3 Fundamentos da Espectroradiometria

Espectroradiometria é a técnica usada para medir a distribuição espectral de potência (DEP) de radiação emitida por uma fonte. Para isso a radiação deve ser separada em bandas de comprimentos de onda e, cada uma dessas bandas, medida separadamente. Uma curva da intensidade luminosa em função do comprimento de onda fornecerá então informação sobre as características espectrais da fonte. A radiação medida pode ser descrita de várias maneiras diferentes, dependendo de como é coletada a radiação que entra no espectroradiômetro e de como esta é processada pelo sistema. Assim, por exemplo, um espectroradiômetro realiza uma medição física objetiva em unidades radiométricas para cada comprimento de onda. O resultado dessa medição pode, entretanto, ser convertida em um equivalente fotométrico, que mostra como a radiação é percebida pelo olho humano em termos de luminosidade, ou em um equivalente colorimétrico, que mostra como a radiação é percebida pelo olho humano em termos de coordenadas de cor (XYZ, xy, u'v' etc.).

3.1. Radiometria

A Radiometria é a ciência e tecnologia de medição de energia eletromagnética radiante. Geralmente se refere simplesmente como "a medição de radiação óptica". A radiometria envolve a medição da energia radiante total emitida pela fonte radiante em cima do espectro óptico inteiro.

As principais características da radiometria são:

- não considera a visão;
- medição da energia de radiação (Watt);
- abrange todo o espectro de radiação eletromagnética.

3.2. Fotometria

A Fotometria está relacionada àquela porção do espectro óptico para o qual o olho humano é sensível (380nm–780nm). Mais especificamente, fotometria relaciona-se à medição de energia radiante no espectro "visível" conforme percebido pelo observador padrão de fotometria. Livremente, o observador padrão de fotometria pode ser considerado como um olho humano.

Existem 3 tipos de visão humana:

visão fotópica - quando o olho é adaptado a altos níveis de luminância;

visão escotópica – quando o olho é adaptado a baixos níveis de luminância e

visão mesópica – quando o olho é adaptado a níveis intermediários de luminância.

As principais características da fotometria são:

- energia que é interpretada de alguma forma pela visão humana e

- abrangência limitada ao espectro visível.

3.3. Grandezas para descrever uma fonte radiante

A seguir, as principais quantidades radiométricas, espectroradiométricas e fotométricas são apresentadas, pois essas são utilizadas para descrever uma fonte radiante.

3.3.1. Grandezas radiométricas

As quantidades radiométricas são aquelas usadas na medição de radiação óptica. As principais quantidades são:

<u>energia radiante</u> – energia radiante é a energia total emitida por uma fonte radiante. Unidade SI: Joule (J)

<u>densidade de energia radiante</u> – densidade de energia radiante é a energia radiante por unidade de volume. Unidade SI: J/m³

<u>fluxo ou potência radiante (F_e)</u> – fluxo ou potência radiante é a taxa de emissão ou transmissão da radiação, ou seja, é a energia radiante por unidade de tempo (figura 12). Unidade SI: J/s ou Watt (W)



Figura 12. Fluxo radiante

<u>iluminamento energético (E_e) </u> – iluminamento energético é a irradiância, que é a relação entre a incidência total de fluxo de energia num elemento de superfície e a área da superfície daquele elemento. A luz pode vir de qualquer direção e pode ser de várias fontes. Esse total dos feixes de luz (radiação) na superfície pode ser medido. Unidade SI : W/m²

<u>intensidade energética (Ie)</u> – intensidade energética é o fluxo total de energia emitido por uma fonte por unidade de ângulo sólido numa direção específica. Unidade SI: W/sr

<u>ângulo sólido</u> – é definido pela relação entre a área de uma parte de uma esfera e o quadrado do raio da esfera. Sendo assim, considere uma situação na qual uma pequena (quase pontual) fonte de luz esteja radiando sobre um fluxo luminoso através de um cone. Numa distância radial r da fonte, uma superfície esférica é colocada, e a porção desta superfície interceptada pelo cone é denominada: área A. O ângulo sólido (figura 13) é representado pela letra grega "Omega"(ω) e é dado por ω = A / r². Unidade SI: sr (esterradiano)



Figura 13. Ângulo sólido

luminância energética (Le) – luminância energética é a radiância, que é a intensidade de uma fonte dividida pela a área da própria fonte. Unidade SI: W/sr.m²

emissividade – emissividade é a relação entre a densidade de fluxo radiante de uma fonte e a de um radiador de corpo negro à mesma temperatura.

3.3.2. Grandezas fotométricas

Quando as quantidades radiométricas são avaliadas por meio de um observador fotométrico padrão, elas passam a corresponder a quantidades fotométricas. As quantidades fotométricas fundamentais referem-se à medição da luz. A unidade de base do SI da medição da luz é o lúmen (Im). As principais quantidades são:

<u>energia luminosa</u> – energia luminosa é a energia total como percebido por um observador padrão 2º. Unidade SI: Im.s

<u>densidade de energia luminosa</u> – densidade de energia luminosa é a energia luminosa por unidade de volume. Unidade SI: lm.s.m⁻³

fluxo luminoso (F) – fluxo luminoso é a potência (W) emitida sob a forma de radiação luminosa sensível ao olho humano.

Quando se fala que uma lâmpada possui 60W, refere-se à potência elétrica consumida, da qual somente uma parte se converte em luz visível; é o chamado fluxo luminoso. A sua medida poderia ser expressa em Watt (W), porém parece mais sensato definir uma nova unidade, o lúmen (lm), que toma como referência a radiação visível. Empiricamente se demonstra que uma radiação de 555nm de 1 W de potência emitida por um corpo negro corresponde a 683lm.

intensidade luminosa (I) – intensidade luminosa é o fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em uma direção específica.

O fluxo luminoso (figura 14) passa uma idéia da quantidade de luz emitida por uma fonte, por exemplo, por uma lâmpada, em todas as direções do espaço. Em contrapartida, ao se pensar em um projetor, é fácil perceber que ele só ilumina em uma direção. Parece claro que se necessita conhecer como se distribui o fluxo em cada direção do espaço, e para isso, foi definida a intensidade luminosa (figura 14). Unidade SI: cd (candela)



Figura 14. Diferença entre (a) fluxo luminoso e (b) intensidade luminosa

Segundo a CGPM (Conférence Générale dês Poids et Mesures), candela é a intensidade luminosa, numa dada direção de uma fonte que emite radiação monocromática de freqüência igual a 540 x 10¹²Hz e cuja intensidade energética nessa direção é 1/683W/sr.

iluminamento (E) – iluminamento é a iluminância em uma superfície, que é a densidade do fluxo luminoso incidente nesta superfície. É o fluxo luminoso dividido pela área da superfície quando a superfície é uniformemente irradiada. Então,

$$E = \phi / A \qquad eq. (28)$$

Na expressão 28, ϕ é o fluxo luminoso incidente e A é a área sobre a qual o fluxo de luz incide.

As unidades de iluminamento são lúmens/m² e lúmens/ft² (SI). Um lúmen/m² é chamado de lux (lx), enquanto que um lúmen/ft² é chamado de footcandle (fc).

Para se entender melhor o conceito de iluminamento, imagina-se uma lanterna iluminando objetos situados a diferentes distâncias. Quando se coloca a lanterna em direção a uma parede a uma distância próxima, pode-se ver esta área fortemente iluminada por um círculo pequeno. Porém, se a distância entre a parede e a lanterna for grande, vê-se a área fracamente iluminada por um círculo maior. Essa experiência é ilustrada na figura 15.



Figura 15. lluminamento de um objeto: (a) a visão de perto e (b) a visão de longe

De acordo com a experiência relatada acima, verifica-se que a iluminância depende da distância do foco de luz ao objeto iluminado.

Iuminância (L) – Iuminância é a relação entre a intensidade Iuminosa e a área da fonte. Unidade SI: cd/m²

<u>eficácia luminosa</u> – eficácia luminosa é a relação entre o fluxo total luminoso e o fluxo total radiante. Unidade SI: lm/W

3.3.3. Grandezas espectroradiométricas

Quando a energia radiante, ou qualquer grandeza relacionada, for medida em termos de seus componentes monocromáticos, esta se tornará uma função do comprimento de onda. Então, as designações para estas quantidades deverão ser procedidas pelo adjetivo espectral, como uma irradiância espectral. O próprio símbolo, para cada quantidade, é seguido pelo símbolo de comprimento de onda (λ), por exemplo, irradiância espectral (iluminamento) tem o símbolo E(λ) ou E_e(λ).

Se a distribuição espectral da fonte for conhecida, a relação entre o lúmen e o watt expressa pela equação (29) pode ser usada para converter de um para o outro:

$$\Phi_{v} = 683 \int_{\lambda} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda \text{ (lm)} \qquad \text{eq. (29)}$$

Na expressão 29, $\phi(\lambda)$ é a distribuição de potência espectroradiométrica da fonte luminosa (expressa em "watt por intervalo de comprimento de onda"), V(λ) é a função fotópica de eficácia luminosa relativa (normalizada de 555nm), e

 λ é o comprimento de onda (expresso em nanometros). O valor de 683lm.W⁻¹ é a eficácia absoluta luminosa de 555nm.

Uma medição fotométrica só pode ser convertida em uma radiométrica ou vice-versa, quando a distribuição espectral de potência da fonte analisada for conhecida.

3.4. O espectroradiômetro e o seu funcionamento

Um espectroradiômetro é utilizado para medir a potência óptica radiante emitida. Ele é composto por 3 elementos básicos:

- entrada óptica: esfera de integração, telescópio etc. (dispositivo para captar (coletar) a radiação a ser medida);

- um monocromador (dispositivo para isolar cada radiação monocromática (em cada comprimento de onda) de um feixe de luz);

- um detector (dispositivo para converter energia radiante em um sinal neural - tal como o olho - ou em sinal elétrico).

As principais medições realizadas no espectroradiômetro são:

- Medição da Irradiância Espectral
- Medição da Radiância Espectral

Medição da Irradiância Espectral

Esse processo de medição envolve a comparação da fonte de teste com uma fonte padrão (normalmente uma lâmpada de filamento de tungstênio) que possua uma distribuição de potência espectral conhecida. Em todos os casos, as condições exatas de calibração devem ser declaradas de forma a assegurar que os resultados possam ser reproduzidos quando a fonte for operada em ocasiões subseqüentes.

No caso da irradiância, a quantidade a ser medida é a radiação da fonte em uma determinada direção que alcança uma área a uma distância específica. Quando uma medida absoluta é requerida, é essencial definir a distância exata da fonte com o plano da superfície irradiada.

Para reduzir erros gerados pela não-linearidade do sistema de medição, os níveis de irradiância da fonte de teste e do padrão deveriam ser tão iguais quanto possíveis. Para esta finalidade, as distâncias das duas fontes têm que estar adequadamente ajustadas.

Medição da Radiância Espectral

Para uma medição de radiância, que determina a quantidade de radiação emitida por uma fonte luminosa numa determinada direção, é obtida através da seleção de uma área da mesma com a utilização de um diafragma (por ex.: uma fenda) para limitar o campo desejado. O cuidado necessário em definir a área especificada dependerá da uniformidade espacial da região em estudo.

A melhor técnica de calibração de radiância envolve a substituição direta de um padrão espectral de radiância pela fonte de teste; neste caso a seletividade espectral e as propriedades geométricas dos componentes ópticos utilizados na definição da área da fonte não necessitam ser conhecidas desde que sejam comuns para cada medição.

Embora um campo limitado seja usado para isolar uma área específica da fonte, efeitos de difração no sistema óptico podem permitir a radiância das áreas circunvizinhas e influenciar a radiação do objeto.

Se o tamanho e a forma das áreas radiantes do padrão e das fontes de testes forem significativamente diferentes é necessário aplicar uma correção para eliminar essas diferenças.

Os padrões mais usados de radiância espectral são as lâmpadas de filamentos de tungstênio, devido a sua conveniência, facilidade de controle e estabilidade de longo prazo. No entanto, para níveis mais baixos de radiância, é utilizada uma superfície de características de refletância espectrais conhecidas, irradiada por um padrão de irradiância espectral, os quais juntos simulam a superfície da fonte padrão, assim permitindo que a radiância possa ser medida.

3.5. Normalização de curvas de distribuição espectral de potência

A normalização é realizada para eliminar os problemas causados pelas diferenças de irradiância entre fontes, quando se trabalha com valores relativos.

Existem dois tipos de normalização: uma está definida no Vocabulário Internacional de Iluminação (ILV – International Lighting Vocabulary, Publicação CIE 17.4:1987), a qual faz com que o valor de Y seja igual a 100, ou seja, a mesma luminosidade. E a outra está definida na Publicação CIE 15.2:1986, que calcula os valores de S_(λ) de modo que S₍₅₆₀₎ = 100 (ou igual a 1), ou seja, S_{n(λ)} = S_(λ) x 100/S₍₅₆₀₎.

O ponto de 560nm foi escolhido por se aproximar mais do ponto máximo da função de eficácia luminosa da visão humana (V(λ)), apresentada na figura

16, que acontece a 555nm. A normalização não é feita nesse exato ponto porque há medições que são realizadas com intervalos de medição de 10nm, que não inclui o valor de 555nm.



Figura 16. Eficácia luminosa da visão humana (Curva V(λ))

3.6. Fontes Luminosas

Há no mercado vários tipos de lâmpadas, para uso industrial, comercial e residencial. A diferença entre essas lâmpadas está na forma com que elas produzem a luz. A seguir, são apresentados alguns tipos de fontes luminosas.

3.6.1. Lâmpada incandescente

A lâmpada incandescente é o meio mais antigo e simples de se produzir luz a partir da energia elétrica. A figura 17 apresenta um esquema simplificado.



Figura 17. Esquema simplificado de uma lâmpada incandescente

O filamento é um fino fio de um metal de alto ponto de fusão (quase sempre o tungstênio). Ele fica no interior de um bulbo de vidro e condutores em cada extremidade são conectados a um meio de encaixe (rosca ou outro tipo) para fixação do conjunto e condução da corrente elétrica. No centro das lâmpadas comuns há ainda um suporte de vidro ao qual são fixados filetes metálicos para apoio do filamento, para melhorar a resistência a vibrações.

A corrente elétrica aquece o filamento a uma temperatura de cerca de 2500°Ce, nessa condição, há emissão de calor e luz visível.

Se estivesse exposto ao ar, o filamento seria rapidamente destruído devido à ação do oxigênio. Nas primeiras lâmpadas, vácuo era feito no interior do bulbo para prevenir isso.

Entretanto, devido à elevada temperatura de operação do filamento, ocorre a vaporização do tungstênio, que se deposita nas paredes do bulbo até a completa ruptura do filamento em relativamente pouco tempo.

Lâmpadas atuais, no lugar do vácuo, usam um gás inerte (em geral argônio) que reduz a vaporização. Mas a duração ainda é pequena. Em média, cerca de 1000 horas em condições normais de utilização.

Além de sua baixa durabilidade, cabe destacar que lâmpadas incandescentes comuns (figura 18) possuem eficiência energética inferior a outros tipos de lâmpadas, o que representa uma desvantagem. Somente cerca de 10% da energia consumida é convertida em luz. O restante é desperdiçado sob forma de calor.



Figura 18. Lâmpada incandescente

A lâmpada halógena (figura 19) usa o mesmo princípio da incandescente, mas o gás de enchimento é em geral criptônio ou xenônio com traços de um elemento halogênio (normalmente bromo ou iodo). O halogênio tem a propriedade de combinar com os átomos do tungstênio evaporado e depositá-los no filamento, ou seja, um processo de reciclagem. Assim, a temperatura de trabalho pode ser mais alta, para aumentar a parcela de luz visível e, por conseqüência, a eficiência. Os bulbos são menores, mais próximos do filamento e em vidro de quartzo para suportar as temperaturas mais altas e também as pressões, que podem chegar até 25bar, que equivale a 2500 quilopascals ou 2,5 megapascals. Tudo isso resulta em vida média maior (próxima de 3000h), rendimento energético cerca de 50% maior que o da incandescente comum e um espectro de emissão que permite uma reprodução mais fiel das cores.



Figura 19. Lâmpada halógena

3.6.2. Lâmpada incandescente com filtro

De acordo com MacCamy (1994), em 1915, Norman Macbeth desenvolveu, em conjunto com a Gage of Corning Glass Company, um filtro azul para converter luz de tungstênio em luz do dia. Artistas e matizadores das indústrias preferiam a luz da janela norte para trabalhar. Então buscou esta luz, com temperatura de cor correlata de, pelo menos, 7000K. Em 1931, a CIE definiu dois padrões de luz do dia, B e C (ver item 2.1.2). Mesmo sendo possível reproduzir as fontes padrão B e C, os filtros utilizados continham soluções que apresentavam grande variação no momento do preparo, gerando grandes incertezas, e eram difíceis de manusear em termos práticos.

O grande inconveniente das lâmpadas incandescentes com filtro é que a faixa UV é muito fraca, não sendo adequadas para amostras fluorescentes.

Atualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias na área de produção de filtros, novas propostas, as quais têm gerado excelentes resultados, estão surgindo utilizando fontes adicionais de UV.

3.6.3. Lâmpada dicróica

Dicroísmo (do grego dichroos, bicolor) é a propriedade, que alguns materiais têm de dividir um feixe de luz em dois feixes de comprimentos de onda (cores) diferentes. Tal propriedade é usada em filtros e espelhos para diversas aplicações.

Uma lâmpada dicróica comum (figura 21) é uma lâmpada halógena com um refletor de algum material dicróico, que reflete a parte visível da radiação e absorve a parte infravermelha (figura 20).

Desde que ela normalmente fica embutida em forros ou similares, é reduzida a emissão de calor para o ambiente iluminado.



Figura 20. Esquema simplificado de uma lâmpada dicróica



Figura 21. Lâmpada dicróica

3.6.4. Lâmpadas de xenônio (contínua e pulsante)

Lâmpadas de xenônio são lâmpadas do tipo descarga, de alta pressão, pertencentes a um grupo denominado HID - High Intensity Discharge. Em um bulbo esférico dois eletrodos são montados separados somente por poucos milímetros, onde forma-se um arco voltaico de pequeno tamanho (short arc lamp), emitindo, no entanto luz extremamente intensa. O bulbo é preenchido com gás xenônio (às vezes juntamente com Mercúrio - Hg) e atinge altos valores de pressão em seu interior.

A lâmpada de xenônio emite praticamente em toda a região do espectro visível e ultravioleta (250 nm $<\lambda <$ 800 nm), conforme está representado na figura 22. Esta lâmpada oferece, portanto, uma maior faixa de comprimentos de onda em comparação com outras lâmpadas.



Figura 22. Espectro de emissão de uma lâmpada de xenônio

Existem diversos modelos de lâmpadas de xenônio, emitindo luz tanto em potências altas (da ordem de 10.000W) quanto em potências menores (75W). A luz produzida pelos refletores mais potentes deste tipo pode ter intensidade suficiente para quebrar o vidro de uma janela comum se colocados muito próximo da mesma. Lâmpadas de xenônio são utilizadas em projetores de cinema, em substituição aos antigos arcos voltaicos de carvão. Modelos menores, mais leves e menos potentes podem também ser utilizados em faróis de automóveis e em aplicações médicas, como endoscopia, por exemplo. Por outro lado, devido às altas temperaturas atingidas, os grandes modelos utilizados em cinema e vídeo exigem resfriamento - ventiladores embutidos no refletor - fontes eventuais de ruídos indesejados durante a projeção.

Através da utilização de filtros é possível obter-se uma distribuição espectral muito próxima daquela da luz do dia. Conforme relatado por Terstiege (1989), o Instituto Federal de Ciências dos Materiais e Ensaios da Alemanha (BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und - prüfung) desenvolveu um arranjo de espelhos e filtros distribuídos por 3 canais e uma lâmpada de xenônio OSRAM XBO de 150W, com o qual se obtém aproximadamente 200lx sobre a amostra (figura 23). A avaliação deste simulador de luz do dia apresenta o melhor resultado já encontrado até hoje ($MI_{VIS} = 0,12$; $M_{IUV} = 0,21$) por qualquer fonte, de acordo com o método CIE 51.2 (CIE, 1999).



Figura 23. Esquema do simulador D65 do BAM (Die Farbe, 1995)

Com isso, a lâmpada de xenônio (figura 24) é a mais utilizada na Colorimetria, especialmente na medição instrumental (xenônio pulsante), pois, para avaliação visual de cores, ela ainda não está sendo utilizada devido ao elevado custo de instalação e manutenção destas fontes em Cabines de Luz. Na figura 25, estão apresentadas as curvas de distribuição de potência de uma fonte padrão de xenônio (JIS Z 8092-1984) e do iluminante padrão CIE D65.



Figura 24. Lâmpadas de xenônio de arco curto



Figura 25. Curva de distribuição espectral de uma fonte padrão de xenônio (JIS Z 8092-1984) comparada com a do iluminante padrão CIE D65

3.6.5. Lâmpadas fluorescentes

Nas lâmpadas fluorescentes, a luz é produzida a partir da combinação de gases a baixa pressão que são estimulados por uma corrente elétrica. Com a excitação das moléculas dos gases, é emitida a luz ultra-violeta, imperceptível ao olho humano. Para que essa luz possa servir na iluminação, é preciso que o interior da lâmpada seja revestido a base de fósforo.

A figura 26 mostra o funcionamento de uma lâmpada fluorescente comum, tubular. A estrutura é um bulbo tubular de vidro, com um filamento em cada extremidade, contendo uma pequena quantidade de mercúrio (átomos) e um gás nobre (argônio, criptônio ou neônio) em baixa pressão. Há também um revestimento opaco interno. Sob ação do potencial elétrico aplicado nos filamentos, os elétrons do gás inerte se movem de um lado a outro em alta velocidade. A colisão com os átomos do mercúrio emite radiação ultravioleta. Um revestimento interno com material apropriado, por exemplo, halofosfato de cálcio, converte esta radiação em luz visível.



Figura 26. Esquema explicativo do funcionamento de uma lâmpada fluorescente

Entretanto, a lâmpada fluorescente exige dispositivos adicionais para operar. Na parte inferior da figura 26 está apresentado o esquema de ligação mais simples, com partida manual. O reator R (bobina com núcleo de ferro) é necessário para limitar a corrente e fornecer a tensão adequada. Para acender, é necessário pressionar por um breve período o botão S, de forma a aquecer os filamentos e formar o arco entre as extremidades. Uma vez aceso, o filamento pode e deve ser desligado, pois a descarga se mantém enquanto houver tensão aplicada.

O método, porém, é pouco prático. Existem dispositivos chamados starters que fazem esta operação automaticamente. Há reatores que dispensam starters, chamados de partida rápida. E também, há os reatores eletrônicos. Desde a última década, são bastante usadas as lâmpadas fluorescentes compactas (figura 27), em formato de U ou circular, contendo o reator na própria base e possuem soquete padrão, tornando a sua instalação tão simples quanto a das incandescentes.

As lâmpadas fluorescentes são mais eficientes que as incandescentes devido ao menor consumo de energia elétrica: cada 4W de uma lâmpada incandescente comum equivale a 1W de uma lâmpada fluorescente.

As lâmpadas fluorescentes, por outro lado, produzem luz ultravioleta e azul. Essas lâmpadas também produzem vibrações pulsantes e, apesar de não se notar no início, as lâmpadas mais velhas geralmente começam a zunir e piscar. Isso significa que podem interferir com a sua vibração, estabelecendo uma ressonância com a pessoa, o que pode torná-la hiperativa e irritável. Elas podem também afetar a visão humana, e as pessoas que trabalham sob esse tipo de luz geralmente ficam com os olhos doloridos. A coloração azul não apenas pode induzir uma sensação de frio ao observador como, também, impor

tonalidade azulada no ambiente. Uma nova geração de lâmpadas fluorescentes compactas hoje introduzida no mercado é muito mais eficiente e duradoura. As fluorescentes compactas (figura 27) possuem a tecnologia e as características de uma lâmpada fluorescente tubular (figura 28), porém com tamanhos reduzidos. Além de possuírem design moderno, leve e compacto, produzem menos calor, portanto atraem menos pó e poluição que os outros tipos de lâmpada e apresentam tonalidade de cor adequada para cada ambiente, com opções entre 2.700K (aparência de cor semelhante às incandescentes) a 6.000K (aparência de cor mais branca).



Figura 27. Lâmpadas fluorescentes compactas



Figura 28. Lâmpadas fluorescentes tubulares

3.7. Caracterização de fontes luminosas

A fonte de luz é um componente muito importante na percepção da cor de um objeto. Não existe cor sem a presença de uma fonte de luz.

A iluminação pode influenciar na percepção da cor real de um objeto, ou seja; uma cor pode ser alterada de acordo com o tipo de iluminação sob a qual é visualizada. Por isso é muito importante caracterizar a cor de uma lâmpada, de acordo com :

- Temperatura de cor correlata;
- Índice de reprodução de cor;
- Índice de metameria.

3.7.1. Temperatura de Cor

A temperatura de cor é a grandeza que expressa a aparência de cor da luz, sendo sua unidade SI o kelvin(K). Quanto mais alta a temperatura de cor, mais branca é a cor da luz. A luz quente é aquela que tem aparência de cor amarelada e temperatura de cor baixa, inferior a 3000K. A luz fria, ao contrário, tem aparência azul - violeta, com temperatura de cor elevada, da ordem de 6000K ou superior. A luz branca natural é aquela emitida pelo sol em céu aberto ao meio dia, cuja temperatura de cor é em torno de 5800K.

Quando a temperatura de um objeto aumenta, a radiação térmica emitida também aumenta. Ao mesmo tempo, a cor muda de vermelha através do laranja para branca. Um corpo negro, ou melhor, um radiador Planckian, é um objeto ideal que absorve toda energia e a emite como energia radiante de modo que sua temperatura está diretamente relacionada à cor da energia radiante, emitida por ele. A temperatura absoluta do corpo negro é referida como temperatura de cor. Estas cores estariam situados nos pontos dos corpos negros, como indicado no gráfico de cromaticidade xy (figura 29).



Figura 29. Diagrama de cromaticidade x, y com as posições dos radiadores Planckianos (Minolta, 1993)

3.7.1.1. Temperatura de Cor Correlata

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 cromaticidade u e v). Neste diagrama, duas coordenadas de cromaticidades têm que estar na linha que é perpendicular à tangente do ponto onde se localiza o radiador Planckian no ponto dado; essa linha é chamada de linha da isotemperatura. Ela é calculada pela determinação da linha de isotemperatura no qual a cor da fonte de luz está posicionada, a temperatura de cor correlata de qualquer cor na linha de isotemperatura é igual para a temperatura de cor no ponto onde a linha de isotemperatura intercepta a posição do corpo negro.

Temperatura de cor correlata é usada para aplicar a idéia geral de temperatura de cor para aquelas cores que são próximas, mas não exatamente iguais àquelas do corpo negro. De acordo com a publicação nº 17.4 da CIE, vocabulário internacional de iluminação (ILV, International Lighting Vocabulary), define-se temperatura de cor correlata como sendo:

"a temperatura do radiador de Planck que apresenta cor mais próxima da de um dado estímulo com a mesma luminosidade e sob condições de observação específicas". Unidade: kelvin (K).

A temperatura de cor correlata é calculada pela determinação da linha de isotemperatura no qual a cor da fonte de luz está posicionada. Linhas de isotemperatura são linhas retas ao longo das quais todas as cores na linha aparecem visualmente iguais; a temperatura de cor correlata de qualquer cor na linha de isotemperatura é igual para a temperatura de cor no ponto onde a linha de isotemperatura intercepta a posição do corpo negro (figura 30).

Algumas vezes, a cromaticidade de um radiador comparado com a de um perfeito, ou seja, com a de um corpo negro, radiador Planckian, não é exatamente igual com a dele, porém muito próxima. Até neste caso, o termo usado é temperatura da cor. Porém, o mais correto para se distinguir entre um perfeito radiador (Planckian) e um outro radiador qualquer, o melhor termo a ser empregado é o da temperatura de cor correlata.

Na figura 30, está apresentado o gráfico de cromaticidade (x,y) com algumas linhas de isotemperatura.



Figura 30. Gráfico de cromaticidade x, y indicando a localização dos corpos negros, as linhas de isotemperatura e as linha de Δuv iguais (Minolta, 1993)

3.7.1.2. Cálculo da Temperatura de Cor Correlata

O cálculo da temperatura de cor correlata é baseado no Método de Robertson (Robertson, 1968) fazendo uso da tabela das 30 linhas de isotemperatura. O método sucessivo de aproximação de Robertson é utilizado para calcular as temperaturas de cor correlata na faixa de $\pm 1\mu$ rd (μ rd = 10^6 /T; T é a temperatura em kelvin). O erro máximo associado às medições de temperatura de 1600K a 3000K tem que ser menor que 0,2K somado à incerteza de medição. Robertson reporta que os erros associados podem ser maiores para fontes luminosas com coordenadas de cromaticidade além de 0,01 das posições dos radiadores Planckianos.

3.7.2. Índice de Reprodução de Cor (IRC)

O Índice de Reprodução de Cor (IRC) mostra a diferença de cor de uma seleção de objetos padrão iluminados pela fonte de teste e por um iluminante padrão da mesma T_{cp} . O iluminante de referência até T_{cp} = 5000K é um corpo negro, acima desse valor é considerado uma luz do dia padrão.

O IRC é sempre relativo e é utilizado como parâmetro de comparação de lâmpadas com T_{cp} igual ou similar! Lâmpadas com IRC igual a 100 apresentam as cores exatamente como a luz de referência. Assim, quanto mais baixo for o valor deste índice, menor é a reprodução das cores. Sendo o IRC somente um índice relativo não se pode dizer que ele indica se os objetos iluminados pela lâmpada aparecem com suas cores reais ou não.

3.7.2.1. Cálculo do Índice de Reprodução de Cor

Duas fontes com a mesma temperatura de cor ou temperatura de cor correlata não renderão necessariamente as mesmas coordenadas de cromaticidade para amostras refletidas ou transmitidas com distribuição espectralmente seletiva relativa de radiância. Não se pode assumir que fontes com as coordenadas de cromaticidades iguais renderão as mesmas aparências de cor para uma dada amostra iluminada por cada fonte. A CIE desenvolveu um método para obtenção das propriedades de reprodução de cor de fontes. Este método é chamado de "Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Source" (CIE,1995). Ele consiste de uma série de "índices especiais de reprodução de cor" e uma média "índice geral de reprodução de cor".

O iluminante testado (simulador) é representado pelos dados já escolhidos pelo usuário. O iluminante referencial é calculado por um dos dois métodos, dependendo do valor da temperatura de cor correlata do simulador:

- Se T > 5000K, o iluminante referencial é considerado como radiador de corpo negro, situação em que se aplica a Lei de Planck. (Ver item 2.3.1.)
- Se T ≤ 5000K, o iluminante referencial será um iluminante luz do dia padrão. (Ver item 2.3.7.)

Com os dados do simulador e do iluminante referencial, suas coordenadas u, v da CIE 1960 são calculadas. Elas são obtidas através das 14 amostras testadas para cada fonte (simulador e o iluminante referencial), as quais estão apresentadas na figura 31. As curvas espectrais das 14 amostras (CIE, 1995) são apresentadas nas figuras 32 (da 1ª a 8ª amostra) e 33 (da 9ª a 14ª amostra).



Figura 31. As 14 amostras determinadas pela CIE nº 13.3 - 1995



Figura 32. Gráfico com as curvas das 8 primeiras amostras (TCS1 a TCS8)



Figura 33. Gráficos com as curvas das amostras TCS9 a TCS14

Os valores triestímulos das 14 amostras iluminadas pela fonte testada e de referência são calculados pelas equações 30, 31, 32 e 33. Os valores

triestímulos para uma das duas fontes são calculados pela a amostra testada iluminada pela fonte.

$$X = \sum_{\lambda} Sn_{\lambda} R_{\lambda} \overline{x_{\lambda}} \Delta \lambda \qquad \text{eq. (30)}$$

$$Y = \sum_{\lambda} Sn_{\lambda}R_{\lambda} \overline{y_{\lambda}} \Delta \lambda \qquad \text{eq. (31)}$$

$$Z = \sum_{\lambda} Sn_{\lambda} R_{\lambda} \overline{z_{\lambda}} \Delta \lambda \qquad \text{eq. (32)}$$

$$Sn_{\lambda} = \frac{100.S_{\lambda}}{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \overline{y_{\lambda}} \Delta \lambda}$$
eq. (33)

Nas expressões,

 S_{λ} = distribuição espectral relativa de potência de um iluminante;

 Sn_{λ} = distribuição espectral relativa de potência normalizada de um iluminante;

 x_{λ} , y_{λ} e z_{λ} = valores espectrais triestímulos da CIE 1931;

 R_{λ} = a função espectral de radiância do objeto;

 $\Delta\lambda$ = intervalo do comprimento de onda (nm).

As coordenadas u, v da CIE 1960 são calculadas diretamente pelos dados triestímulos obtidos, conforme equações 34 e 35.

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3} = u'$$
 eq. (34)
6y 2

$$v = \frac{-y}{12y - 2x + 3} = \frac{-y}{3}v'$$
 eq. (35)

As diferenças dos valores triestímulos U*, V*, W* da CIE 1964 são obtidos através das equações 36 a 41.

Para iluminante referencial:

$$W_{r,i}^* = 25(100Y_{r,i})^{\frac{1}{3}} - 17$$
 eq. (36)

$$U_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(u_{r,i} - u_r)$$
 eq. (37)

$$V_{r,i}^* = 13W_{r,i}^*(v_{r,i} - v_r)$$
 eq. (38)

Para simulador testado:

$$W_{k,i}^* = 25(100Y_{k,i})^{\frac{1}{3}} - 17$$
 eq. (39)

$$U_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(u_{k,i}^* - u_k^*)$$
 eq. (40)

$$V_{k,i}^* = 13W_{k,i}^*(v_{k,i}^* - v_k^*)$$
 eq. (41)

```
Nas equações 36 a 41,
k = fonte;
r = fonte de referência;
i = amostras de 1 a 14.
```

A diferença de cor (Δ)E para cada amostra testada é obtida através da equação 42.

$$(\Delta)E_{i} = [(U_{r,i}^{*} - U_{k,i}^{*})^{2} + (V_{r,i}^{*} - V_{k,i}^{*}) + (W_{r,i}^{*} - W_{k,i}^{*})^{2}]^{\frac{1}{2}}$$
eq. (42)

E os índices de reprodução de cor são computados e arredondados para um número inteiro através da equação 43.

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$
 eq. (43)

A média das primeiras 8 amostras testadas é calculada para obter o índice geral de reprodução de cor. Este índice (R_a) é calculado através da equação 44.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{8} R_i$$
 eq. (44)

A figura 34 ilustra o CRI de uma lâmpada CWF, com R_a = 62 e R_i = 52, 74, 90, 54, 56, 64, 74 e 30 (IES DG-1-1990). O iluminante de referência está representado por um círculo (O) e a fonte de teste representada por um quadrado (). O símbolo "+", que se encontra no centro da figura, representa o iluminante de referência. As linhas representam a diferença de cor $\Delta E_{U^*V^*W^*}$ de cada amostra quando iluminada pelas duas iluminações.



Figura 34. Ilustração do CRI de uma lâmpada CWF, com $R_a = 62 e R_i = 52, 74, 90, 54, 56, 64, 74 e 30$ (IES DG-1-1990)

Como o CRI é relativo, duas fontes podem ter CRIs iguais, mas, por terem temperatura de cor diferentes, apresentam cores diferentes. Esta explicação pode ser melhor entendida através da figura 35.



Figura 35. Duas fontes luminosas que possuem o mesmo CRI mas apresentam cores diferentes

3.7.3. Índice de Metameria

O Índice de Metameria – MI (CIE 51) é a diferença de cor (Δ E) entre duas amostras metaméricas iluminadas por uma fonte ou simulador de teste.

Duas amostras (I e II) são metaméricas quando elas têm curvas de refletância espectral que não são idênticas, porém, seus valores XYZ (e, portanto, suas cores) podem ser idênticos sob uma determinada condição de iluminação e observação; mas elas deixam de ser idênticas no momento que há uma mudança no observador e/ou na iluminação. A figura 36 apresenta a mudança de cor de duas amostras metaméricas quando ocorre uma mudança na iluminação, o mesmo acontece quando se muda o observador.



Figura 36. Amostras metaméricas I e II

A figura 37 apresenta a diferença entre o IRC e o MI quando ocorre uma mudança na iluminação.



Figura 37. Apresentação do MI e do IRC

As amostras 1 e 2 na figura 37 parecem iguais quando iluminadas pelo iluminante de referência (D65): ponto R. Quando são iluminadas por outra fonte, elas mudam de cor (IRC); a distância da diferença de cor entre as duas amostras devido à mudança de iluminação corresponde ao MI (CIE 51). Este método é apresentado mais adiante, no item 4.1.3.

3.8. Classificação de simuladores de luz do dia

Simuladores de luz do dia são fontes que tentam simular as distribuições espectrais dos iluminantes padrão da luz do dia CIE. Eles são utilizados principalmente nos instrumentos que medem cor e nas cabines de luz utilizadas para realizar avaliações visuais. Não existem fontes padrão da luz do dia como os iluminantes padrão da CIE. Muitas tecnologias têm sido usadas para simular os iluminantes padrão da luz do dia da CIE. Entretanto, vários simuladores da luz do dia têm apresentado qualidades diferentes, o qual resulta numa falta de precisão na avaliação de cor e ocorrência de problemas de metameria. Então, como há uma grande dificuldade de reproduzir os iluminantes padrão definidos pela CIE, os quais são citados como referência em normas e publicações como a melhor iluminação para realizar avaliações visuais, no capítulo 4, são apresentados os métodos mais utilizados para comparar ou até mesmo quantificar, se for possível, o grau de discrepância entre simuladores e os iluminantes padrão da CIE. As análises praticadas ou propostas até hoje, as quais são apresentadas no item 4, se dividem em três classes:

- Comparação entre as distribuições espectrais do simulador e do iluminante padrão da CIE, onde o método BS950 e o SCF podem ser utilizados.

 Verificação do efeito da mudança que a fonte provoca em grupos de objetos em relação à cor gerada como iluminante padrão, tal como o IRC - Índice de Reprodução de Cor. O método da CIE 13.3 e o JIS Z 8717 (1989) são os recomendados para determinar esse índice.

 Análise da mudança provocada pela nova fonte em pares de objetos, medindo o afastamento colorimétrico entre os elementos do par, o qual é conhecido como o índice de metameria (MI). Este índice é determinado conforme o método CIE 51.2 (1999).

3.9. Incerteza de medição

Conforme está definido no Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia, publicado pelo INMETRO em 2003, a incerteza de medição consiste em:

Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando.

Observações:

1- O parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio padrão (ou um múltiplo dele), ou a metade de um intervalo correspondente a um nível de confiança estabelecido.

2- A incerteza de medição compreende, em geral, muitos componentes. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados das séries de medições e podem ser caracterizados por desvios padrão experimentais. Os outros componentes que também podem ser caracterizados por desvio padrão, são avaliados por meio de distribuição de probabilidade assumidas, baseadas na experiência ou em outras informações;

3- Todos os componentes da incerteza, incluindo aqueles resultantes dos efeitos sistemáticos, como os componentes associados com correções e padrões de referência, contribuem para a dispersão do resultado da medição.

3.9.1.

Tipos de incerteza de medição

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (ABNT, INMETRO, 2003), usualmente denominado de ISOGUM, apresenta regras gerais para se avaliar e expressar a incerteza de medição. Dois tipos de incerteza são considerados:

- Incerteza Tipo A: Obtida pela análise estatística de uma série de observações.

 Incerteza Tipo B: Obtida por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações.

Os componentes da incerteza de medição são classificados como "Tipo A" ou "Tipo B" modelados pelo tipo de avaliação, mas todos estes componentes independentes de suas classificações são modelados pelo tipo de distribuição de probabilidade e quantificados pela variância ou pelo desvio padrão.

A avaliação do Tipo A será normalmente utilizada para obter o valor da repetitividade ou aleatoriedade de um processo de medição, exibido em um dado momento. Para algumas medições o componente aleatório da incerteza pode não ser significante em relação a outras contribuições da incerteza.

É provável que os componentes de natureza sistemática da incerteza, por exemplo, aqueles relativos aos erros que permanecem constantes enquanto a medição é realizada, serão obtidas por avaliações Tipo B. A incerteza associada aos padrões de referência utilizados de forma a atender a necessidade da rastreabilidade aos padrões nacionais ou internacionais costumam ser as principais fontes de incerteza (sistemáticas).

3.9.2. Expressão geral da incerteza de medição

A incerteza expandida de medição (U) pode ser expressa pela equação de propagação (equação 45).

$$U = k \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y}{\partial x_i}^2} u^2(x_i)$$
 eq. (45)

Na equação,

k = fator de abrangência usado para calcular a Incerteza expandida;

 $\frac{\partial y}{\partial xi}$ = derivada parcial da função y (y= f (x₁,x₂,...,x_i)) em relação a grandeza de

entrada x_i, ou seja, o coeficiente de sensibilidade da variável y em relação a x; u (xi) = incerteza padrão da grandeza de entrada estimada x_i.

3.9.3. Determinação da repetitividade e do erro de medição

A repetitividade, expressa pelo desvio padrão, é determinada para calcular a incerteza de medição. A equação 46 é utilizada para calcular a repetitividade.

Repetitividade = Desvio Padrão =
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{(n-1)}}$$
 eq. (46)

Nesta equação,

n = se refere ao número de medições.

O erro de medição para cada comprimento de onda é determinado através da comparação entre os valores nominais do padrão utilizado e a média das medições realizadas sobre o mesmo. O cálculo pode ser obtido através da equação 47.

Nesta fórmula,

 ΔI_{λ} = se refere ao erro de medição;

 $\overline{I}_{\lambda med}$ = se refere a média das medições realizadas;

 $I_{\lambda std}$ = se refere aos valores nominais do padrão utilizado.