	0.2219	0.3136	0.8815
735	0.2184	0.3387	0.8956
740	0.2222	0.3832	0.9287
745	0.2257	0.4306	0.956
750	0.2273	0.471	0.9658
755	0.219	0.5084	0.9662
760	0.2235	0.5424	0.9647
765	0.2366	0.5568	0.9634
770	0.2581	0.5659	0.9634
775	0.295	0.5694	0.9493
780	0.3551	0.5684	0.9249

Publicações

XXIII CBEB (Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica)

Este projeto foi publicado e apresentado no CBEB 2012, em Porto de Galinhas – PE, de 01 a 05 de Outubro de 2012. O Congresso tem como objetivo proporcionar oportunidades para a promoção de intercâmbio entre pesquisadores e gestores, incentivando a disseminação e incorporação de novas tecnologias e conhecimento em saúde, com destaque para aplicações dos conhecimentos de Engenharia à área de Saúde. Para tanto, conta-se com a característica original da área da Engenharia Biomédica, a interdisciplinaridade, para nortear toda a concepção e desenvolvimento deste evento.

20ºSIICUSP (Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP)

Este projeto foi publicado e apresentado no SIICUSP 2012 na Escola Politécnica, em São Paulo – SP, no dia 24/10/2012. O Simpósio é uma ótima oportunidade para alunos de graduação da USP e oriundos de diferentes Universidades, expor os resultados obtidos de trabalhos de pesquisa dentro de um ambiente próprio. O evento acontece anualmente, recebendo em torno de 6.000 trabalhos inscritos (mesas redondas, apresentações orais ou pôster) divididos em quatro grandes áreas do conhecimento.