

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

GUSTAVO HENRIQUE SOARES

**MÉTODO PARA COMPARAÇÃO DE FONTES LUMINOSAS BASEADO NA
PERCEPÇÃO HUMANA DE CONTRASTE**

CAXIAS DO SUL

2016

GUSTAVO HENRIQUE SOARES

**MÉTODO PARA COMPARAÇÃO DE FONTES LUMINOSAS BASEADO NA
PERCEPÇÃO HUMANA DE CONTRASTE**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa

CAXIAS DO SUL

2016

GUSTAVO HENRIQUE SOARES

**MÉTODO PARA COMPARAÇÃO DE FONTES LUMINOSAS BASEADO NA
PERCEPÇÃO HUMANA DE CONTRASTE**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 08/12/2016

Banca Examinadora

Prof. Dr. Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Anderson Soares dos Santos
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Lucas Fürstenau de Oliveira
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico este trabalho à minha avó
Ignez Peterlini (*in memoriam*) que
sempre torceu pelo meu sucesso e
não pôde estar comigo nesse
momento tão especial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças, paciência e sabedoria para poder realizar as minhas conquistas.

À minha mãe Dilsa Maria Peterlini, por sempre acreditar em mim e não medir esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos e concluir esta graduação.

À minha irmã Carla Elizabel Soares Schiavo, por ser minha parceira amiga, sempre me compreendendo e me dando palavras de incentivo.

Agradeço ao meu orientador, professor Dr. Guilherme Holsbach Costa, pela sua disponibilidade e auxílio para realização deste trabalho, acreditando em meu potencial e me incentivando a sempre obter os melhores resultados.

Ao professor Dr. Lucas Fürstenau de Oliveira, por ter acreditado na nossa proposta, nos auxiliando na pesquisa, amadurecimento e implementação deste trabalho.

Ao professor Me. Anderson Soares dos Santos, por ter aceitado o convite para fazer parte da banca examinadora, emitindo um ponto de vista crítico para o aprimoramento deste trabalho.

À empresa Intral S.A. Indústria de Materiais Elétricos, por ter cedido os seus laboratórios onde foram obtidos os dados das fontes luminosas utilizadas na implementação deste trabalho.

Aos meus amigos que foram capazes de compreender a minha ausência durante esse período, em especial aos colegas Diego Marangon e Jéssica Carissimi, por terem sempre me incentivado e auxiliado nos momentos mais difíceis, me dando força e apoio para que eu pudesse chegar ao fim desta graduação.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Eficiência luminosa é um tema de crescente interesse nas últimas décadas. Os métodos de avaliação de fontes luminosas mais consagrados, consideram, em sua maioria, características quantitativas dessas fontes, como o fluxo luminoso, o índice de reprodução de cores (IRC), a temperatura de cor correlata, e mais atualmente, a relação entre o espectro luminoso da fonte e a curva de sensibilidade das células cones e bastonetes, responsáveis pela percepção da luz pelo olho humano. Entretanto, uma figura de mérito que avalia, por exemplo, a quantidade de excitação de uma determinada célula responsável pela percepção da luz não necessariamente reflete a qualidade de percepção de uma imagem. Neste trabalho é proposta uma nova metodologia de avaliação de fontes luminosas baseada na qualidade da percepção humana. Essa metodologia considera, não apenas o comportamento das células cones, como os métodos mais atuais, mas também das células ganglionares que processam o contraste. Por fim resultados práticos preliminares são apresentados ilustrando a validade do modelo proposto.

Palavras – chave: eficiência luminosa, iluminação, contraste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama simplificado do olho humano.	16
Figura 2 - Espectro eletromagnético mostrando as bandas de comprimento de onda principais e a banda correspondente à luz visível	17
Figura 3 - Curvas de sensibilidade dos Cones.	18
Figura 4 - Exemplo de diferença de contraste variando a iluminação.....	20
Figura 5 - Esquema ilustrativo das conexões que dão origem às vias de processamento paralelo.	22
Figura 6 – Sensibilidade dos cones e bastonetes.	26
Figura 7 - Representação didática da ponderação do espectro de uma fonte luminosa pela sensibilidade de uma célula cone.....	28
Figura 8 - Espectro da lâmpada halógena normalizado.....	30
Figura 9 - Espectro da lâmpada de LED normalizado.....	31
Figura 10 - Curvas de sensibilidade dos cones L, M, S e Y.....	32
Figura 11 - Ponderação para lâmpada halógena.....	32
Figura 12 - Ponderação para lâmpada LED.....	33
Figura 13 - Excitações calculadas para lâmpada halógena.....	33
Figura 14 - Excitações calculadas para lâmpada LED.	34
Figura 15 – Estrutura física.	35
Figura 16 – Diagrama esquemático para cálculo da distância da fonte luminosa em relação ao plano de iluminação.....	36
Figura 17 - Valores calculados para compensação de ângulo de abertura.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição relativa dos três tipos de cones de retina, gamas detectadas e características dos comprimentos de onda de absorção máxima.....	19
Tabela 2 - Valores para o IRC de uma lâmpada fluorescente.	25
Tabela 3 - Eficácia luminosa para as condições fotópica e escotópica de diferentes fontes luminosas.	26
Tabela 4 - Especificações técnicas das lâmpadas utilizadas.....	30
Tabela 5 - Valores das excitações para as lâmpadas halógena e LED.	34
Tabela 6 - Valores calculados segundo a figura de mérito proposta.	34
Tabela 7 - Valores para ajuste de fluxo luminoso.	36
Tabela 8 – Combinação de cores.	37
Tabela 9 - Média de acertos e média de erros para cada lâmpada.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS

LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
L	<i>Large – wavelength</i> (comprimentos de onda longo, zona do vermelho)
M	<i>Medium – wavelength</i> (comprimentos de onda médio, zona do verde)
S	<i>Short – wavelength</i> (comprimentos de onda curto, zona do azul)
P, M, K	Designações para classes de células ganglionares
NBR	Norma Brasileira
TCC	Temperatura de cor correlata
IRC	Índice de reprodução de cores
CIE	Comission Internationale de L'Eclairag

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS.....	13
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO.....	13
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo Geral.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
2 FISILOGIA DO OLHO	15
2.1 O ESPECTRO VISÍVEL E A SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO CONE	17
2.2 PROCESSAMENTO VISUAL DOS CONTRASTES E FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS GANGLIONARES	19
3 AVALIAÇÃO DAS FONTES DE LUZ.....	23
4 MÉTODO PROPOSTO	27
5 RESULTADOS	30
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES LUMINOSAS	30
5.2 CURVAS DE SENSIBILIDADE ESPECTRAL DOS CONES	31
5.3 AVALIAÇÃO DAS FONTES PELO MÉTODO PROPOSTO.....	32
5.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO: UM ESTUDO DE CASO	34
5.4.1 ESTRUTURA DO TESTE.....	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS	40

INTRODUÇÃO

Segundo Schereuder (2008), o ato de iluminar algo, significa tornar as coisas e lugares mais transparentes, visíveis e habitáveis. A luz pode ser sinônimo de segurança, conforto e beleza, enquanto a escuridão traz em si o significado de perigo, medo ou feiura. Todos esses significados estão ligados à grande importância que o sentido da visão tem para o ser humano. Cerca de 80 % das informações que o homem pode retirar do mundo externo são captadas pelo sentido da visão. Para Costa (2006), a iluminação de um determinado ambiente é o que propicia a percepção visual. Portanto, desde os tempos mais remotos o homem vem buscando alternativas para vencer a escuridão, de modo a ampliar seu universo vencendo as limitações impostas pelo tempo, como exemplo promovendo a iluminação no período noturno, e pelo espaço, levando luz para ambientes não iluminados pelo sol (COSTA, 2006; RODRIGUES, 2012).

As lâmpadas elétricas trouxeram maior segurança para os sistemas de iluminação e pouco tempo após o início de sua criação, já eram utilizadas para iluminação artificial, popularizando a eletricidade. As primeiras lâmpadas elétricas desenvolvidas foram as incandescentes, em seguida vieram as de descarga de alta e baixa pressão. Ao longo dos anos essas soluções foram empregadas em iluminação de áreas internas e externas. A concorrência e a constante busca por sistemas mais eficientes levaram os fabricantes a promoverem uma série de avanços tecnológicos nos diversos tipos de fontes luminosas, e até mesmo desenvolverem novas formas de geração de luz.

Nos últimos anos, o emprego de diodos emissores de luz (LED), deixou de ser utilizado somente para sinalização e indicação de funcionamento de sistemas eletrônicos e passou a integrar os sistemas de iluminação mais recentes e sofisticados. Um dos grandes benefícios da utilização em larga escala de dispositivos de estado sólido para a iluminação em geral, é a diminuição do consumo de energia e o apelo ecológico, pois não utilizam metais pesados em sua composição. Um dos pontos fracos dessa nova tecnologia é o alto custo de implantação, fato esse que está diminuindo nos últimos anos, conforme a evolução da tecnologia.

No que tange o quesito de comparação de fontes luminosas, pode-se dizer que muitas vezes ela é dispendiosa. Conforme Costa (2006), os experimentos comparativos são realizados em laboratórios, devendo atender requisitos mínimos de normas específicas, e muitas vezes não levam em consideração um ponto importante, a percepção visual.

A percepção visual pode ser estabelecida como a função psíquica que permite ao organismo, através dos sentidos, receber e elaborar a informação proveniente do seu entorno.

O ser humano reage emocionalmente com estímulos provocados pela luz. O tipo de iluminação pode determinar a forma como sentimos o espaço. Acerca disso, a luz influi as emoções, humores e comportamento dos indivíduos. Toda percepção é o resultado das características inatas do indivíduo e, ao mesmo tempo de um processo de aprendizagem, isto é, as características psicológicas condicionam o processo perceptivo. O ser humano compreende seu entorno de muitas maneiras, dispondo de uma diversidade de sistemas especializados, adaptados para serem sensíveis tanto às mudanças internas quanto às externas. Analisando a percepção, nota-se que é, provavelmente um dos conceitos mais complexos da iluminação (SÁ, 2015).

Do ponto de vista da percepção humana, as avaliações de fontes luminosas geralmente levam em consideração algumas métricas, entre elas o índice de reprodução de cores, a temperatura de cor correlata e a sensibilidade do olho humano às condições médias de iluminação do ambiente em que a respectiva fonte é utilizada (condições de visão fotópica, mesópica ou escotópica). Todos esses conceitos serão abordados no decorrer deste trabalho, mas, como será visto, a relação dessas métricas com a percepção humana é bastante rudimentar.

Neste trabalho é proposta uma metodologia de avaliação para fontes luminosas que considera a percepção humana de contraste. Esse método leva a uma avaliação de fonte de luz do ponto de vista qualitativo, analisando o espectro de luz gerado por elas e comparando-o com as curvas de sensibilidade do olho humano.

No Capítulo 2 será discutido, o funcionamento do olho humano, no que diz respeito às suas principais células e regiões, dando enfoque principal para as células receptoras de luz. Uma análise mais profunda das células cones e ganglionares será abordada, com o intuito de verificar suas estruturas fisiológicas e suas contribuições para a distinção de cores e percepção de contraste. No Capítulo 3, será abordada a avaliação de fontes luminosas realizada por especialistas da área, que leva em conta as características elétricas e fotométricas dessas fontes, comparando essas informações quantitativas com as normas vigentes. No Capítulo 4, os fundamentos do método proposto são apresentados. No Capítulo 5, serão descritas as etapas de aplicação e validação do método proposto, através da demonstração dos resultados obtidos. Por fim no Capítulo 6 os resultados serão discutidos.

1 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

Serão apresentados a seguir a justificativa e os objetivos deste trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Os principais métodos de avaliação de fontes de luz, geralmente levam em consideração as características elétricas e fotométricas dessas fontes, ou seja, são avaliadas predominante por um viés quantitativo. A substituição de uma fonte de luz antiga por uma de melhor tecnologia é um exemplo típico. Nesse caso são levantados alguns dados, como consumo do sistema, fluxo luminoso, tempo de vida mediana, índice de reprodução de cor, temperatura de cor correlata, entre outros. A partir desse ponto de vista é proposto uma fonte equivalente, que apresenta características otimizadas em relação ao modelo anterior, propiciando um melhor custo benefício (RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2010, 2012a; MAGGI, COSTA, *et al.*, 2012).

Por outro lado, pode-se avaliar essas mesmas fontes considerando algumas características não triviais, do ponto de vista qualitativo, como por exemplo, as curvas de sensibilidades dos cones, células essas, responsáveis pela percepção de cor do olho humano. Desse modo, pode-se expandir essa análise levando em conta além de todas as características já citadas, a fonte que melhor apresenta resultados para percepção de determinada métrica, como o contraste. Avaliar o contraste torna-se interessante, pois através dele é possível distinguir melhor determinadas formas e objetos, auxiliando na visão de um modo geral, com isso tem-se uma melhor iluminação em um ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avançar o estado-da-arte no que tange a avaliação de fontes luminosas.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Elaborar um método de avaliação de fontes luminosas, condizente com a qualidade da percepção humana;

- b) Definir a metodologia de avaliação teórica de duas fontes luminosas;
- c) Validar os resultados obtidos, através de um teste prático;

2 FISILOGIA DO OLHO

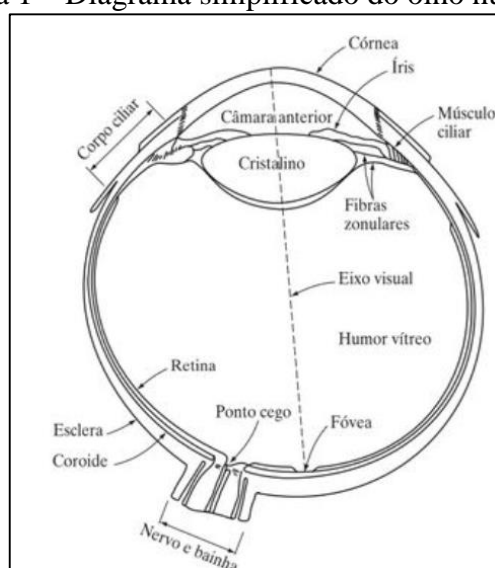
Para que as fontes luminosas sejam corretamente avaliadas faz-se necessária uma breve explanação sobre a estrutura do globo ocular, bem como as principais células fotorreceptoras de luz e as que realizam o contraste na visão. O olho é um importante órgão receptor de informações e a percepção do mundo do ponto de vista do ser humano é em grande parte baseada naquilo que ele enxerga. O processo de visão pode ser envolvido em dois aspectos. O primeiro deles trata das propriedades físicas e estruturais do órgão, as células principais que contribuem diretamente para a formação da imagem e a forma como elas atuam. O segundo tange a propriedade perceptiva, ou seja, a sensação gerada pelo primeiro aspecto no indivíduo (SÁ, 2015).

O globo ocular, como pode ser visto na Figura 1, possui um formato de esfera, com um diâmetro médio de 20 mm, sendo revestido por três membranas principais: a córnea, a coroide e a retina. A córnea é um tecido resistente e transparente, que cobre a superfície externa do órgão e tem como prolongamento a esclera que recobre o restante do órgão. A coroide, situada abaixo da esclera, é responsável pela nutrição do globo através de vasos sanguíneos, que possuem um revestimento substancialmente pigmentado ajudando a reduzir a quantidade de luz indesejável de entrada no olho. Na coroide é onde se situam o corpo ciliar e a íris, que se contrai ou se expande com o objetivo de controlar a quantidade de luz de entrada. A abertura central da íris é chamada pupila, e varia seu diâmetro de 2 a 8 mm, em média, de acordo com a intensidade de luz. Por fim, tem-se a retina, que é a membrana mais interna do olho onde se encontram as células receptoras de luz e ocorre a formação da imagem. Outra região importante para absorção da luz é o cristalino, composto por células fibrosas ligadas ao corpo ciliar. Cerca de 8 % do espectro de luz visível é absorvido por ele, sendo na maior parte a luz com comprimentos de ondas mais curtos (GONZALEZ e WOODS, 2010). O cristalino também absorve comprimentos de onda na faixa do ultravioleta. Pessoas que retiram o cristalino passam a enxergar a luz nessa faixa de comprimentos de onda.

Dentro da retina, estão presentes os cones e os bastonetes, que transformam os fótons absorvidos da luz em impulsos nervosos, se comunicando ao cérebro através do nervo óptico. Após receber esses impulsos, o cérebro os processa interpretando-os como imagens. No ser humano, os cones, assim chamados pelo seu formato cônico, são cerca de 7 milhões em cada olho e estão localizados primeiramente na fóvea, que é a parte central da retina. Existem três tipos de cones, cada um deles com sensibilidade distinta a comprimentos de onda do espectro visível. Assim, sendo, alguns cones são sensíveis a comprimentos de onda na faixa do azul,

alguns a comprimentos na faixa do verde e alguns a comprimentos na faixa do vermelho. Sendo assim, os cones são responsáveis pela distinção das cores, bem como são responsáveis pela distinção de detalhes em uma imagem, por estarem pareados com as células ganglionares (GONZALEZ e WOODS, 2010). A estrutura e o funcionamento dos cones serão abordados em detalhes na Seção 2.1. Já os bastonetes, são cerca de 120 milhões, com comprimento de 60 μm e espessura de 2 μm , aproximadamente. Diferente dos cones, que se dividem em três tipos, todos os bastonetes apresentam uma mesma curva de sensibilidade espectral, por esse motivo não são capazes de diferenciar as cores (LOPES, 2013).

Figura 1 – Diagrama simplificado do olho humano.



Fonte: (GONZALEZ e WOODS, 2010).

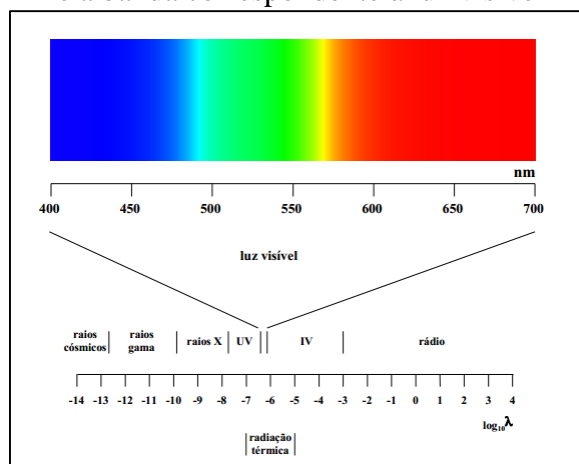
A fóvea se diferencia do restante da retina por três razões: (i) ela possui apenas os cones (não possui bastonetes), o que confere uma alta capacidade de identificação de cores; (ii) nesta região, estão concentradas as células ganglionares, formadoras do nervo óptico, que se ligam a uma única célula fotossensível (no caso, um cone), o que confere uma alta resolução para a imagem que será enviada ao córtex visual permitindo o reconhecimento de objetos; (iii) há um deslocamento lateral das células não fotossensíveis da retina, não havendo formação de sombras sobre os cones, aumentando sua sensibilidade e conferindo o formato abaulado na retina nessa região (HELENE e HELENE, 2011). As células ganglionares da retina também são responsáveis por separar as informações de contraste de luminâncias, das informações de contraste de cores (SOUZA, LACERDA, *et al.*, 2013).

2.1 O ESPECTRO VISÍVEL E A SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO CONE

O sentido da visão é um dos principais, senão o principal, meio de contato do ser humano com o universo. A partir dele ocorreu o nascimento de várias ciências. O conceito de luz iniciou a partir da observação da luz visível, seguido por conceitos de matéria, energia e muitos outros. Necessitando de uma grande região anatômica cerebral humana para processamento intelectual ou para decodificação, a função visual é iniciada pelo estímulo do órgão visual por ondas eletromagnéticas entre 380 e 760 nm de comprimento de onda, conceituando o chamado espectro visível, ainda que, na prática, o ser humano perceba substancialmente melhor comprimentos de onda de até 700nm (KRONBAUER, SCHOR e CARVALHO, 2008).

As cores podem ser divididas em *espectrais* e *não espectrais*. Cores espectrais são aquelas que possuem correspondência direta com um único comprimento de onda. Cores não espectrais são aquelas que são função da combinação de mais de um comprimento de onda. Por exemplo, na Figura 2, ao observar-se o espectro, é possível verificar que nele não se encontram todas as cores visíveis existentes. Como efeito, existe uma gama de cores que está entre o azul e o vermelho e que inclui o magenta, que está ausente do espectro, pois tal equivaleria a ligar comprimentos de onda menores (azuis) aos maiores (vermelhos) sem passar pelos comprimentos de onda intermediários (verdes e amarelos). Também a cor branca não é uma cor do espectro visível pois não corresponde a nenhum comprimento de onda específico, resultando da detecção simultânea de radiação visível em muitos comprimentos de onda, com uma intensidade uniforme. Esses exemplos mostram que existem mais cores visíveis do que cores espectrais (LOPES, 2013).

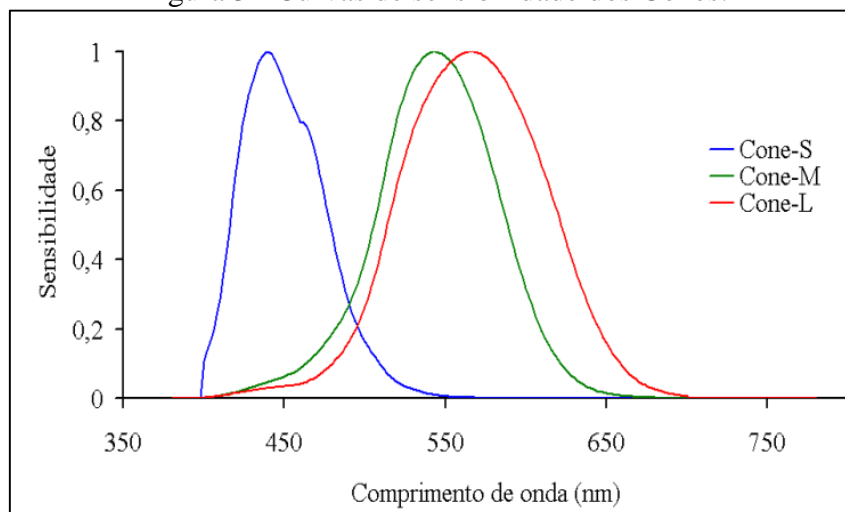
Figura 2 - Espectro eletromagnético mostrando as bandas de comprimento de onda principais e a banda correspondente à luz visível



Fonte: (LOPES, 2013).

Os bastonetes são sensíveis a luz em uma determinada faixa específica de onda, mas não são capazes de diferenciar as cores. As células responsáveis pela percepção das cores são os cones. Existem cones sensíveis a luz na zona do vermelho (cones do tipo L – do inglês, *Large*), na zona do verde (cones do tipo M – do inglês, *Medium*) e na zona do azul (cones do tipo S – do inglês *Short*). Os comprimentos de onda a que cada cone é sensível implicam em alguma redundância (sobreposição das curvas de sensibilidade), como pode ser visto na Figura 3. No gráfico, é possível verificar que os fotorreceptores são capazes de responder à luz em uma faixa extensa de comprimentos de onda, no entanto, a probabilidade de que os diferentes pigmentos contidos em cada um dos tipos de cone reajam à luz varia bastante ao longo do espectro. Assim, torna-se evidente que os cones não têm respostas diferentes para cada tipo de comprimento de onda, não se podendo a eles atribuir qualquer tipo de percepção de cor, por isso a designação dos cones como sendo L, M e S acaba sendo um artifício. Comparando-se objetivamente os três cones, eles estão organizados na ordem Longo, Médio e Curto (GUALTIERI, 2004).

Figura 3 - Curvas de sensibilidade dos Cones.



Fonte: (GUALTIERI, 2004).

A Tabela 1 apresenta as gamas de comprimentos de onda a que os três tipos de cone são sensíveis, o comprimento de onda em que cada um deles apresenta maior sensibilidade ($\lambda_{m\acute{a}x}$), a distribuição relativa média e a fração da luz incidente que absorve. Verifica-se que o número de cones L existentes na retina é quase o dobro do número de cones do tipo M. O número de cones do tipo S é muito inferior ao número de cones de qualquer outros dois tipos. Ainda pode-se observar que a maior sensibilidade do olho humano deverá verificar-se na gama de comprimentos de onda detectada pelos cones L e M, a zona intermediária entre o vermelho e o verde. Estudos da área, como exemplo, Stockman e Sharpe (2000) concluem que a gama de

sensibilidade máxima combinada dos três tipos de cones está centrada em torno do comprimento de onda de 550 nm, que corresponde à cor amarela.

Tabela 1 - Distribuição relativa dos três tipos de cones de retina, gamas detectadas e características dos comprimentos de onda de absorção máxima.

Tipo de Cone	Cor Principal	Distribuição relativa (%)	Gama detectada (nm)	λ da maior sensibilidade (nm)	Fração de luz absorvida a $\lambda_{\text{máx}}$ (%)
S	azul	4	350-550	440	2
M	verde	32	400-660	540	20
L	vermelho	64	400-700	580	19

Fonte: (LOPES, 2013).

De modo inverso, é possível concluir que é na gama de comprimentos de onda mais baixos (zona do azul) que existe a menor sensibilidade à cor por parte de todos os tipos de cones (LOPES, 2013).

A informação cromática é recebida pela retina a partir dos cones, e o processamento deste sinal tem início nos estágios neurais subsequentes. Esse processamento depende da relação entre as atividades de excitação e inibição neural, que é a base para a codificação espacial cromática no sistema visual. Estes mecanismos dão origem a respostas neurais diferenciadas para diferentes regiões do espaço ou para diferentes faixas do espectro visível (GUALTIERI, 2004).

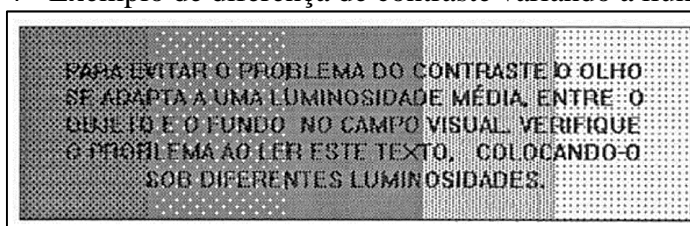
2.2 PROCESSAMENTO VISUAL DOS CONTRASTES E FUNCIONAMENTO DAS CÉLULAS GANGLIONARES

Do ponto de vista fisiológico, as principais características do olho humano durante o processo de visão, estão relacionadas à acomodação, adaptação, campo de visão, acuidade, persistência visual e visão de cores. (COSTA, 2006) A acomodação é a mudança da distância focal através da troca de forma do cristalino. A adaptação está ligada principalmente com a abertura da pupila, que se altera conforme os diferentes níveis de iluminação e também pela mudança de sensibilidade das células à luz. O campo de visão está relacionado com a visão do olho esquerdo, do olho direito e com a região espacial binocular. Na horizontal, o campo de visão binocular é de aproximadamente 120°, enquanto na vertical, considerando um plano paralelo à superfície e na altura dos olhos, 60° para cima e 70° para baixo. A acuidade visual relaciona-se com a visão dos detalhes. No sentido qualitativo, é a capacidade de ver distintamente detalhes finos (que têm uma separação angular muito pequena). A persistência visual é função do processo sensibilizador do olho ser de natureza química e, portanto, manter

durante algum tempo a imagem da retina, estando também ligada com o tempo de exposição do objeto e com sua luminosidade. Por fim, a visão de cores é realizada através dos cones e da camada de células ganglionares.

Em conjunto à adaptação e à acuidade visual, encontra-se o contraste, que é função da relação entre as luminosidades do objeto e do fundo. O maior contraste, por exemplo, existe entre fundo branco e letras pretas, ao passo que um baixo contraste existe entre letras verdes e fundo azul. Isto se deve ao fato de que a visão se adapta a um valor de luminosidade (luminância) médio. Um exemplo de leitura de um texto que permite de forma imediata verificar a dificuldade de leitura na medida em que varia a luminosidade do fundo, ou seja, quando há uma variação nos contrastes, pode ser visto na Figura 4. Desta forma é imprescindível que se aumente a iluminação quando os contrastes forem baixos, sob pena que haja necessidade de aumentar o tempo de visualização que, neste caso, poderá não introduzir grandes benefícios na leitura.

Figura 4 - Exemplo de diferença de contraste variando a iluminação.



Fonte: (COSTA, 2006).

Dentro da faixa de comprimento de ondas do espectro visível, as radiações eletromagnéticas oriundas do ambiente externo, entram em contato com os fotorreceptores na retina, sendo convertidas em sinais eletroquímicos (LUO, 2000). Esses sinais são convertidos pelas redes neuronais, levando à geração da percepção visual consciente. Nos fotorreceptores, a codificação da informação luminosa ocorre através da transdução da quantidade de fótons absorvidos pelos fotorreceptores, em amplitudes de alterações graduadas do potencial de membrana da célula fotorreceptora (LAMB e JUNIOR, 2006). A absorção dos fótons de luz muda a forma de uma molécula chamada retinal (um derivado da Vitamina A). Essa mudança produz alterações químicas na célula fotorreceptora, o que provoca as mudanças elétricas (SOUZA, LACERDA, *et al.*, 2013).

Na etapa seguinte do processamento visual, a sinapse entre fotorreceptores e células bipolares inicia uma transformação da informação luminosa. A sinapse com as células ganglionares é ativada na região interna da retina. As células ganglionares podem ser divididas em três grandes classes neuronais: as células P (parvocelular), que correspondem

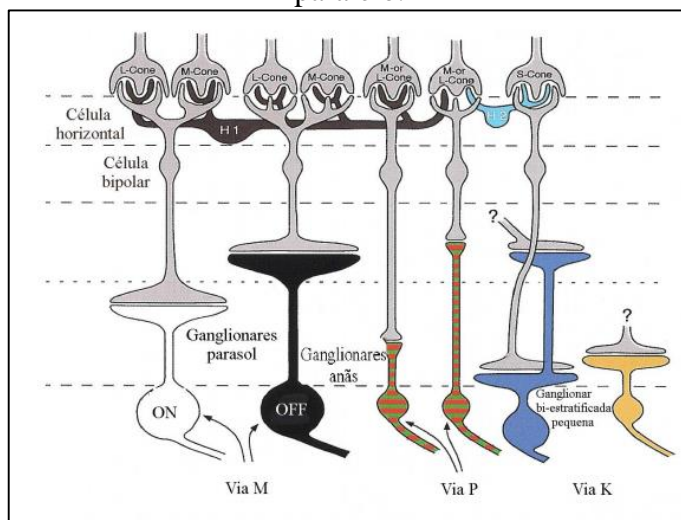
aproximadamente a 80 % das células ganglionares da retina; as células M (magnocelular), que correspondem aproximadamente a 10 % e as células K (koniocelular), que correspondem a aproximadamente 10 % (MASLAND, 2001; DACEY e PACKER, 2003).

Na camada de células ganglionares, além da continuação da codificação do contraste espacial e temporal, inicia-se a codificação das três dimensões de cores. As células M e P podem receber informação somada dos cones L e M tanto na periferia quanto no centro de seu campo receptivo. Assim, a comparação dessas informações indica a diferença de intensidades luminosas entre duas áreas vizinhas, representando o substrato inicial da percepção de contrastes de luminância ou canal de otonância preta e branca. As células P também podem receber informações exclusivas vindas de cones L ou M no centro e periferia dos seus campos receptivos. Esse tipo de campo receptivo compara os sinais de longos e médios comprimentos de ondas e representa o canal de otonância verde – vermelha. Uma subclasse específica de célula K, recebe informações vindas de cones S de natureza excitatória e informações oriundas dos cones L e M de natureza inibitória. Essas células comparam os sinais de comprimentos de ondas curtos com os sinais somados de comprimentos de ondas médios e longos. Esse processamento representa o início da percepção de contraste de cor azul – amarelo (GUALTIERI, 2004; SOUZA, LACERDA, *et al.*, 2013).

Dessa forma ocorre o processamento das informações que partem da retina em direção ao sistema nervoso central, sendo organizadas em vias de processamento paralelo formadas pelos axônios dos diferentes tipos de células ganglionares que formam o nervo óptico, como pode ser visto na Figura 5.

O efeito das cores atua psicologicamente nos indivíduos quanto ao tamanho das superfícies, visto que os objetos verdes e azuis parecem maiores que os vermelhos e amarelos. Superfícies verdes e azuis parecem mais afastadas, ao passo que vermelhas e amarelas parecem mais próximas, por uma questão do foco no cristalino. Vermelho, laranja e amarelo são consideradas cores quentes, pois desenvolvem dinamismo, vitalidade, excitação e movimento; já o verde, o azul e o violeta são cores frias, dando uma sensação de frescor, descanso.

Figura 5 - Esquema ilustrativo das conexões que dão origem às vias de processamento paralelo.



Fonte: (LEE, 2004; GUALTIERI, 2004).

Os objetos ficam mais reduzidos e distanciados com cores frias de radiação curta, ao passo que as impressões de relevo e de proximidade são acentuadas com as radiações longas. Por exemplo, se dois objetos iguais, porém um vermelho e outro azul, forem dispostos a distância de seis metros de um observador, o vermelho, parecerá mais próximo em cerca de trinta centímetros do que o objeto azul (COSTA, 2006).

Estudos recentes, que não estão contemplados no escopo deste trabalho, mostram que as células ganglionares em seres humanos, além serem as principais responsáveis pelo controle do ciclo claro-escuro (o que faz com que estejam envolvidas até o transtorno bipolar), podem estar relacionadas ao aumento do estado de alerta, ajuste da temperatura corporal e frequência cardíaca, aumento do desempenho cognitivo e psicomotor e ativação de estruturas cerebrais envolvidas na regulação da memória e do humor (GRONFIER, 2013).

3 AVALIAÇÃO DAS FONTES DE LUZ

Por vezes, a avaliação de uma fonte de luz ou de um projeto de iluminação restringe-se tão somente às normas vigentes, sem se preocupar com outros fatores importantes, como as cores do ambiente, os efeitos psicológicos e a necessidade ou não de uma reprodução de cores adequada (COSTA, 2006). A percepção do indivíduo sobre o ambiente é o ponto fundamental na concepção de um projeto de iluminação ou de uma avaliação de uma determinada fonte de luz, sendo que qualquer sistema é projetado para atender a requisitos estabelecidos em normas que visam a adequação da iluminação artificial à tarefa a ser desempenhada e ao ambiente. As normas vigentes, como por exemplo, a NBR: 8995-1, que trata da iluminação de interiores, fornece uma base importante, mas restringe-se apenas aos níveis de iluminação, ou seja, ao aspecto puramente quantitativo. Entretanto pode ser de suma importância que sejam examinados os aspectos qualitativos como o contraste entre a luminosidade do objeto e do fundo, o tamanho do objeto e seus componentes, a forma e a textura do objeto, o tempo de observação, etc.

A forma de avaliação mais habitual das fontes de luz, leva em consideração os conceitos de radiometria, que é a ciência e tecnologia de medição de energia eletromagnética radiante, envolvendo a medição da energia radiante total emitida pela fonte luminosa considerando-se o espectro óptico inteiro (OLIVEIRA, 2006). A fotometria, é o ramo da radiometria que estabelece critérios objetivos para a medição de luz. Com base nela, atualmente, os trabalhos encontrados na literatura avaliam basicamente: (i) temperatura de cor correlata (TCC); (ii) índice de reprodução de cores (IRC); (iii) eficiência luminosa (BAO, YING e PENG, 2008; HEALTH PHYSICS SOCIETY, 2005; JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION, 2014; MAGGI, COSTA, *et al.*, 2012; RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2010, 2012a; SAE INTERNACIONAL, 2011; TAPPI, 2007).

A temperatura de cor correlata é definida como a temperatura de um radiador perfeito (corpo negro) que apresenta cromaticidade mais próxima do radiador testado no diagrama de cromaticidade da CIE 1960 (coordenadas de cromaticidades u e v). De acordo com a publicação nº 17.4 da CIE, a temperatura de cor correlata é a temperatura do radiador de Planck que apresenta cor mais próxima de um dado estímulo com a mesma luminosidade e sob condições de observações específicas, tendo como unidade de medida padrão o Kelvin (K). Essa figura de mérito compara o espectro da fonte luminosa com o espectro emitido por um corpo negro ideal, estabelecendo uma correlação entre tons de branco e uma entidade física (OLIVEIRA, 2006; RODRIGUES, *et al.*, 2012). Sendo assim, como pode ser observado, a temperatura de cor

correlata, comumente usada como métrica para avaliação de fontes luminosas, não tem relação direta com a percepção humana.

O índice de reprodução de cores mede o desvio entre a cor que um objeto apresenta quando iluminado por uma fonte de luz denominada fonte teste e a cor que o objeto apresenta quando iluminado por um iluminante de referência de mesma temperatura de cor correlata da fonte de teste. Em situações práticas, sendo geralmente considerado o sol como iluminante de referência, o IRC vem a ser uma medida da capacidade de uma fonte reproduzir cores em comparação à luz do sol (COSTA, *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 2006). Esse índice é obtido mediante o emprego do relatório técnico CIE 13.2 que se aplica às lâmpadas incandescentes, fluorescentes e de descarga de alta intensidade, exceto para as monocromáticas, cujo índice é zero. Atualmente esse índice também é aplicado em fontes de LED. Um número de cores de referência é comparado sob a luz da amostra e do iluminante de referência, sendo calculados seus desvios relativos. Quanto menor o desvio, mais próximo de 100 estará a amostra em relação ao iluminante de referência (COSTA, 2006).

Note-se que o método de avaliação do IRC, proposto pela CIE, apresenta importantes restrições. O IRC representa o valor médio de reprodução de um conjunto de cores de referência, mas nada garante que essa média seja um descritor adequado para o conjunto (COSTA, 2006). Como exemplo tem-se a Tabela 2, que trata de uma lâmpada fluorescente, usada para fins de comparação do IRC de diferentes cores de referência.

Depreende-se dela que existem cores para as quais o índice de reprodução chega a atingir um valor de 86 e outras para as quais o índice chega apenas a 32. Além desta questão tem-se o fato que a norma CIE não leva em consideração a capacidade de adaptação cromática do sistema visual humano, bem como a correção que é realizada pelo cérebro em função de experiências passadas.

Ainda, a fonte incandescente torna o olho menos sensível ao vermelho enquanto a luz do dia torna o olho menos sensível ao azul. Esse comportamento faz com que se tenha a impressão de uma boa distinção das cores para objetos conhecidos, quando iluminados naturalmente ou artificialmente, com fontes luminosas diferentes (como é o caso do sol e da iluminação incandescente), visto que em geral, o observador encontra os objetos iluminados por uma única fonte (COSTA, 2006).

Tabela 2 - Valores para o IRC de uma lâmpada fluorescente.

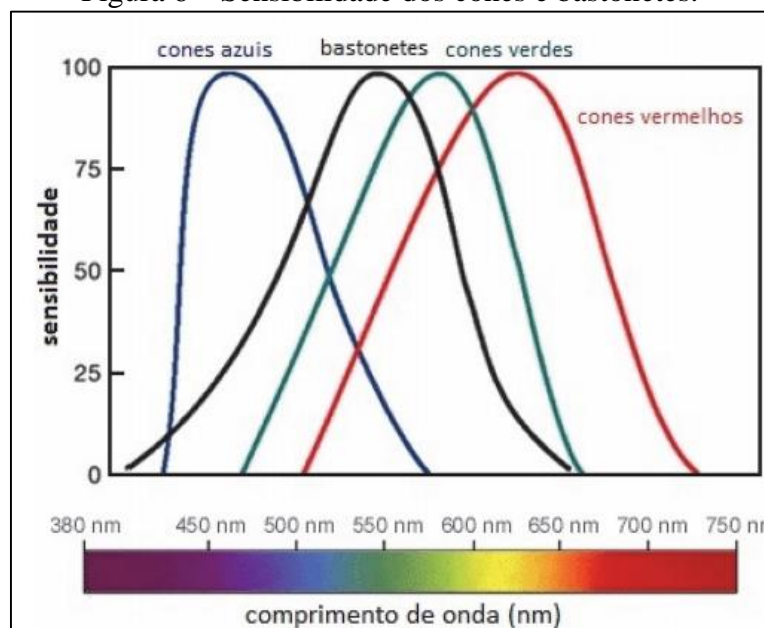
Cor	Tonalidade	IRC	%
R1	Vermelho cinza claro	1	53
R2	Amarelo cinza escuro	2	73
R3	Amarelo esverdeado forte	3	86
R4	Verde amarelado médio	4	56
R5	Verde azulado claro	5	46
R6	Azul claro	6	62
R7	Violeta claro	7	74
R8	Púrpura avermelhada clara	8	32
Valor Médio		60	

Fonte: Adaptado de (COSTA, 2006).

A eficiência luminosa é ainda avaliada do ponto de vista do consumo energético, que foge ao escopo deste trabalho, e do fluxo luminoso e seu efeito sobre a percepção humana. Quando o olho é exposto a altos níveis de luminância (acima de 3 cd/m² aproximadamente), a pupila dilata-se pouco e ocorre a focalização da imagem na fóvea, em que estão agrupados os cones. Nessas condições, tem-se a chamada *visão fotópica*, em que as cores e os detalhes são diferenciados com maior clareza. A exposição a baixos níveis de luminância (abaixo de 0,01 cd/m²) faz a pupila dilatar-se mais que na situação anterior, e a imagem é projetada numa área maior da retina, não havendo concentração em um ponto específico, portanto sensibilizando mais bastonetes, tendo-se a chamada *visão escotópica*. Na faixa intermediária entre as condições fotópica e escotópica, tem-se a chamada *visão mesópica*, que compreende qualquer situação intermediária entre ambos os extremos (RODRIGUES, ALMEIDA, *et al.*, 2010; MAGGI, COSTA, *et al.*, 2012).

Observa-se que a retina apresenta sensibilidade variável de acordo com o nível de iluminamento, devido a existência de diferentes tipos de células receptoras e também à mudança na sensibilidade causada pelos bastonetes (sob baixos níveis de iluminação os bastonetes vão ficando mais sensíveis; fenômeno que demora cerca de 20 minutos para se completar). Por outro lado, quantidades iguais de fluxo luminoso monocromático radiante com diferentes comprimentos de onda, despertam sensações visuais diferentes, concluindo-se que a sensibilidade da retina varia também de acordo com o comprimento de onda da radiação percebida. As curvas de sensibilidade espectral dos cones e bastonetes, das quais resulta a sensibilidade nas condições fotópica e escotópica são ilustradas na Figura 6 normalizadas pelos seus respectivos picos de sensibilidade.

Figura 6 – Sensibilidade dos cones e bastonetes.



Fonte: (BAGNATO e PRATAVIEIRA, 2006)

Baseada na resposta fotópica do olho humano tem-se a definição atualmente usada de fluxo luminoso, sendo adequada em muitos casos como em aplicações de interiores, uma vez que nessas situações são desempenhadas atividades sob níveis médios de luminância relativamente altos. Por outro lado, em aplicações de iluminação pública, conforme Rodrigues et al. (2012) “os níveis de luminância são significativamente baixos, a resposta mesópica baixa, ou mesmo a escotópica, podem representar melhor a realidade da sensibilização do olho humano.” A Tabela 3 mostra a comparação de eficácia luminosa quanto ao fluxo definido nas condições fotópica e escotópica para diversos tipos de fontes de luz.

Tabela 3 - Eficácia luminosa para as condições fotópica e escotópica de diferentes fontes luminosas.

Fonte de Luz	Condição Fotópica	Condição Escotópica
Incandescente	14,7 lm/W	20,3 lm/W
Fluorescente (3500K)	84,9 lm/W	115,9 lm/W
Sódio em Alta Pressão	126,9 lm/W	80,5 lm/W
Sódio em Baixa Pressão	180,0 lm/W	40,8 lm/W
Mercúrio em Alta Pressão	52,3 lm/W	66,8 lm/W
Multi – Vapores Metálicos	107,0 lm/W	181,0 lm/W

Fonte: (RODRIGUES, ALMEIDA, et al., 2010).

4 MÉTODO PROPOSTO

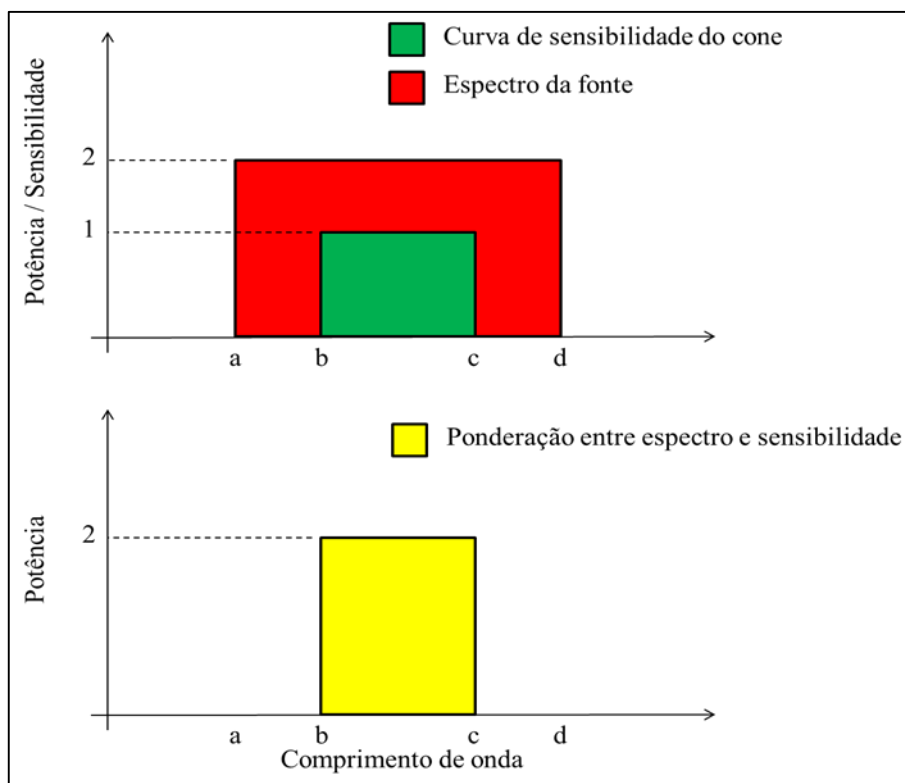
Considerando-se que a capacidade de discriminação de formas, detalhes e cores advém da percepção de contraste, o método proposto parte do pressuposto que a melhor fonte luminosa, do ponto de vista qualitativo, é aquela que propicia o maior contraste, levando em conta a percepção humana. Como discutido na Seção 2.2, a percepção de contraste é de responsabilidade das células ganglionares. Por exemplo, a percepção de contraste entre as cores verde e vermelho se dá quando células ganglionares, excitadas por cones M e L, são ativadas. Sendo assim, é razoável assumir que altos contrastes entre verde e vermelho são gerados quando essas células ganglionares são igualmente excitadas/inibidas pelos cones M e L. O mesmo pode ser assumido para as células ganglionares tipo K, responsáveis pelo contraste de cor azul-amarelo. Em síntese, quanto mais equânime a excitação produzida entre o verde e o vermelho e entre o azul e amarelo, mais contraste uma fonte produz e melhor é a sua qualidade do ponto de vista perceptual humano.

Os conjuntos de excitações verde-vermelho e azul-amarelo resultam das respostas dos respectivos cones à fonte de iluminação, em que o amarelo (Y, do inglês, *yellow*) é modelado neste trabalho como a soma das respostas dos cones M e L. A resposta de cada cone pode ser avaliada pela ponderação (multiplicação) da respectiva curva de sensibilidade pelo espectro luminoso da fonte de avaliação, o que é tradicionalmente feito em estudos sobre eficiência luminosa (COSTA, COSTA, *et al.*, 2009). Para fins didáticos, a Figura 7, ilustra a sobreposição de uma curva de sensibilidade de uma célula cone fictícia e de um espectro de uma fonte também fictícia, bem como ilustra o resultado da ponderação dessas curvas.

Como discutido no Capítulo 2, as diferentes células cone possuem diferentes sensibilidades e se apresentam em diferentes quantidades no olho humano, bem como as ganglionares. Além disso, suas sensibilidades e quantidades variam de indivíduo para indivíduo e, possivelmente, diferenças entre respostas físico-químicas dessas células podem sofrer compensações em nível de córtex visual. Considerando-se isso, propõe-se que cada curva de sensibilidade seja normalizada por sua área, de forma que a integração de uma curva de sensibilidade traduza a excitação total de uma célula (normalizada para 1, ou 100%). A mesma normalização (área unitária) é proposta à curva espectral da fonte sob avaliação. Dessa forma, preservam-se as características do espectro, mas diferentes fontes serão sempre comparadas (qualitativamente) considerando-se todas com o mesmo fluxo luminoso. Diferenças de fluxo luminoso entre duas lâmpadas podem, *a posteriori*, ser compensadas durante o projeto

luminotécnico pelo aumento do número de fontes (lâmpadas) ou pela redução da distância entre a fonte e o campo a ser iluminado.

Figura 7 - Representação didática da ponderação do espectro de uma fonte luminosa pela sensibilidade de uma célula cone.



Fonte: O Autor (2016).

Para compor uma figura de mérito para avaliação das fontes, então, propõe-se que as curvas resultantes das ponderações do espectro da fonte por cada uma das curvas de sensibilidade sejam integradas, resultando no que aqui é chamado, respectivamente, de *excitação vermelha* (e_L), *excitação verde* (e_M), *excitação azul* (e_S) e *excitação amarelo* (e_{L+M}). Matematicamente, cada excitação (e_i) pode ser expressa como:

$$e_i = \int_{380}^{780} P(\lambda) f_i(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

em que λ é o comprimento de onda (em [nm]), $i = \{L, M, S, M + L\}$, $f_i(\lambda)$ é a i -ésima curva de sensibilidade do olho humano e $P(\lambda)$ é o espectro luminoso da lâmpada. Cabe lembrar que as funções $f_i(\lambda)$ e $P(\lambda)$ devem então possuir área unitária e que o espectro de comprimentos de onda de 380 a 780nm compreende o espectro visível. Por fim, a figura de mérito proposta

compreende em minimizar a diferença entre as excitações verde-vermelho e as excitações azul-amarelo, de forma a proporcionar o maior contraste:

$$J = \left| \frac{e_L - e_M}{e_L + e_M} \right| + \left| \frac{e_S - e_{L+M}}{e_S + e_{L+M}} \right|. \quad (2)$$

Os denominadores, em (2), implicam na avaliação da diferença percentual entre cada um dos pares de excitações.

A partir de (2) é possível ainda concluir que, se o espectro de uma fonte possuir uma energia na região de excitação do cone L, para que a função J seja minimizada é necessário que haja energia na região de excitação do cone M. Havendo, a excitação e_{L+M} será não nula, o que irá requerer que haja também energia na faixa espectral de excitação do cone S para a minimização de J . Em resumo, a figura de mérito proposta implica na existência de energia em todas as bandas espectrais.

Por fim, a fonte que, quando avaliada por meio de (2), fornecer o menor valor de J compreenderá na fonte que leva ao melhor contraste, e portanto, possui características espectrais que levam à melhor qualidade perceptual.

5 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a avaliação de duas fontes luminosas disponíveis no mercado, com o objetivo de validar o método proposto. Para tanto, na Seção 5.1 são apresentadas as principais características de cada uma das fontes, de acordo com os dados fornecidos pelo seu fabricante. Na Seção 5.2, são avaliadas as curvas de sensibilidade das células cones. A avaliação da figura de mérito proposta é descrita na Seção 5.3. Por fim, na Seção 5.4, é proposta a validação do método.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES LUMINOSAS

Foram avaliadas duas fontes de iluminação disponíveis no mercado: uma lâmpada halógena Osram modelo PAR 30 ALU SUPERSTAR e uma lâmpada LED Osram modelo LED SUPERSTAR PAR 30. Essas lâmpadas foram selecionadas em função de serem consideradas equivalentes. A equivalência entre ambas não influencia no método de comparação proposto neste trabalho, mas é importante para validação do método, como será discutido na Seção 5.4. As principais características dessas lâmpadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificações técnicas das lâmpadas utilizadas.

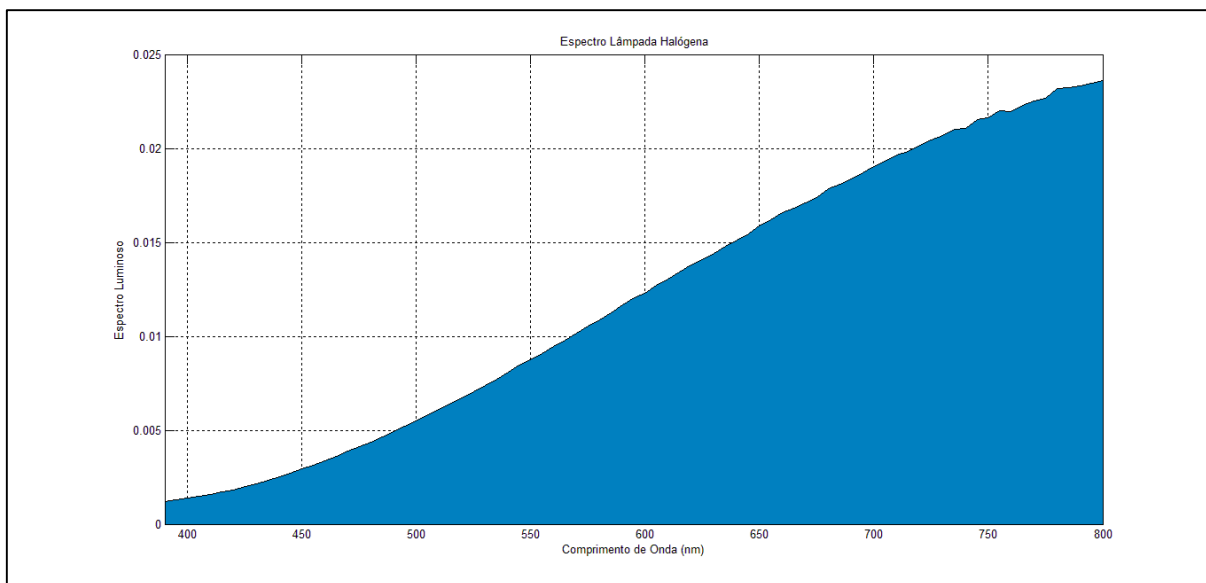
Tipo	Modelo	Consumo	Equivalência halógena	Tensão de Entrada	Fluxo Luminoso	Ângulo de Abertura	IRC	TCC
Halógena	PAR 30 ALU SUPERSTAR	75 W	#	220 - 250 V	650 lm	30 °	100	2900 K
LED	LED SUPERSTAR PAR 30	13 W	75 W	100 -240 V	850 lm	25°	> 80	3000 K

Fonte: Adaptado de (Ficha Técnica do Produto OSRAM. LED SUPERSTAR PAR 30, 2015) e (Ficha Técnica do Produto OSRAM. HALOPAR PAR 30, 2016).

O espectro luminoso de cada uma das lâmpadas foi obtido através de ensaio realizado em uma esfera integradora, para comprimentos de onda entre 380 nm e 800 nm.

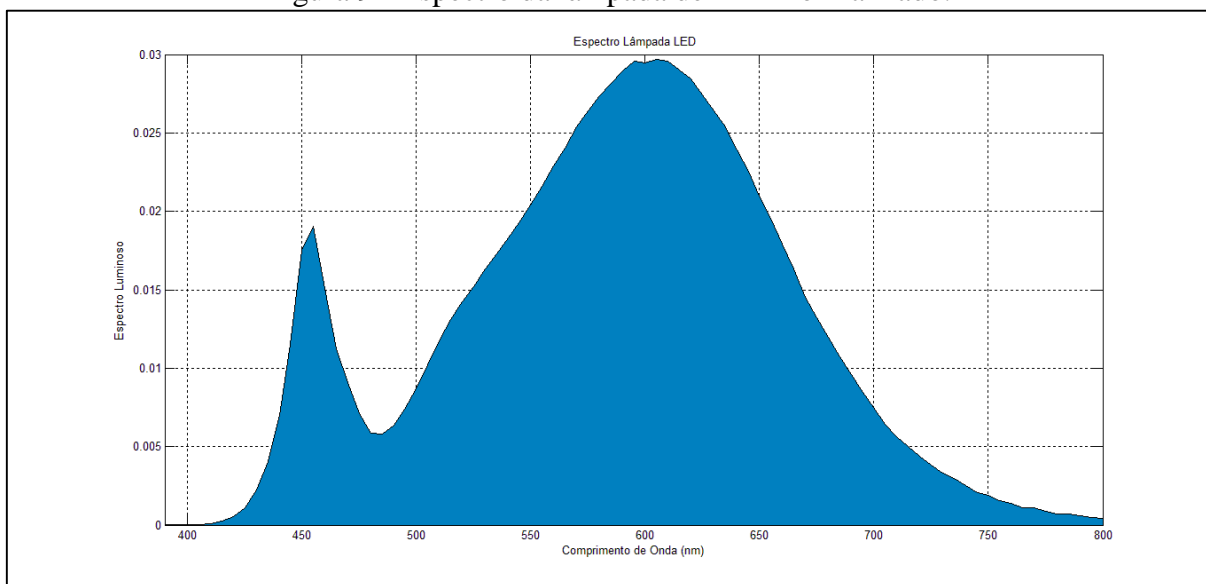
Os espectros obtidos foram normalizados de forma a resultarem em uma área unitária, conforme proposto no Capítulo 4. O espectro da lâmpada halógena e da lâmpada LED normalizados, são mostrados na Figura 8 e Figura 9 respectivamente.

Figura 8 - Espectro da lâmpada halógena normalizado.



Fonte: O Autor (2016)

Figura 9 - Espectro da lâmpada de LED normalizado.



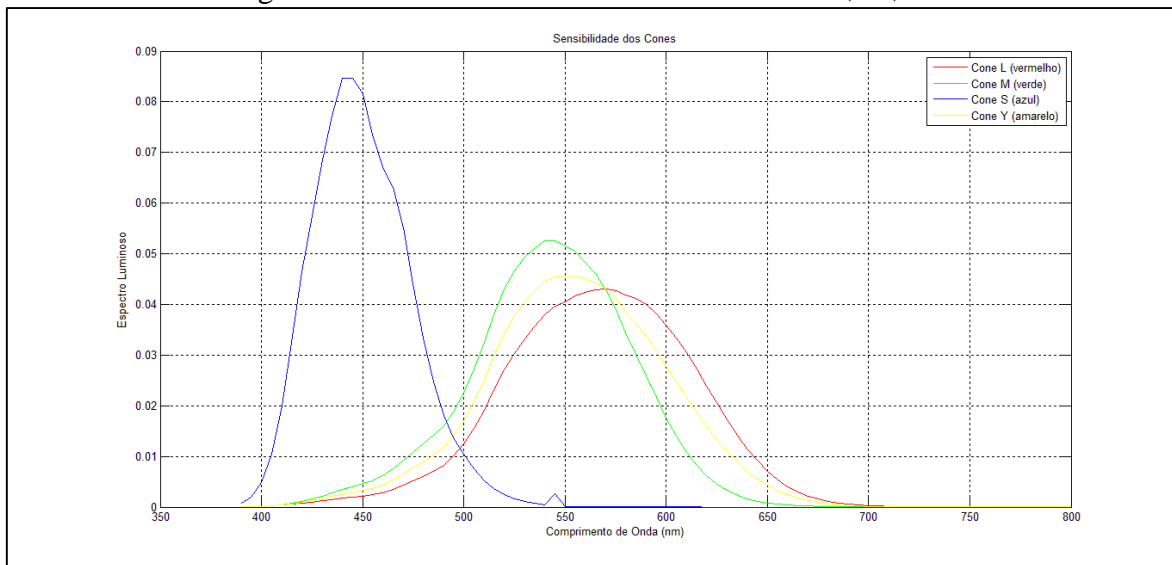
Fonte: O Autor (2016)

5.2 CURVAS DE SENSIBILIDADE ESPECTRAL DOS CONES

As curvas de sensibilidade dos cones consideradas neste trabalho são oriundas do estudo realizado por Stockman e Sharpe (2000). De acordo com o método proposto no Capítulo 4, a curva de sensibilidade para excitação na faixa do amarelo (e_{L+M}) é modelada através da soma das funções espectrais dos cones L e M. Na Figura 10 são mostradas as curvas de sensibilidade

dos cones L, M e S e o modelo da sensibilidade para o amarelo, neste trabalho denominado por Y. Todas as curvas de sensibilidade foram normalizadas de forma a possuírem área unitária.

Figura 10 - Curvas de sensibilidade dos cones L, M, S e Y.

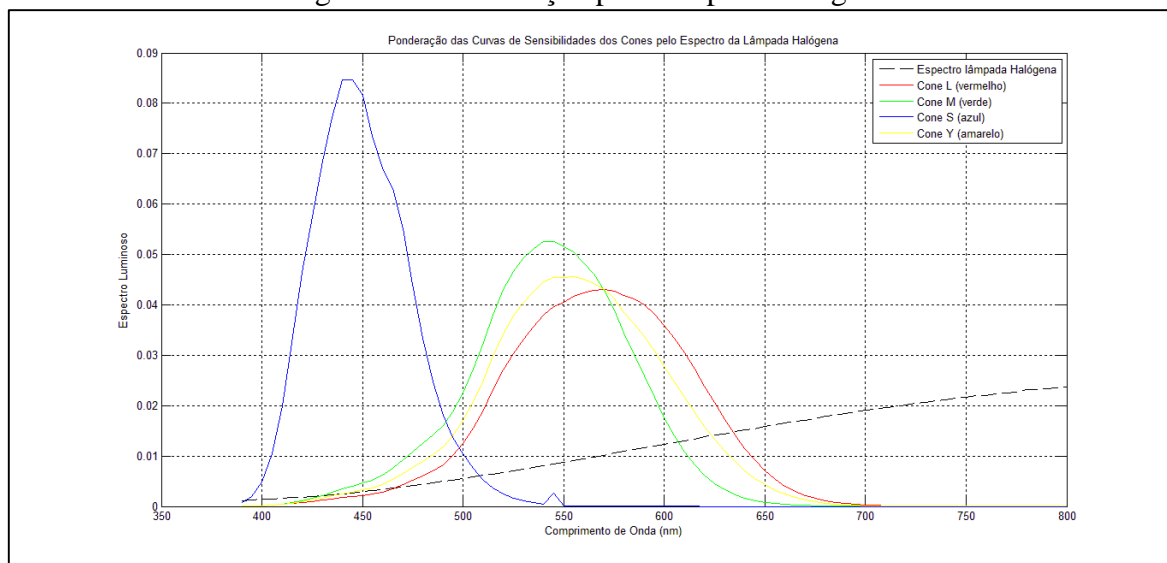


Fonte: O Autor (2016)

5.3 AVALIAÇÃO DAS FONTES PELO MÉTODO PROPOSTO

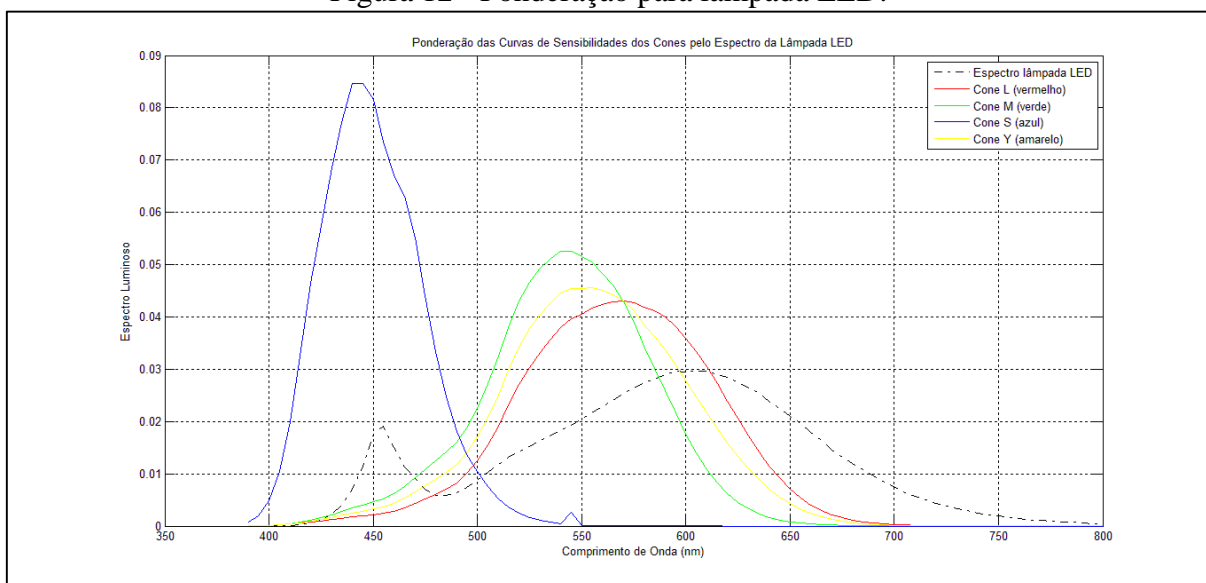
As curvas de sensibilidade e os espectros das fontes, a serem ponderados, são ilustrados, sobrepostos (para fins didáticos) nas figuras Figura 11 e Figura 12.

Figura 11 - Ponderação para lâmpada halógena.



Fonte: O Autor (2016)

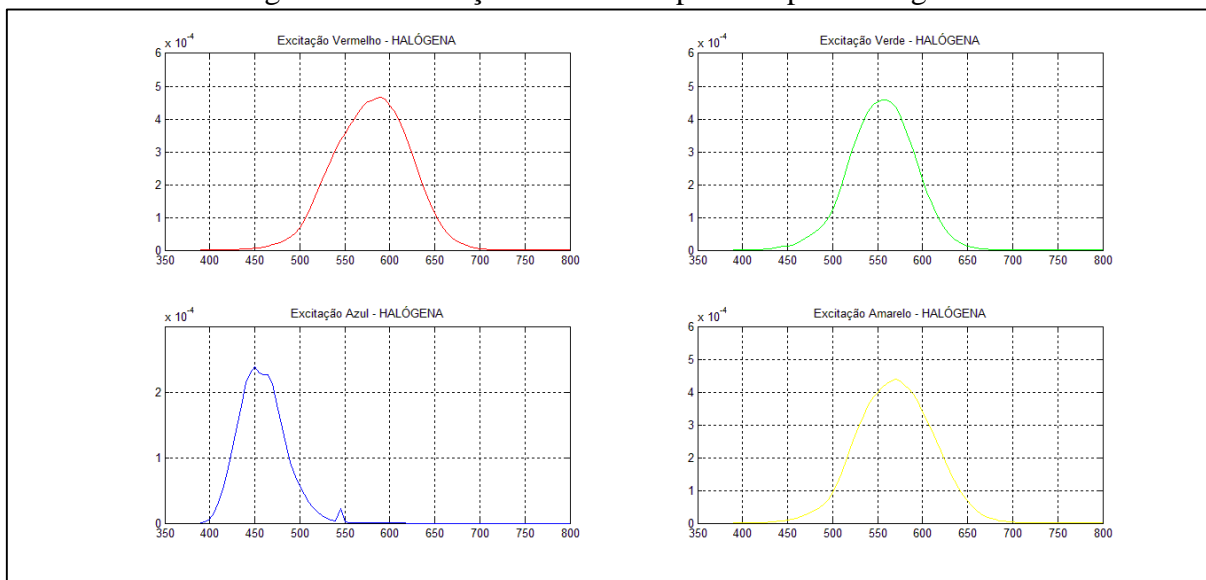
Figura 12 - Ponderação para lâmpada LED.



Fonte: O Autor (2016)

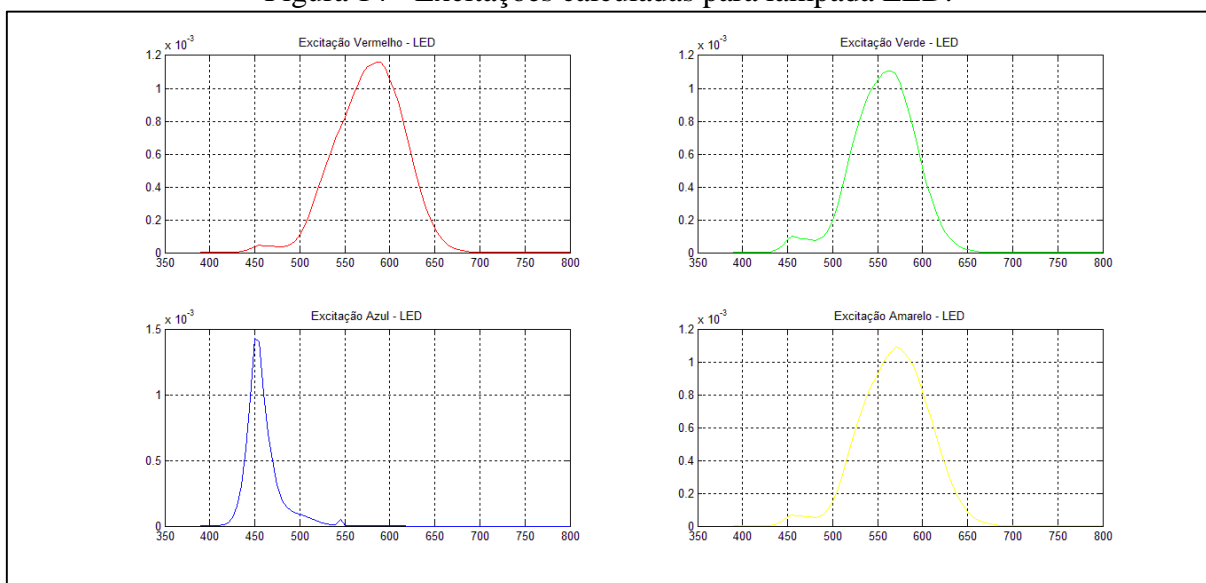
A integração das curvas de sensibilidade na Figura 13 e Figura 14 leva respectivamente, às excitações *vermelha* (e_L), *verde* (e_M), *azul* (e_S) e *amarelo* (e_{L+M}) de cada lâmpada. Os valores numéricos dessas excitações são mostrados na Tabela 5. Por fim, com base nessas excitações a figura de mérito de cada lâmpada pode ser determinada por (2), resultando nos valores apresentados na Tabela 6.

Figura 13 - Excitações calculadas para lâmpada halógena.



Fonte: O Autor (2016)

Figura 14 - Excitações calculadas para lâmpada LED.



Fonte: O Autor (2016)

Tabela 5 - Valores das excitações para as lâmpadas halógena e LED.

	Lâmpada halógena	Lâmpada de LED
Excitação Vermelho	0,0100	0,0220
Excitação Verde	0,0084	0,0191
Excitação Azul	0,0031	0,0085
Excitação Amarelo	0,0093	0,0207

Fonte: O Autor (2016)

Tabela 6 - Valores calculados segundo a figura de mérito proposta.

	Lâmpada Halógena	Lâmpada de LED
Figura de mérito J	0,5924	0,4912

Fonte: O Autor (2016)

Observa-se que conforme os resultados obtidos, a figura de mérito referente à lâmpada LED apresenta um menor valor. Dessa forma, é possível concluir que a lâmpada LED excita de forma mais uniforme as células ganglionares em consequentemente, produz um maior contraste.

5.4 VALIDAÇÃO DO MÉTODO: UM ESTUDO DE CASO

Profissionais da área de engenharia elétrica foram convidados a emitirem seus pareceres sobre o conforto visual proporcionado por cada uma das fontes luminosas em avaliação durante a leitura de sequências de caracteres (letras e números). Ao final, o número de acertos e erros cometidos por cada profissional foi computado.

5.4.1 ESTRUTURA DO TESTE

As duas lâmpadas foram dispostas lado a lado, em uma bancada, conforme apresentado na Figura 15, de forma que o centro a ser lido coincidissem com o eixo focal de cada lâmpada. O eixo focal das lâmpadas foi posicionado de forma perpendicular ao plano de leitura. As lâmpadas possuem acionamentos independentes e a bancada foi disposta em uma sala escura.

Figura 15 – Estrutura física.



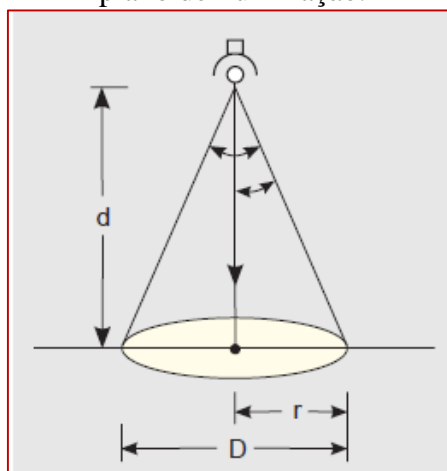
Fonte: O Autor (2016)

A distância de cada fonte luminosa em relação ao plano de leitura foi definida de acordo com o ângulo de abertura de cada lâmpada, fazendo com que, ao atingir o plano de leitura, ambos os fluxos luminosos abranjam a mesma área (Manual Luminotécnico Prático Osram, 2016). Considerando-se o esquemático mostrado na Figura 16, a distância d de cada fonte ao plano de leitura pode ser determinada por:

$$d = \frac{r}{\tan \beta}, \quad (3)$$

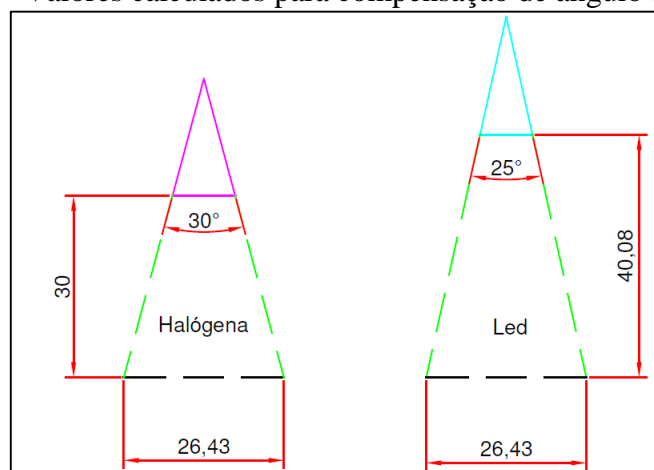
em que r é o raio da área iluminada e β corresponde à metade do valor do ângulo de abertura fornecido pelo fabricante (ver Tabela 4). Naturalmente, pequenas discrepâncias são esperadas uma vez que o diagrama considera a lâmpada como uma fonte pontual. A distância determinada por (3) para a lâmpada halógena foi $d = 30$ cm e para lâmpada LED foi $d = 40,08$ cm. A região iluminada para esses valores resultou em um círculo de 26,43 cm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 16 – Diagrama esquemático para cálculo da distância da fonte luminosa em relação ao plano de iluminação.



Fonte: (Manual Luminotécnico Prático Osram, 2016)

Figura 17 - Valores calculados para compensação de ângulo de abertura.



Fonte: O Autor (2016)

Para equiparação do fluxo luminoso das duas lâmpadas, ambas as fontes foram ensaiadas na esfera integradora. Uma vez que o fluxo luminoso nominal da lâmpada halógena é inferior ao da lâmpada LED, o fluxo da lâmpada LED foi medido sob tensão de alimentação nominal e a tensão de alimentação da lâmpada halógena foi elevada até que ambos os fluxos se equiparassem. Os valores de tensão de alimentação utilizados para alimentar cada uma das fontes de modo a obterem-se os fluxos luminosos equivalentes é mostrado na Tabela 7, bem como os valores dos fluxos luminosos medidos para as respectivas alimentações.

Tabela 7 - Valores para ajuste de fluxo luminoso.

Tipo	Modelo	Tensão de entrada medida (V)	Fluxo luminoso medido (lm)
Halógena	PAR 30 ALU SPERSTAR	252,2	1023
LED	LED SUPERSTAR PAR 30	220,1	1026,2

Fonte: O Autor (2016)

Antes dos testes na esfera integradora, cada fonte foi submetida à tensão nominal, conforme valores especificados pelo fabricante (Tabela 4) durante 15 minutos a fim de estabilizar as suas características de funcionamento. Só após esse período os fluxos luminosos foram medidos e a alimentação da lâmpada halógena ajustada na busca da equiparação do fluxo.

Os textos a serem lidos compreendem em dois conjuntos similares de tabelas (um conjunto para cada lâmpada). Cada conjunto possui seis tabelas distintas, sendo que cada tabela é composta por dez linhas sequenciais de caracteres aleatórios (letras e números). Cada sequência possui um tamanho diferente de fonte, conforme exemplificado na Tabela 8. Cada uma das seis tabelas possui uma combinação diferente de cor de fundo e de fonte, em acordo com as excitações/inibições das células ganglionares, conforme ilustrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Combinação de cores.

Tabela	Cor da Fonte	Cor do fundo
1	Verde	Vermelho
2	Vermelho	Verde
3	Azul	Amarelo
4	Amarelo	Azul
5	Branco	Preto
6	Preto	Branco

Fonte: O Autor (2016)

A dinâmica do teste realizado consistiu em posicionar cada colaborador frente à bancada solicitando a leitura das sequências de caracteres das seis tabelas de um dos conjuntos, em voz alta, sob a iluminação de uma das fontes. Em seguida, o procedimento foi repetido usando-se o segundo conjunto de tabelas, sob a iluminação da segunda fonte. Ao final das leituras, os colaboradores foram indagados sobre qual fonte forneceu a sensação de maior conforto visual.

Como resultado observou-se que as leituras feitas mediante a iluminação pela lâmpada halógena apresentaram maior quantidade de erros. Todos os colaboradores erraram ao menos uma sequência/linha ao lerem os caracteres nas tabelas com cores verde e vermelho, o que não ocorreu sob a iluminação da lâmpada LED. Para as tabelas com cores preto e branco, ocorreram erros apenas nas linhas com a fonte de texto menor (entre as linhas 8 e 10), porém com um número maior de erros quando sob a iluminação da lâmpada halógena. Para as tabelas de cores azul e amarelo, não se observou diferença consistente entre as taxas de erros perante as lâmpadas. A Tabela 9 mostra a média de acertos e erros para cada fonte avaliada.

Tabela 9 - Média de acertos e média de erros para cada lâmpada.

Tabela	Cor da Fonte	Cor do Fundo	Lâmpada halógena		Lâmpada LED	
			Média de Acertos	Média de Erros	Média de Acertos	Média de Erros
1	Verde	Vermelho	0,76	0,24	0,86	0,14
2	Vermelho	Verde	0,88	0,12	0,94	0,06
3	Azul	Amarelo	0,84	0,16	0,98	0,02
4	Amarelo	Azul	1	0	1	0
5	Branco	Preto	0,9	0,1	0,9	0,1
6	Preto	Branco	0,94	0,06	0,94	0,06
Média Total			0,89	0,12	0,94	0,06

Fonte: O Autor (2016)

Na opinião de quatro colaboradores a leitura e os detalhes ficaram mais nítidos na presença da lâmpada LED, ao passo que os mesmos reclamaram de cansaço e dificuldade ao lerem os textos na presença da lâmpada halógena. Um dos colaboradores não soube dizer qual das duas lâmpadas lhe causou maior conforto visual.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um novo método para avaliação de fontes luminosas. Os métodos existentes, em sua maioria, baseiam-se em características elétricas e fotométricas dessas fontes. Mais recentemente, alguns métodos passaram a considerar a resposta visual humana com base em modelos de comportamento de cones e bastonetes. No método proposto, pela primeira vez na literatura, é considerado nessa aplicação o comportamento de uma camada inferior de células, chamadas ganglionares.

A figura de mérito proposta avalia a influência da fonte sob avaliação na percepção de contraste pelo sistema visual humano, que está diretamente relacionado com a percepção de formas e detalhes em uma imagem. Quanto menor o valor assumido pela figura de mérito, maior o contraste proporcionado pela fonte.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1:2013 – Iluminação de ambientes de trabalho Parte 1 – Interiores**. Rio de Janeiro. 2013.

BAGNATO, V. S.; PRATAVIEIRA, S. Luz para o progresso do cohecimento e suporte da vida. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 37, n. 4, 2006. ISSN ISSN 1806-9126. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172015000400206>. Acesso em: 08 Julho 2016.

BAO, H.; YING, J.; PENG, Q. Reference: Shading with Curve Light Sources. **IEEE**, 2008. Disponível em: <<http://reference.globalspec.com/references/detail?docid=5836583&doctype=4&feedIds=2>>. Acesso em: 25 Maio 2016.

COMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAG. **CIE 13.2: Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources**. Viena. 1974.

COSTA, C. L. M. et al. O que Você Vê? **Congresso Interno do Inmetro**, 2010. Disponível em: <[http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/615/1/ID%2049%20\(Poster\)CostaVieiraSouza.pdf.pdf](http://repositorios.inmetro.gov.br/bitstream/10926/615/1/ID%2049%20(Poster)CostaVieiraSouza.pdf.pdf)>. Acesso em: 04 Junho 2016.

COSTA, G. C. **Iluminação Econômica: Cálculo e Avaliação**. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.

COSTA, M. A. D. et al. **A high efficiency autonomus street lighting system based on solar energy and LEDS**. COBEP. [S.l.]. 2009.

DACEY, D. M.; PACKER, O. S. Colour coding in the primate retina: diverse cell types and cone-specific circuitry. **Current Opinion in Neurobiology**, 13, 2003. 421 - 427. Disponível em: <<http://faculty.washington.edu/sbuck/545ColorClass/DaceyPacker2003.pdf>>. Acesso em: 04 Junho 2016.

FICHA Técnica do Produto OSRAM. HALOPAR PAR 30, 2016. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/produtos/lampadas/lampadas-halogenas/halopar/halopar-30/index.jsp>. Acesso em: 12 Novembro 2016.

FICHA Técnica do Produto OSRAM. LED SUPERSTAR PAR 30, 2015. Disponível em: <<http://http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:StWzAZRXpGsJ:www.ledvance.com.br/media/resource/HIRES/544800/catalog-osram-led-lamp-and-luminaire--2015-br-pt.pdf+&cd=5&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 12 Novembro 2016.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

GRONFIER, C. A luz azul boa e a cronobiologia: Luz e funções não visuais. **Points de Vue - International Review of Ophthalmic Optics**, Lyon, n. 68, 2013. Disponível em: <<http://www.essilor.com.br/portalessilor/document.do?id=1724>>. Acesso em: 08 Julho 2016.

GUALTIERI, M. **Visão de cores e sensibilidade ao contraste em indivíduos com diabetes melito: avaliação psicofísica e eletrofisiológica**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

HEALTH PHYSICS SOCIETY. Classification of Radioactive Self-Luminous Light Sources. **IEEE**, 01 jan. 2005. Disponível em: <<http://standards.globalspec.com/standards/detail?docid=1628361&familyid=EGXDGFAAAAA>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

HELENE, O.; HELENE, A. F. Alguns aspectos da óptica do olho humano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, p. 3312, 2011. ISSN 3. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v33n3/12.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION. Residential Luminaires With LED Light Source Or Fluorescent Lamp. **IEEE**, 20 ago. 2014. 14. Disponível em: <<http://standards.globalspec.com/standards/detail?docid=9958654&familyid=QDETCBAAA AAAAAAA>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

KRONBAUER, A. L.; SCHOR, P.; CARVALHO, L. A. V. D. Medidas da visão e testes psicofísicos. **Arquivos Brasileiros de Oftalmologia**, São Paulo, 2008. 122-127. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/abo/v71n1/v71n1a27.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

LAMB, T. D.; JUNIOR, E. N. P. Phototransduction, Dark Adaptation, and Rhodopsin Regeneration. **Investigative Ophthalmology and Visual Science**, 47, Dezembro 2006. 5138 - 5152. Disponível em: <<http://iovs.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2164197>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

LEE, B. B. Paths to colour in the retina. **Clinical and Experimental Optometry**, n. 87, 2004. 239-248. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1444-0938.2004.tb05054.x/epdf>>. Acesso em: 27 Maio 2016.

LOPES, J. M. B. **Cor e Luz**. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 1-6. 2013.

LUO, Y.-R. Why is the human visual system sensitive only to light of wavelengths from approximately 760 to 380 nm?: An answer from thermochemistry and chemical kinetics. **Biophysical Chemistry**, 83, 2000. 179-184. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301462299001374>>. Acesso em: 04 Junho 2016.

MAGGI, T. et al. Estudo do fluxo luminoso necessário para luminárias de iluminação pública. **XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA**, Campina Grande, 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/99663.pdf>>. Acesso em: 04 Junho 2016.

Manual Luminotécnico Prático Osram. OSRAM. [S.l.].

MASLAND, R. H. The fundamental plan of the retina. **Nature neuroscience**, 4, 2001. 877-886. Disponível em: <<http://www.nature.com/neuro/journal/v4/n9/full/n0901-877.html>>. Acesso em: 27 Maio 2016.

OLIVEIRA, D. F. D. **Confiabilidade metrológica e validação de procedimentos espectralométricos para medição de fontes luminosos**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

RODRIGUES, C. R. B. S. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública**. Universidade de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2012.

RODRIGUES, C. R. B. S. et al. Um estudo comparativo de sistemas de iluminação pública: estado sólido e lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. **2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications**, 2010. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nimo/files/2008/10/induscon2010_nimo.pdf>. Acesso em: 04 Junho 2016.

RODRIGUES, C. R. B. S. et al. Emprego de LEDs como alternativa para sistemas de iluminação. **Revista Lumière**, p. 50-67, 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nimo/files/2012/06/nimo-ufjf-mai2012-red.pdf>>. Acesso em: 04 Junho 2016.

SÁ, G. S. D. O ambiente de trabalho sob a importância do projeto luminotécnico. **Revista online IPOG Especialize**, v. 01/2015, n. 10, p. 1-17, Dezembro 2015. ISSN 2179-5568. Disponível em: <<http://www.ipog.edu.br/download-arquivo-site.sp?arquivo=a-importancia-do-projeto-luminotecnico-1671437.pdf>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

SAE INTERNATIONAL. (R) Signal & Marking Light Sources. **IEEE**, 06 jan. 2011. Disponível em: <<http://standards.globalpec.com/standards/detail?docid=1382606&familyid=ZKUNHAAAAA>>. Acesso em: 19 jun. 2016.

SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Vision and Perception**. 1. ed. Springer: Leidschendam, 2008.

SOUZA, G. D. S. et al. A visão através dos contrastes. **Estudos Avançados**, São Paulo, 27, n. 77, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142013000100005>. Acesso em: 28 Maio 2016.

STOCKMAN, A.; SHARPE, L. T. The spectral sensitivities of the middle and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. **Vision Research**, 40, 16 Junho 2000. 1711-1737. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698900000213>>. Acesso em: 28 Maio 2016.

TAPPI. Light Sources for Evaluating Papers Including Those Containing Fluorescent Whitening Agents. **IEEE**, 01 jan. 2007. 09. Disponível em: <<http://standards.globalpec.com/standards/detail?docid=1523980&familyid=ASTSABAAA AAAAAAA>>. Acesso em: 22 maio 2016.