

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA

Daniel Molena Seraphim

COR: FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ESTÍMULO

Porto Alegre

2017

Daniel Molena Seraphim

COR: FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ESTÍMULO

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Física apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luíz Souza Cunha

Porto Alegre

2017

Daniel Molena Seraphim

COR: FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ESTÍMULO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física.

Aprovado em: 20 de julho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

José Eduardo da Silveira Costa

Instituto de Física – UFRGS

Marcelo Barbalho Pereira

Instituto de Física - UFRGS

Silvio Luíz Souza Cunha

Instituto de Física – UFRGS (orientador)

RESUMO

Este estudo tem por objetivo compreender os processos físicos envolvidos na formação de estímulos visuais coloridos, como percebidos por um observador consciente. Também são abordadas formas de caracterização destes estímulos, buscando uma descrição objetiva dos mesmos, reduzindo ao possível fatores relacionados à percepção humana. São avaliados aspectos essenciais da fisiologia do aparelho visual e de seu funcionamento, como as curvas de resposta espectral e limites da visão fotópica e escotópica. O trabalho foca na descrição de fontes de radiação térmicas e não térmicas. A interação da luz com a matéria é apresentada segundo um modelo clássico de osciladores amortecidos que descrevem a resposta de elétrons em átomos e moléculas quando submetidos à radiação. Por fim, são apresentados modelos de caracterização e classificação de cores, como o sistema XYZ da Commission Internationale d'Éclairage (CIE) e o diagrama de cromaticidade xy. Conclui-se que a percepção consciente experimentada por um observador de estímulos coloridos é, acima de tudo, um fenômeno psicofísico.

Palavras-chave: Luz. Cor. Visão. Radiação. Colorimetria.

ABSTRACT

This study aims to understand the physical processes involved in the formation of colored visual stimuli, as perceived by a conscious observer. It is also discussed methods of characterizing these stimuli, seeking an objective description of them, reducing as much as possible, factors related to human perception. Essential aspects of the visual apparatus physiology and its functioning, such as the spectral response curves and the limits of the photopic and scotopic vision are evaluated. The work focuses on the description of thermal and non-thermal radiation sources. The interaction of light with matter is presented using a classical model of damped oscillators to describe the response of electrons in atoms and molecules when subjected to radiation. Finally, models of color classification and characterization are presented, such as the Commission Internationale d'Éclairage (CIE) XYZ system and the chromaticity diagram xy. Concludes that the conscious perception experienced by an observer of colored stimuli is, above all, a psychophysical phenomenon.

Keywords: Light. Color. Vision. Radiation. Colorimetry.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	6
2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO APARELHO VISUAL E DA VISÃO EM CORES ...	8
2.1 ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VISÃO EM CORES	9
2.1.1 Células fotorreceptoras: Cones e Bastonetes	9
2.1.2 Efeito Purkinje.....	10
2.1.3 Curvas de resposta espectral	11
2.2 FOTOMETRIA VERSUS RADIOMETRIA.....	12
3 LUZ E MATÉRIA: FORMAÇÃO DOS ESTÍMULOS	14
3.1 NATUREZA DA LUZ: ONDA OU PARTÍCULA?	14
3.2 FONTES DE LUZ.....	15
3.2.1 Radiadores térmicos: a radiação de corpo negro.....	15
3.2.2 Radiadores não térmicos	18
3.3 INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA.....	20
3.3.1 Resposta de um meio material à radiação eletromagnética	20
3.3.2 Cor por absorção de luz	26
3.3.3 Cor por espalhamento e interferência.....	30
4 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÍMULOS	32
4.1 COLORIMETRIA TRICROMÁTICA.....	32
4.1.1 O triângulo de cor	33
4.1.2 Leis de Grassmann	34
4.1.3 Tristímulus	34
4.1.4 Princípio da aditividade e cálculo das coordenadas dos tristímulus	37
4.2 ESPAÇOS DE COR	38
4.2.1 O Sistema de coordenadas XYZ da CIE de 1931	38
4.2.2 Decomposição da sensação de cor em luminosidade e cromaticidade.....	39
4.2.3 Diagrama de cromaticidade CIE 1931.....	40
4.2.4 Comprimento de onda dominante e pureza	41
4.2.5 Temperatura de cor: locus planckeano	42
4.2.6 Subespaços de cor.....	44
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	47
ANEXO A	49

1 INTRODUÇÃO

Este estudo tem como objetivo buscar o entendimento dos processos físicos que levam à formação de estímulos visuais que são comumente designados como cor. Para isto serão consideradas duas etapas de interesse: a) a interação da luz com a matéria e a resposta gerada pelos materiais e b) como se dá a caracterização desta resposta enquanto cor. Aspectos fisiológicos, biológicos e psicológicos ligados mais intimamente à percepção humana estarão fora do escopo, salvo conceitos básicos fundamentais necessários para a condução do estudo.

Sendo a cor um estímulo visual tão imediato, somos convenientemente dependentes de seu uso, de modo que o tema deste estudo é também economicamente significativo, uma vez que a indústria tem forte interesse nos processos de produção, reprodução e padronização das cores, sejam em materiais coloridos ou por meio de luz e telas de aparelhos eletrônicos.

A própria definição de cor, no entanto, não é unívoca e é usada de maneira indiscriminada no dia a dia, uma vez que pode assumir diferentes significados dependendo do contexto referido. Por exemplo, um químico a caracterizaria como pigmentos, tintas e materiais semelhantes. Um físico relacionaria o termo ao comprimento de onda (ou frequência) da luz e às propriedades óticas de um material ou a distribuição espectral da luz emitida ou refletida pelo corpo. Já um médico ou psicólogo focaria no entendimento da sensação experimentada conscientemente por um observador (MACADAM, 1985).

Segundo uma definição dada por Lozano (1978, p.188), cor:

[...] é o atributo da luz que faz corresponder univocamente a cada distribuição espectral uma sensação. Esta sensação está condicionada pela intensidade e duração do estímulo, o estado de adaptação do observador, a área da retina afetada e o contraste luminoso e cromático com que a percebe. (tradução nossa)

Neste trabalho o conceito explorado será aquele que diz respeito às características físicas de um objeto ou fonte luminosa, mais especificamente sua distribuição espectral. Deve-se salientar ainda que o inverso da definição dada por Lozano não é verdadeiro. Ao passo que cada distribuição espectral dará origem a uma única sensação de cor, cada sensação pode ser gerada por infinitas combinações espectrais.

Além disso, como apontado por Lozano, as características do aparelho visual do observador e as condições em que se dá a observação também influenciarão na percepção consciente da cor. Por este motivo, o capítulo dois deste trabalho foi dedicado a apresentar alguns aspectos fundamentais do aparelho visual humano e sua influência na visão em cores.

A busca pela compreensão do fenômeno das cores vem sendo material de pesquisa há milênios. Um dos primeiros estudos sobre o assunto tem origem na Escola Peripatética, fundada por Aristóteles na Grécia Antiga. O *De Coloribus*, atribuído a Teofrasto (371 a.C. – 287 a.C.), já elucidava o preto como a ausência de luz e as cores como provenientes da mistura de luzes com objetos, atribuindo a estes o papel de *tingir a luz* por eles refletida. Estas ideias se mantiveram em pauta até o século XVII, aproximadamente, quando Isaac Newton publicou seus estudos sobre o tema, onde mostrava que a luz branca era, na verdade, uma mistura de componentes coloridas. Os estudos de Newton deram início ao que é chamada de ciência da cor moderna (ARISTÓTELES; HETT, 1936; SHEVEL, 2003).

A colorimetria, como veio a ser designado posteriormente o estudo das cores, floresceu nos séculos subsequentes com os trabalhos de importantes cientistas como Christian Huygens e Sir Isaac Newton no século XVII e mais tarde no século XIX, considerado na era de ouro da colorimetria, Thomas Young, Hermann von Helmholtz e James Clerk Maxwell, bem como o escritor Johann Wolfgang von Goethe que se aventurou no ramo das ciências naturais publicando o *Zur Farbenlehre* (Teoria das Cores) em 1810 (SHEVELL, 2003). Há de se salientar, também, que em paralelo aos estudos "científicos" dos processos de formação de cores, realizados com abordagem sob o ponto de vista da química, da física ou da fisiologia, as cores sempre foram o centro de interesse de artistas plásticos, desde a pré-história, com as pinturas rupestres, até as artes geradas por computação gráfica. Embora o foco desses estudos artísticos tenham sido, e ainda sejam, os aspectos estéticos, estes envolveram muita experimentação e testes empíricos com corantes, pigmentos e texturas, motivando ainda hoje pesquisas na área.

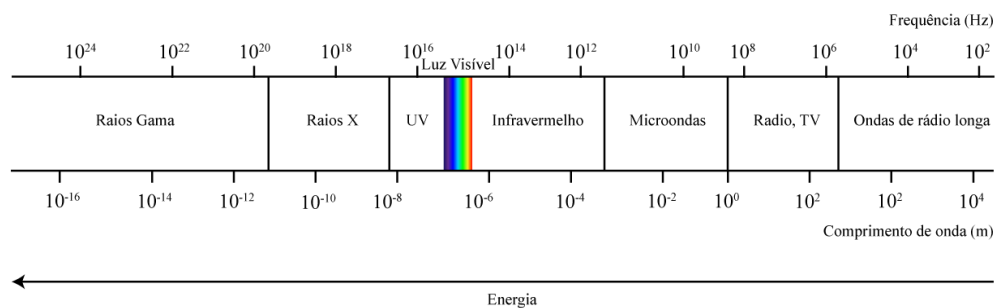
Mesmo estando em discussão há mais de dois mil anos, a compreensão e aperfeiçoamento no entendimento da visão em cores ainda é campo fértil para estudos e pesquisas, pois envolve diversas áreas: física, química, biologia, medicina, psicologia, além da engenharia, usada no desenvolvimento de tecnologias de imagem. Estudos recentes continuam a ser feitos, principalmente para a compreensão da visão, como o de Torrano (2007), ou buscando aperfeiçoamento da descrição da resposta do aparelho visual, como o de Sharpe et al. (2005) e o de Anstis (2000).

Desta forma, no capítulo três serão explorados os mecanismos físicos de produção de luz e de sua interação com a matéria, com especial destaque para o problema da radiação de corpo negro e, no capítulo quatro, serão apresentados modelos de caracterização destes estímulos enquanto cor, como os espaços RGB e XYZ e o diagrama de cromaticidade.

2 ASPECTOS FUNDAMENTAIS DO APARELHO VISUAL E DA VISÃO EM CORES

O aparelho visual humano é o conjunto de órgãos responsáveis pela captação e interpretação dos estímulos visuais, englobando do olho ao cérebro. Ele é sensível para comprimentos de onda do espectro eletromagnético que vão de 380 nm até 780 nm, aproximadamente, e é capaz de detectar níveis de intensidade luminosa desde alguns poucos quanta de luz até $10^6 - 10^9$ cd/m² (LOZANNO, 1978).

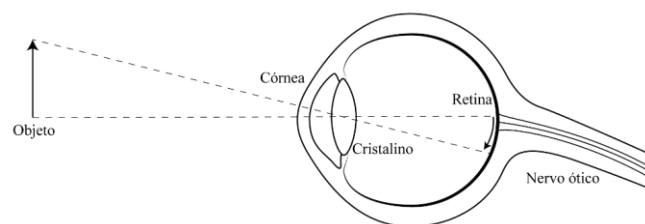
Figura 2.1 – Espectro Eletromagnético.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

De maneira bastante simplificada, podemos representar o aparelho visual como mostra a Figura 2.2:

Figura 2.2 – Representação simplificada do aparelho visual humano.



Fonte: adaptada de Murray (1952, p. 90).

Na figura são vistos: o sistema ótico, representado pela córnea e pelo cristalino, que funcionam como lentes e são responsáveis por captar os estímulos, a retina onde são projetados esses estímulos e onde se encontram as células receptoras fotossensíveis (cones e bastonetes) e o nervo ótico, que leva estes impulsos até o cérebro (não mostrado) onde serão interpretados e gerarão a sensação visual na mente.

2.1 ASPECTOS FISIOLÓGICOS DA VISÃO EM CORES

2.1.1 Células fotorreceptoras: Cones e Bastonetes

Através de processos químicos as células fotossensíveis presentes na retina são capazes de converter a energia luminosa dos estímulos visuais em sinais elétricos, interpretáveis pelo cérebro. Estas células são de dois tipos distintos: *cones* e *bastonetes*.

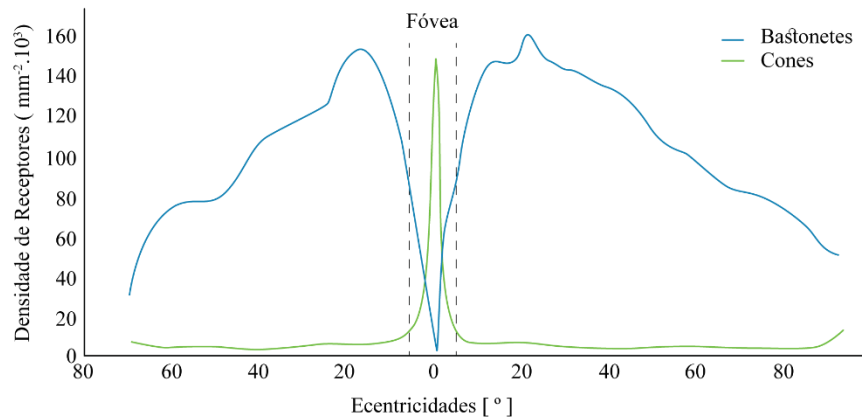
Os bastonetes possuem em sua composição uma proteína chamada rodopsina, também conhecida como púrpura visual, que é altamente sensível à luz, podendo ser estimulada por intensidades muito baixas de luz e tendo sua máxima sensibilidade próxima da região azul do espectro visível, embora não consiga distinguir diferentes cores. Os cones, cerca de cem vezes menos sensíveis, são de três tipos: L, M e S, sendo dotados de outros pigmentos fotossensíveis, com máximo de sensibilidade em diferentes faixas do espectro visível. Os picos de absorção máxima desses pigmentos são encontrados em torno dos comprimentos de onda de: 440-450nm (azul) para os cones do tipo S, 520-540nm (verde) para os cones do tipo M e 550-560nm (vermelho) para os cones do tipo L. Em média existem cerca de vinte bastonetes para cada cone na retina. Por este motivo os cones são entendidos como os responsáveis pela visão em cores e os bastonetes pela visão em baixa luminosidade (LOZANO, 1978; MUSTAFI; ENGEL; PALCZEWSKI, 2009).

Devido à diferença de sensibilidade entre cones e bastonetes, a visão pode ser dividida em: *fotópica*, correspondente a altos níveis de luminosidade e onde predominam a resposta dos cones, *escotópica* para baixos níveis de luminosidade, onde os bastonetes estão ativos e os cones não operam e *mesópica*, para níveis intermediários. Quantitativamente o regime escotópico é definido para o intervalo de estímulos desde alguns poucos quantas de luz até 10^{-3} cd/m², a partir do qual os bastonetes começam a saturar. O regime mesópico vai de 10^{-3} cd/m², quando começam a se tornar ativos os cones até 1 cd/m², a partir da onde a visão passa a ser considerada puramente fotópica (LOZANO, 1978).

Outra diferença entre cones e bastonetes diz respeito à sua distribuição. Há na parte central da retina uma região circular de aproximadamente 0,25mm de diâmetro, chamada *fóvea* onde são encontrados apenas cones. Ao se afastar dessa região, em direção as periferias, a concentração de cones diminui e a de bastonetes aumenta como mostra a Figura 2.3. Por este motivo, a visualização de detalhes e cores é favorecida em condições de alta luminosidade, uma vez que a porção central da retina possui uma grande concentração de cones. Em baixa luminosidade, não só a capacidade de resolver pequenos detalhes é prejudicada, como pode se

tornar impossível observar objetos diminutos e pouco iluminados, se olhados diretamente como uma estrela, por exemplo, já que ao fixar o olhar num objeto pequeno a sua imagem será projetada diretamente na fóvea que, por não possuir bastonetes, não é capaz de gerar resposta para baixas intensidades de estímulos óticos (BOUMA, 1947).

Figura 2.3 – Distribuição de Cones e Bastonetes na retina.



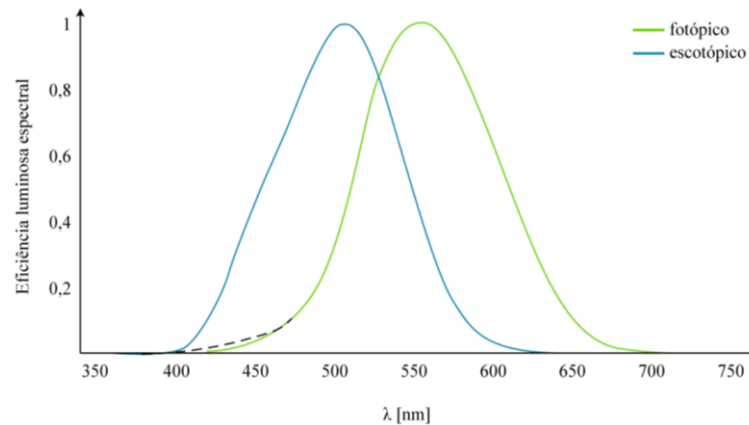
Fonte: adaptada de Musafi; Engel; Palczewski (2009).

2.1.2 Efeito Purkinje

Além da diferenciação quanto à intensidade da radiação, os regimes da visão escotópica e fotópica também apresentam distinção quanto à sensibilidade espectral. Este fenômeno recebe o nome de Efeito Purkinje, em homenagem ao fisiologista Johannes Evangelista von Purkinje (1787-1869) que o observou pela primeira vez em 1825 (ANSTIS, 2002).

Na Figura 2.4 estão representadas as curvas de sensibilidade fotópica e escotópica normalizadas e em função do comprimento de onda λ da radiação. Os máximos de sensibilidade ocorrem em 505 nm e 555 nm nos regimes das visões escotópicas e fotópicas, respectivamente. Isso resulta numa percepção diferenciada das cores condicionada pelo nível de intensidade luminosa das mesmas. Por exemplo, cores como laranja e vermelho, percebidas como mais intensas ao lado do azul no regime fotópico, serão percebidas como mais escuras no regime escotópico (LOZANNO, 1978).

Figura 2.4 – Curvas de eficiência luminosa para visão fotópica e escotópica normalizadas (CIE, 1931; CIE, 1951) em linha cheia e modificação introduzida por Judd, 1951; Vos, 1978, em linha pontilhada.



Fonte: Pegoraro (2016, p. 687).

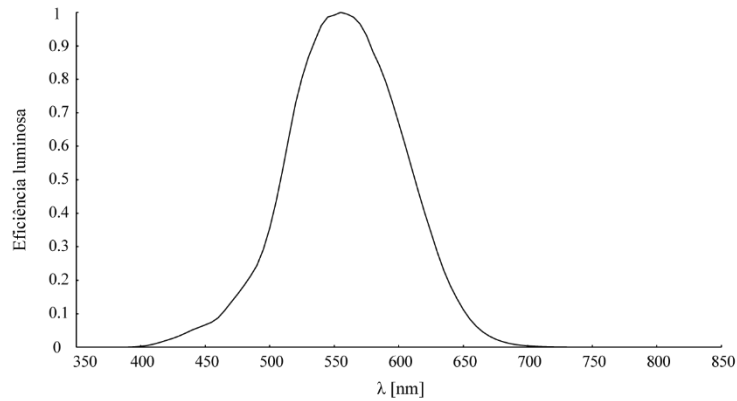
A partir destas características é razoável assumir que os conceitos a serem desenvolvidos neste estudo se darão no regime onde operam majoritariamente os cones (visão fotópica) e cujas observações sejam tais que se dão principalmente com a visão central e para níveis suficientemente altos de luminosidade ($>1\text{cd/m}^2$), quando não são considerados efeitos da visão periférica.

2.1.3 Curvas de resposta espectral

Mesmo dentro do regime de interesse definido anteriormente, a resposta do aparelho visual não é igual para todos os comprimentos de onda, sendo este muito mais sensível para aqueles que se encontram no centro do espectro visível do que para aqueles que se encontram nas extremidades (infravermelho e ultravioleta). A partir dos dados fornecidos por Sharpe et al (2005), obtidos experimentalmente para condição de luminosidade semelhante à da luz do dia padrão em média, foi construída a curva de sensibilidade luminosa mostrada na Figura 2.5.

Curvas como esta foram propostas pela Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) em 1924 como um parâmetro de correspondência entre a radiância de uma fonte luminosa e como se dava a percepção psicofísica desta por um observador padrão. O observador padrão para a colorimetria deve possuir visão não defeituosa (e.g. não daltônica) e representar em média a visão considerada normal na população dentro dos regimes fotópicos de iluminação. Dentro das definições de observador padrão também deve ser especificada a magnitude do campo visual utilizado na obtenção dos dados, por exemplo 2° , 4° ou 10° (SHEVEL, 2003).

Figura 2.5 - Curva de eficiência luminosa para luz do dia padrão e campo visual de 2^o.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

A Figura 2.5 ilustra que, por exemplo, a sensibilidade do olho para radiação a 555 nm é aproximadamente duas vezes maior que aquela para 510 nm, isto significa que duas vezes mais energia é necessária para estimular o aparelho visual em 510 nm do que é necessária para estimulá-lo em 555 nm. Esta curva, entretanto, nada diz a respeito da sensação de brilho experimentada por um observador. No exemplo dado, um observador real não perceberia a luz de 555 nm duas vezes mais brilhante que aquela de 510 nm para a mesma intensidade de energia de estímulo luminoso, uma vez que a sensação de brilho aparente está ligada a outros fatores, mais subjetivos, e não foi tomada como parte da obtenção destes dados (SHARPE et al, 2005; MURRAY, 1952).

2.2 FOTOMETRIA VERSUS RADIOMETRIA

Enquanto a radiometria trata a radiação de maneira igual e sem distinção (seja ela emitida por uma fonte ou transmitida/refletida por um objeto) a fotometria parametriza os estímulos através da resposta do aparelho visual. Embora tratem de conceitos equivalentes, as unidades envolvidas na fotometria foram criadas para e a partir de aplicações práticas. A Tabela 1 ilustra alguns desses conceitos e unidades (PEATROSS, 2015):

¹ Campo de visão correspondente a um tamanho angular de 2 graus.

Tabela 1 – Descrição do estímulo luminoso nos sistemas de Radiometria e Fotometria

Conceito	Radiometria	Fotometria
Quantidade de Luz	<i>Energia Radiante</i> joule [J]	<i>Energia luminosa</i> lumen · s
Quantidade de energia por unidade de tempo	<i>Fluxo ou potência radiada</i> joule · s ⁻¹ [W]	<i>Potência ou fluxo luminoso</i> lumen [lm] ²
Quantidade de energia por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido	<i>Intensidade radiante</i> W · sr ⁻¹	<i>Intensidade luminosa</i> lm · sr ⁻¹ = <i>candela</i> [cd]
Quantidade de energia por unidade de tempo por unidade de área	<i>Irradiância</i> W · m ⁻²	<i>Iluminância</i> lm · m ⁻² = <i>lux</i> [lx]
Quantidade de energia por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido por unidade de área	<i>Radiância</i> W · sr ⁻¹ · m ⁻²	<i>Luminância</i> lm · sr ⁻¹ · m ⁻² = <i>cd</i> · m ⁻²

Fonte: adaptada de Shevell (2003, p.43).

A conversão de unidades radiométricas para fotométricas se dá levando em conta os aspectos fisiológicos da resposta do aparelho visual. A seguinte equação pode ser utilizada para converter potência radiada [W] em potência luminosa [lm], no regime fotópico (LOZANO, 1978):

$$L = K \int \Phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda \quad (2.1)$$

Onde L é a potência luminosa fotópica em lumens [lm], K é uma constante igual a 683 $lm \cdot W^{-1}$, Φ é a potência radiada espectral em watts [W] e $V(\lambda)$ é a função de eficiência luminosa fotópica (plotada na Figura 2.5). A equação (2.1) mostra que se deve multiplicar a potência radiante espectral pela eficiência luminosa a fim de ponderar a resposta do aparelho visual para cada comprimento de onda. Para uma fonte monocromática a integral pode ser omitida (LOZANO, 1978; SHEVEL, 2003).

² 1 lumen = 1/683 W a 555 nm

3 LUZ E MATÉRIA: FORMAÇÃO DOS ESTÍMULOS

3.1 NATUREZA DA LUZ: ONDA OU PARTÍCULA?

Muitas foram as ideias e teorias que buscaram, ao longo da história, descrever os fenômenos óticos observados. Os gregos antigos, cerca de cinco séculos antes de Cristo, acreditavam que a luz seria constituída por raios luminosos e que estes se propagavam em linha reta. Por volta de 1000 d.C., o matemático árabe Alhazen deu início ao que é considerada a ótica moderna ao publicar seus estudos sobre lentes, espelhos e câmeras escuras. A concepção da luz enquanto raios luminosos, no entanto, usada ainda hoje para resolver problemas de ótica geométrica, perdurou até aproximadamente o século XVII. Nesta época, o avanço da ciência culminou em dois paradigmas concorrentes para descrever a natureza da luz: o corpuscular e o ondulatório. Entre os que defendiam a luz como constituída por partículas estava Isaac Newton (1642 – 1727), cuja notoriedade ajudou a abafar a concepção ondulatória, como defendida por Christiaan Huygens (1629 – 1695). Foi apenas no século XIX, quando Thomas Young publicou seus trabalhos sobre padrões de interferência para a luz, que o debate sobre a natureza ondulatória se reacendeu. Em 1845, Michael Faraday (1791 – 1867) ao verificar que a direção de polarização de um feixe podia ser alterada por um campo magnético intenso, estabeleceu a relação que viria a ser um marco para o entendimento da luz enquanto fenômeno eletromagnético e, a partir de seus trabalhos e de outros, James Clark Maxwell (1831 – 1879) foi capaz de sintetizar em apenas quatro equações, toda a descrição ondulatória do eletromagnetismo (HECHT, 2002).

No Final do século XIX Max Karl Ernst Planck (1858 – 1947), com seus estudos sobre a radiação de origem térmica emitida pelos corpos, verificou que suas distribuições espectrais não correspondiam àquelas previstas pelas teorias clássicas da termodinâmica e eletromagnetismo. A partir desses resultados, Planck introduziu as ideias que vieram ser a base da mecânica quântica, em particular, a quantização das energias, permitindo para estas, apenas valores múltiplos do quantum fundamental dado por $h\nu$, onde h é hoje conhecida como constante de Planck e ν é a frequência do oscilador. Nesta mesma época, Albert Einstein (1879 – 1955) em seu artigo “Concerning an Heuristic Point View Toward the Emission and Transformation of Light” de 1905, e que lhe rendeu o prêmio Nobel, colocou em discussão a visão eletromagnética clássica e propôs uma nova hipótese, na qual a luz deveria ser constituída

por pacotes discretos de energia bem definida, mais tarde chamados de *fótons*, cujas energias seriam $h\nu$, baseados no quantum fundamental proposto por Planck (HECHT, 2002).

3.2 FONTES DE LUZ

As fontes luminosas podem ser categorizadas segundo os mecanismos físicos que geram seu espectro, estando estas divididas, basicamente, em fontes térmicas e fontes não térmicas.

As fontes térmicas são aquelas cuja radiação emitida provém essencialmente da sua energia interna, dependendo apenas da temperatura absoluta do corpo. Nossa referência de luz por excelência, o Sol, é um radiador do tipo térmico. Podem-se citar também fornos a elevadas temperaturas e lâmpadas de filamento de tungstênio que transformam, através do efeito Joule, energia elétrica em energia luminosa, como radiadores térmicos.

Fontes não térmicas podem ter diferentes meios de gerar luz. Lâmpadas fluorescentes funcionam baseadas nos princípios de emissão de radiação espontânea de átomos excitados em uma descarga elétrica, cujas linhas espectrais mais intensas ocorrem na região ultravioleta do espectro, seguida da sua absorção por um material fluorescente depositado nas paredes internas da lâmpada, dando origem ao espectro característico deste material fluorescente. Os diodos emissores de luz, ou LEDs, podem emitir numa faixa muito estreita do espectro e o fazem a partir da estrutura de bandas de energia, características do estado sólido. A frequência do máximo da emissão e a largura da banda dependem das características da rede cristalina e dos átomos dopantes do material (LOZANO, 1978). Nos LEDs que emitem luz branca, que atualmente estão se tornando o padrão como fontes de iluminação, a luz violeta emitida pelo LED é absorvida por um material fluorescente que reemite uma banda larga de radiação cobrindo todo o espectro visível, semelhante às lâmpadas fluorescentes por descarga elétrica.

3.2.1 Radiadores térmicos: a radiação de corpo negro

Qualquer corpo com temperatura diferente do zero absoluto³ emite energia sob a forma de radiação eletromagnética. Para baixas temperaturas, até 600° C aproximadamente, a maior parte da radiação emitida encontra-se no infravermelho, sendo a parcela visível muito pequena para ser detectada. Os objetos em nosso dia a dia são vistos, então, graças à luz que

³ -273,16 °C ou Zero Kelvin

refletem e/ou transmitem e não por aquela que emitem. À medida que a temperatura aumenta, a emissão de luz com maiores frequências também cresce e os objetos podem se tornar visíveis graças a sua emissão própria.

Um corpo negro ideal é definido como um ente capaz de absorver toda a radiação que incide sobre ele, de modo que o seu espectro de emissão seja proveniente unicamente de sua energia térmica interna. Josef Stefan (1835 – 1893) e, posteriormente, Ludwig Boltzmann (1844 – 1906), encontram, de uma forma independente, uma relação empírica entre a potência total por unidade de área R radiada por um corpo negro e sua temperatura absoluta T (TIPLER, 1981):

$$R = \sigma T^4 \quad (3.1)$$

Onde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ é conhecida como constante de Stefan-Boltzmann. R é a Radiância (potência emitida por unidade de área) total, integrada para todos os comprimentos de onda. Também empiricamente, Wilhelm Wien (1864 – 1928) obteve uma relação entre o comprimento de onda onde há um máximo de emissão e a temperatura do corpo:

$$\lambda_{max} = \frac{2.88 \cdot 10^{-3} [\text{m}]}{T [\text{K}]} \quad (3.2)$$

A equação (3.2) é conhecida como Lei do Deslocamento de Wien e ilustra o fato de que a emissão máxima de radiação se dá em diferentes comprimentos de onda para diferentes temperaturas. Aqui é evidenciado o fato que o aumento da temperatura resulta na diminuição do comprimento de onda do máximo da distribuição, deslocando o espectro cada vez mais em direção ao violeta (maior frequência).

Até o final do século XIX, no entanto, todas as tentativas de explicar o fenômeno utilizando o que se conhecia de termodinâmica e teoria eletromagnética clássica falharam em algum ponto. Somente no ano de 1900, Max Planck propôs uma explicação consistente com os dados experimentais, assumindo para isto que a troca de energia na natureza não mais deveria ser vista como feita de forma contínua, mas quantizada em frações de uma unidade fundamental, que ele definiu como $h\nu$. Planck foi capaz, então, de estabelecer que a densidade de energia espectral de um corpo negro a uma temperatura T , segue uma distribuição da forma (EISBERG, 1979):

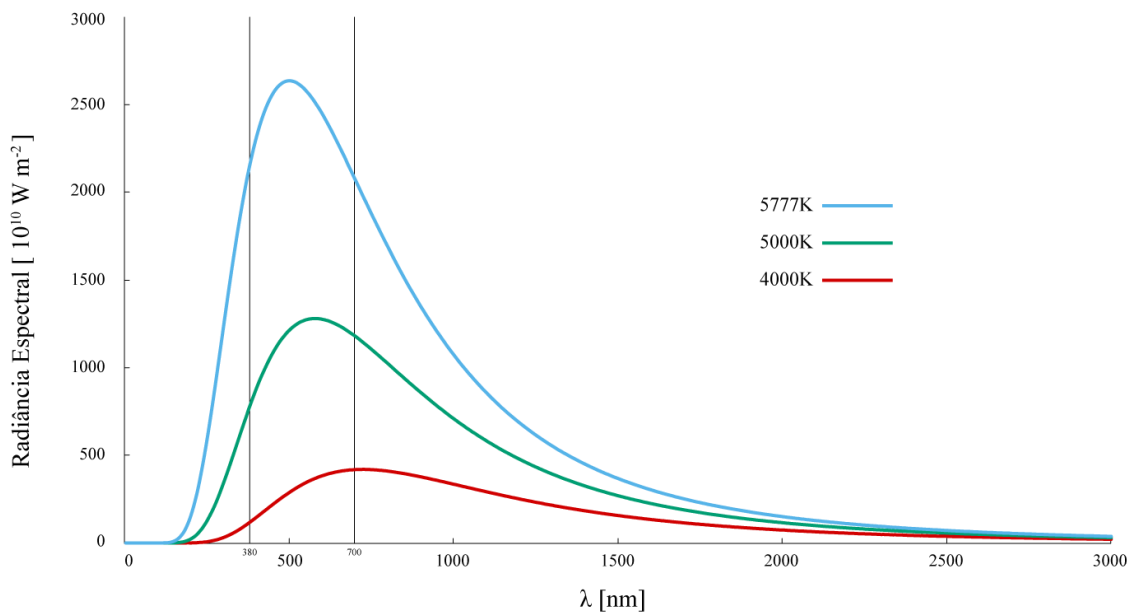
$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1} d\nu \quad (3.3)$$

A Radiação Espectral de um Corpo Negro ideal, ou seja, a potência emitida por unidade de área para a frequência ν , num intervalo de frequência $d\nu$, pode ser obtida multiplicando a expressão (3.3) por $c/4$ (um quarto da velocidade da luz c no vácuo) (TIPLER, 1981). Nesta expressão, h é a constante de proporcionalidade proposta por Planck, cujo valor é $h = 6,626070 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, ν é a frequência da oscilação e k_B é a constante de Boltzmann, que vale $1,38064852 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. A relação (3.3) também pode ser rescrita em termos do comprimento de onda, resultando em (DEMTRÖDER, 2006):

$$\rho_T(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} \quad (3.4)$$

A Figura 3.1 mostra a distribuição espectral contínua característica para algumas temperaturas de um Corpo Negro segundo a equação (3.4), também proporcional à Radiação Espectral, $R(\lambda)d\lambda$, de um Corpo Negro ideal à temperatura T :

Figura 3.1: Distribuição espectral da radiação de corpo negro para diferentes temperaturas.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Integrando a distribuição proposta por Planck para todas as frequências, ou comprimentos de onda, obtém-se a Lei de Stefan-Boltzmann, equação (3.1), e calculando o máximo da função (3.4) é encontrada a Lei do Deslocamento de Wien, equação (3.2).

A radiação de corpo negro é tão importante para o estudo e representação de cores que o termo *temperatura de cor* é amplamente utilizado. Por razões biológicas, evolutivas e históricas, a Luz do Sol foi adotada como a referência máxima para a identificação das cores. De modo que outra fonte luminosa qualquer tem seu espectro ou cor espectral associada, comparada àquela da luz solar. Isto decorre também do fato de que o espectro solar na região espectral visível (380-780nm) é aproximadamente plano (igual intensidade para todos os comprimentos de onda). Esta característica do espectro solar é conhecida como luz branca (LOZANO, 1978).

3.2.2 Radiadores não térmicos

Ao absorver energia, átomos e moléculas podem ser levados a estados excitados ou serem ionizados, perdendo um ou mais elétrons. Ocorrendo ionização, os íons gerados se recombinarão com algum dos elétrons que estarão em excesso no meio, resultando também em átomos com algum dos seus estados excitados. Os estados resultantes não estarão em equilíbrio com a temperatura termodinâmica T do meio. O equilíbrio desses estados, no entanto, é instável e os átomos acabam voltando para estados de menor energia, em uma cascata até alcançarem o estado fundamental. Ao fazerem isso, a energia excedente, $\Delta E = E_2 - E_1$, é liberada sob a forma de um quantum de radiação para cada salto quântico entre dois níveis de energia. Segundo a teoria quântica, a frequência ν dessa radiação (ou fótons) será diretamente proporcional a essa diferença de energia:

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \quad (3.5)$$

Onde h é a constante de Planck. A relação 3.5 foi proposta por Niels Henrick David Bohr (1885 – 1962) como um dos postulados do seu famoso modelo atômico, no qual as energias das órbitas dos elétrons ao redor do núcleo, os respectivos raios orbitais e momentum angular são quantizados. Bohr introduziu, assim, o primeiro modelo atômico quântico, ainda que baseado em fundamentos da física clássica. Este modelo atômico quantizado teve o mérito

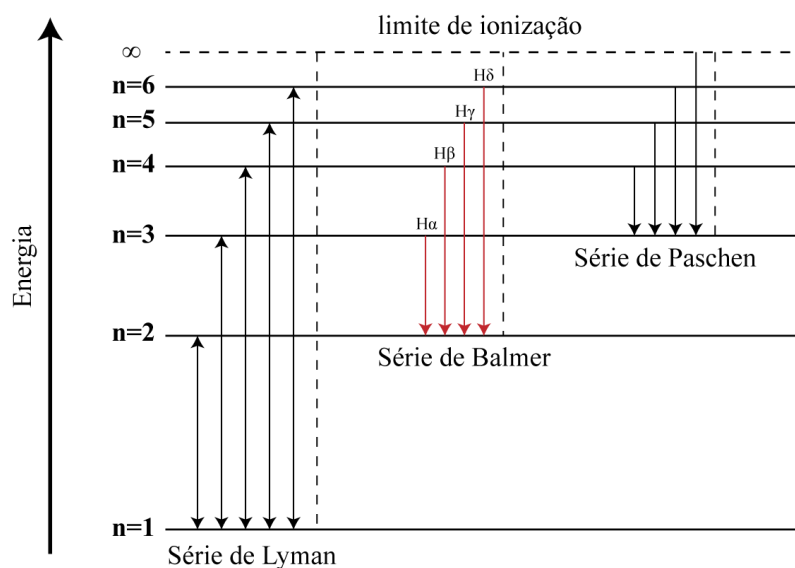
de reproduzir os resultados observados pelos espectroscopistas para os espectros até então conhecidos do átomo de Hidrogênio e de átomos hidrogenóides.

Em 1888 Johannes Robert Rydberg (1854-1919) já havia antecipado uma expressão que dava conta de descrever os comprimentos de onda nas linhas espectrais observadas para certos átomos, especialmente o átomo de hidrogênio, que posteriormente pôde mais bem compreendida à luz da teoria quântica (LOZANO, 1978):

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} Z^2 \left[\frac{1}{(n_1)^2} - \frac{1}{(n_2)^2} \right] \quad (3.6)$$

Onde R_{∞} é a constante de Rydberg e vale $R_{\infty} = 1,097373110^7 \text{ [m}^{-1}\text{]}$, Z é o número atômico do elemento, n_1 e n_2 são números inteiros associados aos estados iniciais e finais da transição. No modelo atômico quantizado, n_1 e n_2 são os números quânticos associados respectivamente ao estado inicial e final da transição. Para um átomo de hidrogênio, por exemplo, para transições que ocorram a partir de $n_1 = 3$ é obtida a série espectral conhecida como Série de Paschen, que se encontra no infravermelho. Para transições partindo de $n_1 = 2$, a série espectral ocorre na região do visível e recebe o nome de Balmer. Já as emissões que ocorrem a partir de $n_1 = 1$ dão origem a Série de Lyman, que está na região do ultravioleta. A Figura 3.2 ilustra algumas dessas transições.

Figura 3.2 – Esquema simplificado de transições para o átomo de hidrogênio



Fonte: adaptada de Demtröder (2006, p.111).

Cabe ressaltar que, apesar do modelo de Bohr datar do início do século XX, a mecânica quântica moderna confirma estes resultados com maior precisão e fundamentação teórica, trazendo adicionalmente informações sobre quais transições serão permitidas, ou não, através da emissão ou absorção de quanta de luz, mesmo quando sejam permitidas pela lei de conservação de energia sob a forma da equação (3.6). A não observação de algumas transições se deve ao fato de que, além da conservação de energia, as transições também devem conservar momentum angular e spin eletrônico, além de estarem submetidas a outras regras de simetria e seleção, impostas pelos estados quânticos que caracterizam os elétrons e fótons envolvidos nos processos. A especificidade de tais condições, embora de suma importância, foge ao caráter explanatório deste estudo. Mais detalhes podem ser encontrados em (DEMTRÖDER, 2006) e na literatura.

Nos LEDs (diodos emissores de luz), a radiação é originada num processo de transições radiativas entre bandas de energia eletrônicas na junção de dois semicondutores preparados com diferentes átomos dopantes (PUREUR, 2010). A frequência do máximo, assim como a largura da banda espectral emitida, dependerá da diferença entre as energias das bandas de valência e de condução na junção do semicondutor, que por sua vez, depende do material semicondutor e dos dopantes adicionados a este material.

3.3 INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

3.3.1 Resposta de um meio material à radiação eletromagnética

A concepção da luz enquanto fenômeno eletromagnético clássico permite desenvolver um modelo relativamente simples para explicar a sua absorção e reflexão por meios materiais, que são origem de muitas propriedades óticas, entre elas a cor e aparência de objetos. Por este motivo, partindo das equações fundamentais de Maxwell para o eletromagnetismo, em sua notação diferencial:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_{livres} \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = J_{livres} \quad (3.10)$$

Em que

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \mathbf{E} \quad (3.11)$$

$$\mu_0 \mathbf{H} = \mathbf{B} + \mathbf{M} \quad (3.12)$$

Onde \mathbf{D} , \mathbf{E} , \mathbf{B} , e \mathbf{H} representam os campos deslocamento elétrico, campo elétrico, indução magnética e campo magnético respectivamente. Enquanto \mathbf{P} , a polarização, é a função resposta de um meio ao ser submetido a um campo elétrico e \mathbf{M} , a magnetização, é a resposta do meio a campos magnéticos. Já ρ_{livres} é a densidade de cargas livres no espaço, J_{livres} descreve a mobilidade da densidade de cargas, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ é a permeabilidade magnética no vácuo, $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N}} \cdot \text{m}^2$ é a permissividade elétrica no vácuo, ε é a permissividade no elétrica do meio e χ é a susceptibilidade elétrica do meio. A permissividade e a susceptibilidade elétrica do meio estão ambas relacionadas diretamente com o índice de refração do meio. Todas as propriedades óticas de um meio, ou seja, a resposta do meio à radiação eletromagnética, está contida nestas três constantes:

$$(1 + \chi) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \tilde{n}^2 \quad (3.13)$$

O índice de refração $\tilde{n} = n_r + in_i$, assim como ε e χ , são grandezas descritas por números complexos. A parte real de \tilde{n} , $n_r = \text{Re}\{\tilde{n}\} = c/v$, corresponde à razão entre c , a velocidade da luz no vácuo, e v , a velocidade da luz no meio.

É possível encontrar para um campo elétrico num meio genérico e não magnético uma equação da onda da forma (PEATROSS, 2015):

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} - \frac{1}{\varepsilon_0} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{P}) \quad (3.14)$$

Se agora considerarmos o meio como homogêneo e na ausência de correntes de cargas livres a equação (3.14) se reduz a:

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.15)$$

Em que o lado direito é zero no regime de vácuo, uma vez que a polarização é propriedade de meios materiais. Para um meio genérico a equação (3.15) assume soluções da forma:

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 e^{i(k \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi)} \quad (3.16)$$

$$P(\mathbf{r}, t) = P_0 e^{i(k \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi)} \quad (3.17)$$

Onde as amplitudes E_0 e P_0 são constantes reais, ω a sua frequência angular, φ é uma constante que representa a fase inicial da onda. Já $\mathbf{k} \equiv 2\pi/\lambda \hat{\mathbf{u}}$ é o seu vetor de onda, $\lambda = \lambda_0/\tilde{n}$ é o comprimento de onda no meio de índice de refração \tilde{n} , λ_0 é o comprimento de onda no vácuo, \mathbf{r} o vetor posição e $\hat{\mathbf{u}}$ um vetor unitário na direção de propagação.

Utilizando as relações descritas em (3.11) e (3.13), a equação da onda (3.15), que descreve uma onda se propagando em um meio de índice de refração \tilde{n} , pode ser reescrita na forma:

$$\nabla^2 E - \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \nabla^2 E - \left(\frac{\tilde{n}}{c}\right)^2 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (3.18)$$

Como já mencionado, as propriedades óticas do meio são representadas pelo índice de refração $\tilde{n} = n_r + in_i$. Como \tilde{n} é uma grandeza complexa, o vetor de onda k , presente nas soluções da equação da onda acima, representadas por (3.16) e (3.17), também o será:

$$k = k_r + ik_i \quad (3.19)$$

Onde $|k_r| = 2\pi/\lambda_0 n_r$ e $|k_i| = 2\pi/\lambda_0 n_i$. O campo elétrico $E(\mathbf{r}, t)$ dado pela equação (3.16) pode, então, ser reescrito como:

$$E(\mathbf{r}, t) = E_0 e^{-k_i \cdot \mathbf{r}} e^{i(k_r \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi)} \quad (3.20)$$

Como aplicação da expressão acima, pode-se calcular a atenuação da intensidade luminosa ao percorrer uma distância x (medida na direção de propagação da onda), em um meio de índice de refração $\tilde{n} = n_r + in_i$:

$$I(x) = c\varepsilon_0|E|^2 = c\varepsilon_0|E_0|^2 e^{-2k_i x} = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.21)$$

Onde, $I_0 = c\varepsilon_0|E_0|^2$ é a intensidade da luz ao entrar no meio e $\alpha = 2|k_i| = 4\pi/\lambda_0 n_i$ é o coeficiente de atenuação do meio. A expressão (3.21) é conhecida como Lei de Beer-Lambert, importante na análise química de técnicas espectroscópicas e também na definição de cores, especialmente nas superfícies cobertas por tintas à base de corantes e pigmentos.

Conforme mostra a expressão (3.21), a absorção da radiação por um meio está associada à parte imaginária n_i do índice de refração do meio. Por outro lado, a parte real n_r , do índice está relacionada às propriedades de propagação da radiação no meio, determinando a sua velocidade e explicando as propriedades de reflexão e refração da luz.

Para um meio transparente à passagem da radiação eletromagnética (luz) de frequência angular ω , o valor de n_i é aproximadamente nulo, seu valor torna-se significativo apenas quando a frequência ω se aproxima de uma das frequências ω_0 de ressonância do meio. O valor da parte real do índice de refração também irá variar com a frequência da radiação, também devido à presença de frequências ressonantes no meio. Esta dependência da parte real do índice de refração com a frequência da radiação, $n_r(\omega)$, explica o fenômeno de dispersão da luz, observado por Newton ao decompor a luz solar (branca) em suas componentes com a ajuda de um prisma.

Para entender a dependência do índice de refração com a frequência ω da radiação que interage com um meio, é reproduzido abaixo o modelo proposto por Paul Drude (1863 – 1806) em 1900 e aperfeiçoado por Hendrik Antoon Lorentz (1853 – 1928) em 1905. Neste modelo, os autores descrevem classicamente a resposta de uma distribuição de cargas em um meio na presença de um campo oscilando com frequência ω , ao se propagar através dele.

Para um meio linear, a polarização depende linearmente da intensidade do campo elétrico local e assume a forma (PEATROSS, 2015):

$$P_0(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) E_0(\omega) \quad (3.22)$$

A relação acima é uma expressão macroscópica da reação do meio na presença de um campo elétrico de frequência ω . O índice de refração $\tilde{n} = n_r + in_i$ está relacionado à susceptibilidade elétrica $\chi(\omega)$ através da expressão (3.13).

Drude e Lorentz desenvolveram um modelo simples que determina a susceptibilidade $\chi(\omega)$ e sua conexão com o campo elétrico e a polarização, utilizando para isto o conceito de osciladores harmônicos clássicos. Consideraram, para tanto, que o meio possuía átomos (ou moléculas) com apenas alguns elétrons livres para responder à aplicação de um campo externo, ainda que ligados ao núcleo, estando estes distribuídos uniformemente pelo material e com uma densidade N de elétrons por unidade de volume. Dessa forma, propôs descrever a polarização como:

$$P = q_e N r_\mu \quad (3.23)$$

Onde q_e é a carga do elétron e r_μ é o deslocamento microscópico do elétron de sua posição de equilíbrio. A polarização tem unidades de momento de dipolo/volume [C/m²]. Considera-se aqui que a força do campo elétrico aplicado é uniforme sobre toda a extensão do átomo, essa consideração é razoável uma vez que o comprimento de onda da luz incidente é muito maior que os típicos raios atômicos (para luz visível). Dessa forma, as forças que atuam sobre o elétron podem ser descritas como as de um oscilador harmônico amortecido:

$$m_e \ddot{r}_\mu = q_e E - m_e \gamma \dot{r}_\mu - K r_\mu \quad (3.24)$$

Aqui temos representadas: a força $q_e E$ que o elétron experimenta devido ao campo elétrico; uma força de arrasto que se opõe a esse movimento, caracterizada pela constante γ e uma força restauradora na forma da lei de Hooke, que tem origem na ligação entre o elétron e o núcleo, cuja constante K , assim como γ , são características do sistema. Substituindo o campo E por aquele da forma da equação (3.16) é possível encontrar como solução para (3.24) (PEATROSS, 2015):

$$r_\mu = \frac{q_e}{m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - i\omega\gamma - \omega^2} \right) E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (3.25)$$

Onde $\omega_0 \equiv \sqrt{K/m_e}$ é a frequência natural de oscilação associada ao sistema. Verifica-se a partir dessa equação, também, que o elétron é posto a oscilar com a mesma frequência do

campo que incide sobre ele ($e^{i(k \cdot r - \omega t)}$). O termo imaginário no denominador corresponde a uma diferença de fase entre as oscilações do campo e do elétron. A polarização será então, segundo a equação (3.23):

$$P = \frac{q_e^2 N}{m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - i\omega\gamma - \omega^2} \right) E_0 e^{i(k \cdot r - \omega t)} \quad (3.26)$$

Desta relação decorre a expressão complexa para a susceptibilidade do material:

$$\chi(\omega) = \frac{q_e^2 N}{\varepsilon_0 m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - i\omega\gamma - \omega^2} \right) \quad (3.27)$$

Combinando esta expressão com a equação (3.13) obtém-se uma expressão para o índice de refração complexo:

$$(\tilde{n})^2 = (n_r + in_i)^2 = 1 + \frac{q_e^2 N}{\varepsilon_0 m_e} \left(\frac{1}{\omega_0^2 - i\omega\gamma - \omega^2} \right) \quad (3.28)$$

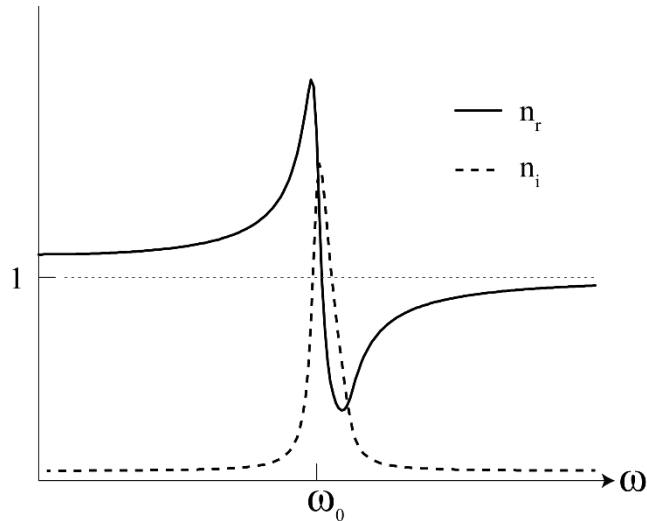
Dessa expressão pode-se separar as partes real e imaginária do índice de refração \tilde{n} :

$$n_r(\omega) \cong 1 + \left(\frac{q_e^2 N}{2\varepsilon_0 m_e} \right)^2 \left(\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2} \right) \quad (3.29)$$

$$n_i(\omega) \cong \left(\frac{q_e^2 N}{2\varepsilon_0 m_e} \right)^2 \left(\frac{\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma^2} \right) \quad (3.30)$$

Uma representação gráfica da parte real e imaginária de $\tilde{n} = n_r + in_i$ é mostrada na Figura 3.3:

Figura 3.3 – Representação gráfica da parte real e imaginária do índice de refração.



Fonte: adaptada de Peatross (2015, p.51).

Os termos n_r e n_i correspondem, respectivamente, às partes real e imaginária do índice de refração. Este modelo simples dá conta de explicar as propriedades de dispersão e absorção em um meio dielétrico com uma única frequência ressonante, porém pode ser facilmente estendido para um sistema com múltiplas ressonâncias em meios dielétricos.

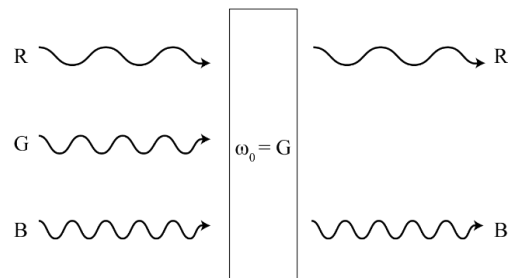
3.3.2 Cor por absorção de luz

A polarização, neste ponto, já é suficiente para evidenciar o caráter distintivo que um sistema tem ao interagir com radiação de diferentes frequências ω . Verificamos, a partir de (3.26) que, para radiação com $\omega = \omega_0$, a resposta do meio é máxima, levando também a um máximo de absorção de energia naquela frequência.

Para frequências distintas de ω_0 , o sistema responderá de maneira a funcionar essencialmente como um dipolo que é posto a oscilar na mesma frequência do campo original, porém com uma fase diferente. Desta forma, os dipolos irão reemitir a luz com a mesma frequência do campo, onde cada átomo se comporta como uma fonte de ondas esféricas, que irão interferir entre si e se propagar como frentes de onda adequadas, segundo o Princípio de Huygens, dando origem aos fenômenos da reflexão e da refração da luz por materiais e também ao fenômeno de espalhamento (HECHT, 2002; MURRAY, 1952).

Se, por exemplo, uma luz percebida como branca é posta a interagir num meio cuja frequência de ressonância dos elétrons é ω_0 , a componente da luz com frequência em torno desta frequência, presente na luz incidente, será parcial ou totalmente absorvida, como previsto pela lei de Beer-Lambert e o restante das frequências serão apenas reemitidas, assim a luz refletida (ou transmitida, no caso de um material translúcido) terá uma *banda de absorção* na região do espectro em torno de ω_0 , resultando na percepção de um objeto de aparência colorida. A Figura 3.4 ilustra esse processo para um material translúcido, cuja frequência de ressonância corresponde à cor identificada como verde, neste caso o objeto tem aparência rosada (magenta):

Figura 3.4 – Absorção seletiva devida à frequência de ressonância.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Nos vidros e cristais as ressonâncias correspondentes às absorções, que originam as cores e demais propriedades óticas, decorrem de transições eletrônicas em impurezas presentes nestes materiais. Estas impurezas, que geram as cores, normalmente são átomos ou íons presentes em pequenas concentrações nestes materiais, cujas frequências de ressonância se encontram na região espectral correspondente à luz visível. Nos corantes e pigmentos utilizados na produção de tintas, as propriedades óticas, incluindo as absorções que originam as suas características de cores decorrem de transições eletrônicas em moléculas orgânicas que contêm cadeias conjugadas de carbonos, i.e., uma sequência de átomos de C ligados por ligações simples e duplas alternadamente (MURRAY, 1952).

Verifica-se que a energia necessária para excitar os elétrons dessas substâncias diminui conforme cresce a complexidade e o número de átomos de C na cadeia conjugada. Assim, para moléculas mais simples contendo apenas um anel benzênico, por exemplo, as energias necessárias são tão altas que a absorção só ocorre para radiação ultravioleta, tornando essas moléculas transparentes à luz visível. Conforme cresce a cadeia conjugada, a energia para que ocorra absorção diminui e o fenômeno passa a ocorrer na região visível do espectro. A Tabela

2 traz exemplos de substâncias e sua cor aparente associada, segundo a complexidade de suas cadeias moleculares:

Tabela 2 – Compostos contendo anéis benzênicos e suas cores aparentes

Substância	Maior λ da banda de absorção	Cor aparente
Benzeno (C ₆ H ₆)	Ultravioleta distante	Incolor
Naftalina (C ₁₀ H ₈)	Ultravioleta	Branco
Antraceno (C ₁₄ H ₁₀)	Ultravioleta próximo	Branco
Tetraceno (C ₁₈ H ₁₂)	Azul-Verde	Laranja brilhante
Pentaceno (C ₂₂ H ₁₄)	Verde-Laranja	Roxo-vermelho profundo ⁴

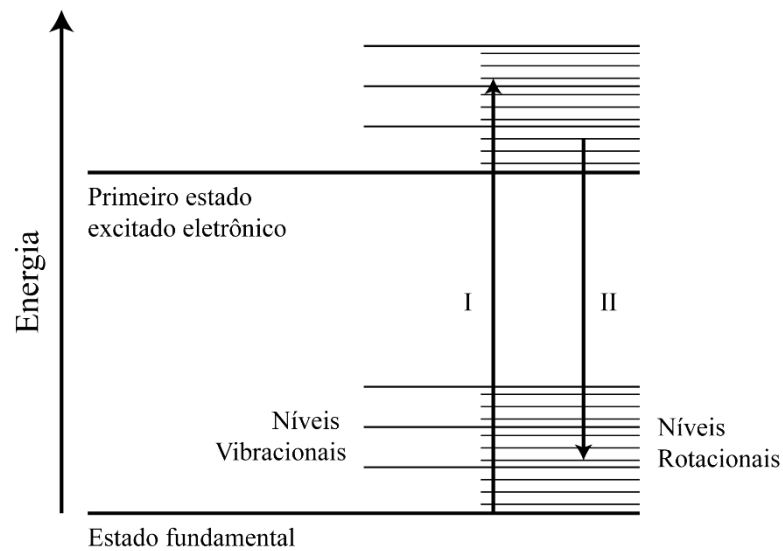
Fonte: Murray (1952, p.80).

Até agora, apenas a resposta de elétrons excitados foi tratada, entretanto, a energia interna de moléculas pode ser descrita segundo mais dois tipos modos de energia: *vibracional* e *rotacional*. A energia vibracional de uma molécula está associada a oscilações na estrutura das ligações químicas entre os átomos. Dependendo do número de átomos na molécula, e o arranjo espacial destes átomos estas moléculas, podem apresentar um ou mais graus de liberdade para oscilação, correspondendo cada um a uma diferente energia fundamental de oscilação e, portanto, a diferentes frequências de oscilação. Já a energia rotacional é relativa à rotação como um todo da molécula através de um eixo que passe por seu centro de gravidade. Dependendo também da estrutura da molécula, esta poderá girar em torno de cada um dos três eixos espaciais com diferentes momentos de inércias, gerando para cada um deles diferentes níveis de energia rotacional. Normalmente as transições entre níveis de energia vibracionais ou rotacionais, dentro do mesmo estado eletrônico, correspondem a frequências de ressonância localizadas na região espectral do infravermelho, não influenciando nas propriedades de cor destes materiais. No entanto, uma molécula pode rotar e vibrar simultaneamente em qualquer um dos seus estados eletrônicos. A energia de cada estado será a soma dos três termos, i.e., $E =$

⁴ O descolamento da banda de absorção para o vermelho é entendido como “aprofundar a cor”. O termo usado é *deslocamento batocrômico*. O processo reverso, deslocamento da banda para menores comprimentos de onda, é denominado *deslocamento hipsocrômico*.

$E_{el} + E_{vib} + E_{rot}$. Como consequência, em contraste com as transições eletrônicas em átomos, que geram espectros de absorção e de emissão na forma de linhas estreitas, nas moléculas estas transições eletrônicas, devido às estruturas de níveis de energias vibracionais e rotacionais, aparecerão não só como bandas largas de absorção, que irão conferir as propriedades de cor do material, mas também podendo mostrar correspondentes bandas de emissão, que aparecerão na forma de fluorescência ou de fosforescência. A Figura 3.5 esquematiza os níveis de energia vibracional e rotacional para dois estados eletrônicos distintos (DEMTRÖDER, 2006; MURRAY 1952):

Figura 3.5 – Diagrama de energia para estados eletrônicos, vibracional e rotacional.



Fonte: adaptada de Murray (1952, p.71).

A cor, portanto, é um fenômeno que decorre das transições entre estados eletrônicos nos átomos ou moléculas. Na Figura 3.5 estão representadas as transições I (absorção) e II (emissão) entre os mesmos estados eletrônicos, porém para níveis vibracionais e rotacionais diferentes. Em ambos os processos, o quantum de energia (fóton) absorvido (em I) ou emitido (em II) são relacionados às diferenças de energia dos estados inicial e final pela expressão (MURRAY, 1952):

$$h\nu = W_2 - W_1 = \Delta E_{el} + \Delta E_{vib} + \Delta E_{rot} \quad (3.31)$$

Os processos representados na Figura 3.5 também podem descrever um processo de fluorescência, no qual um quantum de energia mais alto, violeta ou ultravioleta, é absorvido a

partir dos níveis de energia vibracional/rotacional mais baixo, no estado eletrônico fundamental, para níveis vibracionais/rotacionais mais elevados no estado eletrônico excitado. Após o decaimento para níveis vibracionais/rotacionais mais baixos, do estado eletrônico excitado, poderá haver uma emissão de um quantum de luz de comprimento de onda maior (na região espectral visível), terminando com a molécula em níveis vibracionais/rotacionais mais altos acima do estado fundamental. Os processos de fluorescência, descritos acima, de forma simplificada, são importantes em iluminantes como as lâmpadas fluorescentes e LEDs emissores de luz visível. As transições entre níveis de energia vibracional ou rotacional, tanto no estado excitado, como no estado fundamental podem se dar por processo radiativo, com emissão ou absorção de radiação na faixa espectral infravermelha, mas também através de processos de troca de energia não radiativa, como, por exemplo, por colisão entre moléculas. Estes processos podem gerar aquecimento das moléculas do meio (MURRAY, 1952).

3.3.3 Cor por espalhamento e interferência

Além da absorção seletiva, outros processos físicos podem dar origem a estímulos visuais coloridos. A seguir serão discutidos brevemente dois deles: o espalhamento e a interferência.

No processo de **espalhamento**, um meio que contenha partículas em suspensão, mesmo que estas não possuam frequência de ressonância na região do visível, ainda pode resultar em uma sensação visual colorida. Isto ocorre porque, assim como descrito anteriormente, a nuvem eletrônica nas moléculas comporta-se como osciladores harmônicos que são postos a oscilar na mesma frequência da luz incidente, reemitindo fótons idênticos aos absorvidos. Neste caso, os fótons são considerados como que espalhados elasticamente, pois sua energia não muda durante o processo. Este processo de reemissão de fótons depende da posição das moléculas no espaço e da polarização da luz incidente.

John William Strutt (1842-1919), conhecido também como Lord Rayleigh, estudou este fenômeno utilizando como modelo de osciladores moleculares e verificou que a intensidade com que ocorria dependia inversamente da quarta potência do comprimento de onda incidente. Matematicamente (NAVE, 2005):

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta) \quad (3.32)$$

Onde I é a intensidade da luz espalhada, I_0 é a intensidade do feixe incidente, N é o número de centros espalhadores no meio, α é a constante de polarizabilidade do meio, a qual depende das dimensões (raio r) dos centros espalhadores e do índice de refração do meio, R é a distância do observador até o centro espalhador e θ é o ângulo em que a luz é espalhada. A condição para o uso deste modelo de Rayleigh é que a dimensão (raio r) dos centros espalhadores seja tal que $r \ll \lambda$.

Conforme a expressão (3.32), as moléculas na atmosfera espalham muito mais as frequências mais altas (comprimentos de onda menor) provenientes da luz solar, dando ao céu sua cor azul característica do dia e do alaranjado do fim da tarde, onde a maior distância percorrida pela luz até um observador faz com que as componentes azuis já tenham sido subtraídas, restando um excesso de componentes laranja e amarela na luz transmitida (HECHT, 2002).

Outro fenômeno também responsável por conferir cores a objetos é a **interferência**. Nele, uma diferença de fase nas ondas refletidas (ou transmitidas) em duas ou mais superfícies pode ocasionar o cancelamento de certas frequências que chegam a um observador, resultando numa sensação visual colorida. Esta diferença de fase ocorre para uma diferença de caminho ótico percorrido pelo feixe luminoso ao ser refletido (ou transmitido) nas diferentes superfícies do material. Se a diferença de fase for tal que $\sigma = \pm\pi, \pm3\pi, \pm5\pi, \dots$ a interferência será totalmente destrutiva, resultando no aniquilamento da frequência de onda para o qual esta ocorreu. Para $\sigma = 0, \pm2\pi, \pm4\pi, \dots$ a interferência entre as ondas será totalmente construtiva, resultando num máximo de intensidade para luz daquela frequência. Para diferenças de fase com valores intermediários, a interferência será parcialmente construtiva ou destrutiva (HECHT, 2002).

Através da interferência é possível gerar filmes antirreflexivos para serem aplicados em lentes de óculos e instrumentos óticos, produzir filtros e espelhos com transmissividade ou refletividade seletiva para determinadas faixas espectrais. Através da interferência se obtém também o efeito "metálico" de algumas tintas, bem como a iridescência observada nas asas de algumas borboletas e penas de algumas aves.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS ESTÍMULOS

Mesmo que nada possa se dizer a respeito da composição espectral de um estímulo, um observador é capaz de descrever toda e qualquer sensação de cor a partir de três parâmetros (BOUMA, 1947; LOZANO, 1978):

- a) Matiz;
- b) Saturação;
- c) Brilho.

O Matiz é a diferença essencial entre as cores, passando gradualmente pelo vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, violeta, etc. Estímulos aos quais não se possa atribuir um matiz são chamados *acromáticos* e correspondem às sensações de branco e preto (sendo os tons de cinza resultado da variação do brilho entre essas duas sensações). Saturação é a propriedade que, fixado o matiz, diz quão próxima a cor está de sua forma espectral pura. Por exemplo, pode-se passar de um vermelho vívido, por tons cada vez mais pálidos de rosa, até chegar ao branco variando-se a sua saturação.

De modo geral, Brilho é a propriedade que regula a quantidade de luz que chega a um observador, mantendo inalterada sua distribuição espectral, i.e., tornando possível associar a uma cor uma correspondência numa escala de cinza (LOZANO, 1978).

4.1 COLORIMETRIA TRICROMÁTICA

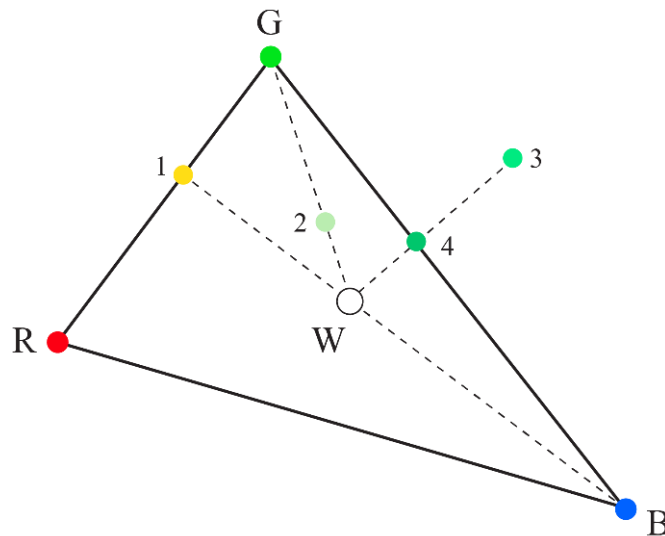
A colorimetria, assim como a fotometria, estuda os estímulos luminosos a partir da forma como estes são percebidos pelo aparelho visual. Ela se baseia no princípio fundamental de que qualquer sensação de cor pode ser simulada pela combinação de três outras cores ditas primárias. A escolha desse conjunto de primárias é arbitrária, desde que elas respeitem a condição de serem mutuamente independentes, i.e., nenhuma delas pode ser obtida como combinação das outras duas.

Na colorimetria tricromática, o espectro do estímulo é descrito por três números que dizem como este é capaz de estimular os três tipos de cones fotorreceptores sensíveis a comprimentos de onda curtos (S), médios (M) e longos (L) (LOZANO, 1978; SHEVEL 2003).

4.1.1 O triângulo de cor

Uma maneira simples de observar o princípio tricromático é definir num plano uma superfície que, escolhida uma base, seja capaz de representar diferentes sensações de cor. Por exemplo, na Figura 4.1 escolhemos Vermelho [R], Verde [G] e Azul [B] como vértices de um triângulo. A linha que liga dois dos pontos da base é entendida como contendo as sensações de cor obtidas a partir da mistura dessas duas cores primárias (e.g. ponto 1). Todas as sensações de cor que possam ser simuladas a partir dessa base são pontos dentro do triângulo (BOUMA, 1947).

Figura 4.1: Triângulo de cor.



Fonte: adaptada de Bouma (1947, p. 54).

O ponto W corresponde à sensação de branco e é alcançado através da mistura adequada dos três elementos da base. Ilustrando o conceito de saturação temos o ponto 2 que representa a sensação de um verde pouco saturado, resultante da mistura do verde espectral [G] com branco. Já o ponto 3, externo ao triângulo, simboliza uma sensação de cor mais saturada que aquelas que podem ser obtidas misturando-se [G] e [B] e deve, portando, descrever uma cor espectral pura, uma vez que se adicionado a ela branco pode-se obter a sensação de cor do ponto 4. Assim, linhas que ligam uma cor qualquer ao ponto W descrevem sensações que possuem o mesmo matiz, porem com diferentes níveis de pureza, i.e., decrescendo em saturação conforme se aproximam do branco.

4.1.2 Leis de Grassmann

Em 1853, Hermann Günther Grassmann (1809 – 1877) propôs três leis que, embora hoje se saiba possuírem limitações em sua aplicabilidade, formaram a base para a construção técnico-científica da colorimetria atual (LOZANO, 1978).

Sendo uma base de fontes primárias [R], [G] e [B] cujas intensidades são dadas por r , g e b , respectivamente, a primeira lei atesta que potência radiante c de uma cor [C] é equivalente à soma das potências r , g e b das fontes [R], [G] e [B]. Matematicamente:

$$c[C] \equiv r[R] + g[G] + b[B] \quad (4.1)$$

A segunda lei diz que se a intensidade da radiação que produz uma sensação de cor [C] é multiplicada por fator n a sensação [C] não se altera. Matematicamente:

$$nc[C] \equiv nr[R] + ng[G] + nb[B] \quad (4.2)$$

E, por fim, a terceira lei diz que a soma de dois estímulos de cor, representados pelos primários [R], [G], [B] é igual à soma termo a termo das componentes dos primários de cada estímulo. Matematicamente sejam $c_1[C_1] \equiv r_1[R] + g_1[G] + b_1[B]$ e $c_2[C_2] \equiv r_2[R] + g_2[G] + b_2[B]$, então

$$c_1[C_1] + c_2[C_2] \equiv (r_1 + r_2)[R] + (g_1 + g_2)[G] + (b_1 + b_2)[B] \quad (4.3)$$

4.1.3 Tristímulus

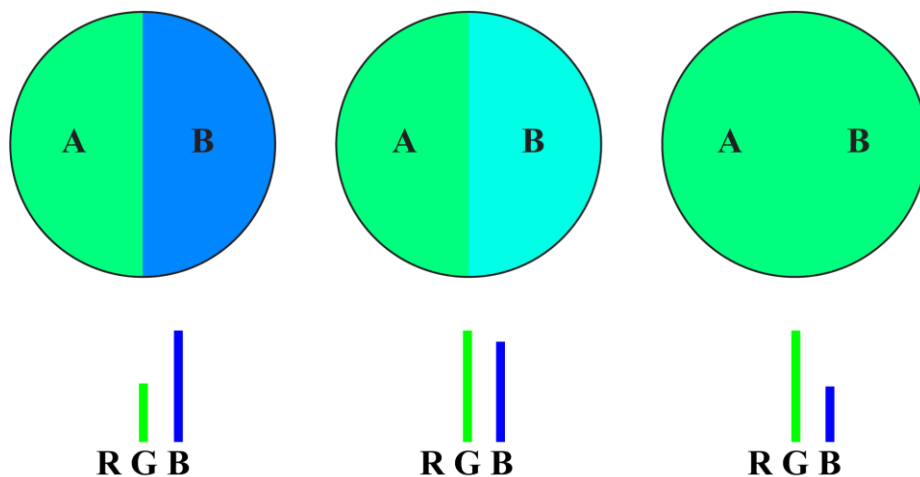
A partir dos estudos conduzidos por W. D. Wright (1928-9) e J. Guild (1931) a CIE, em 1931, foi capaz de obter um conjunto de parâmetros para as intensidades de uma base que fosse capaz de gerar todas as sensações das cores espectrais (LOZANO, 1978).

O conceito fundamental utilizado nos experimentos para a aquisição destes dados consistia em fazer com que um observador olhasse através de um instrumento ótico cujo campo visual está dividido em duas partes: uma com um estímulo amostra que se deseja corresponder e a outra com a luz combinada de três fontes primárias, cujas intensidades podiam ser controladas individualmente. Assim, variando a intensidade das fontes primárias até que a

diferença entre os segmentos do campo visual desaparecesse e, registrando esses valores, foi possível obter uma combinação única dos parâmetros capaz de reproduzir a sensação do estímulo amostra. Esses valores foram chamados de *tristímulus* (MACADAM, 1985).

Cabe notar que, independente da base escolhida, nem todas as sensações são possíveis de serem reproduzidas por adição das primárias. Em alguns casos é necessário utilizar uma quantidade *negativa* de pelo menos uma delas. Uma quantidade negativa de uma primária é obtida iluminando com ela o lado oposto do campo visual iluminado pelas outras duas, ou seja, iluminando com ela o lado do estímulo padrão que se deseja corresponder. Dessa forma, ela se combina com o estímulo e a sensação resultante pode ser igualada pela combinação das outras duas. A Figura 4.2 ilustra o princípio de variar um estímulo B até que este corresponda a um estímulo A no campo visual:

Figura 4.2 – Correspondência entre duas regiões no campo visual.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

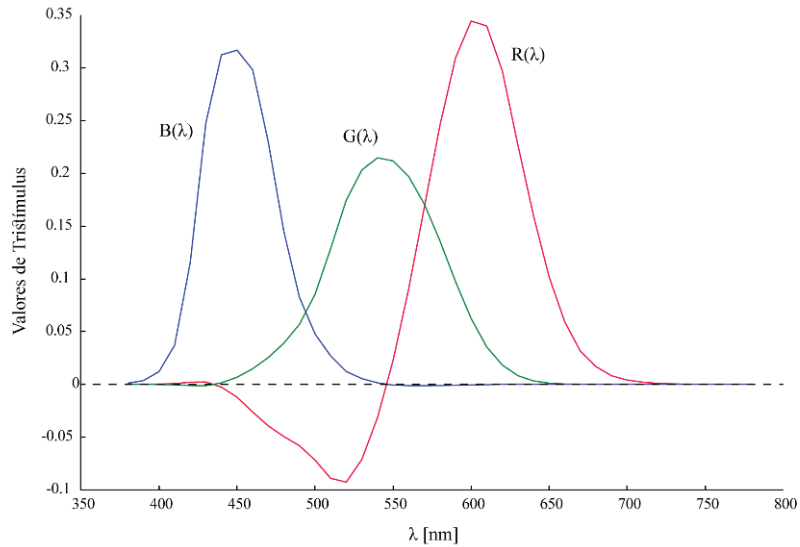
Utilizando como amostra fontes de luz monocromáticas e varrendo o espectro visível em incrementos de 10 nm, a CIE determinou as funções para os tristímulus como mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4, a partir dos dados obtidos por Wright e Guild⁵ para observações feitas num campo visual de 2°. As funções fornecem os valores dos tristímulus necessários para reproduzir a sensação de um watt de potência luminosa no comprimento de onda especificado.

Nos estudos conduzidos por Guild e Wright, as primárias escolhidas foram fontes de luz monocromáticas reais com comprimentos de onda: 460 nm, 530 nm e 650 nm para Wright e

⁵ Disponíveis no Anexo A

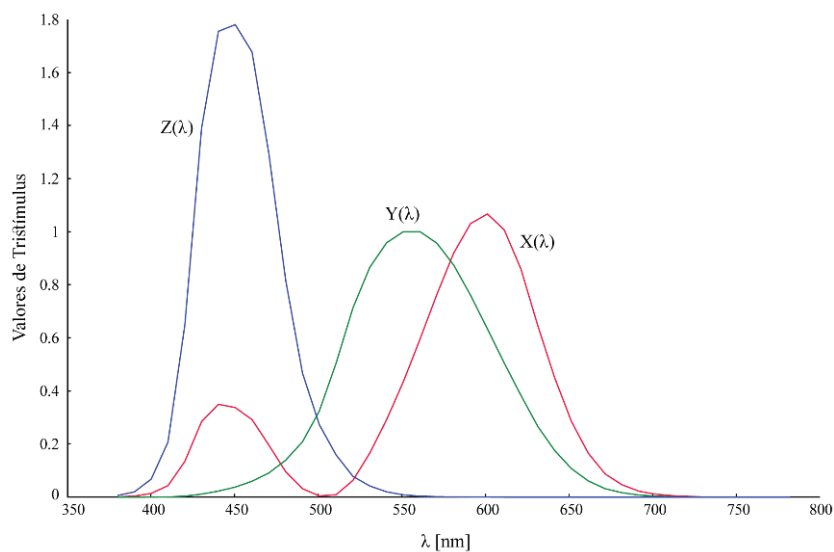
450 nm, 537 nm e 630 nm para Guild que, apesar de diferirem, foram representadas numa base comum proposta pela CIE: [B] = 435,8 nm, [G] = 546,1 nm e [R] = 700 nm, graças às propriedades lineares de aditividade asseguradas pelas leis de Grassmann (LOZANO, 1978).

Figura 4.3 – Valores dos tristímulus RGB por watt de comprimento de onda para o observador padrão da CIE (1931) para campo visual de 2°.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Figura 4.4 – Valores dos tristímulus XYZ por watt de comprimento de onda para o observador padrão da CIE (1931) para campo visual de 2°.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Os valores dos tristímulos XYZ, todos positivos, foram obtidos fazendo uma escolha de base adequada, a partir de uma transformação linear da base RGB. As primárias que descrevem, entretanto, são ditas imaginárias ou ideais por não serem fontes de luz espectrais reais.

4.1.4 Princípio da aditividade e cálculo das coordenadas dos tristímulus

Considerando o princípio da aditividade da terceira lei de Grassmann, equação (4.3), é possível decompor qualquer sensação de cor, seja ela proveniente de uma fonte contínua ou discreta, na soma das componentes espectrais que a constitui. Assim, analogamente ao que foi feito no capítulo dois para converter a potência radiada de uma fonte na sensação de potência luminosa percebida por um observador, equação (2.1), é possível obter as coordenadas dos tristímulos de uma fonte conhecendo-se a função que descreve seu fluxo espectral $\Phi(\lambda)$. As coordenadas RGB, por exemplo, tomam a forma:

$$R = K \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.4)$$

$$G = K \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi(\lambda) \cdot G(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.5)$$

$$B = K \int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.6)$$

Onde K é uma constante e vale $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ e $R(\lambda)$, $G(\lambda)$ e $B(\lambda)$ são as curvas de resposta para os tristímulus, plotadas na Figura 4.3.

Os cálculos apresentados acima para fontes luminosas podem ser estendidos para objetos que não emitem luz. Todos os materiais, sejam sólidos líquidos ou gasosos, possuem a propriedade de absorver radiação eletromagnética, transmitindo e/ou refletindo a porção que não absorveram, sendo esta característica descrita por suas funções de *transmitância* $T(\lambda)$ e *reflectância* $R(\lambda)$, que são independentes da composição espectral da fonte que os ilumina (LOZANO, 1978).

Dessa forma, a quantidade de luz que é transmitida ou refletida por uma superfície quando iluminada por uma fonte luminosa com fluxo, ou potência radiada, espectral $\Phi(\lambda)$ será, respectivamente:

$$\Phi_T = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi(\lambda) \cdot T(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.7a)$$

$$\Phi_R = \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4.7b)$$

Que usados no lugar de $\Phi(\lambda)$ nas equações 4.4-6 fornecerão os valores dos tristímulus para a luz transmitida e refletida pelo objeto, respectivamente.

Fica evidente, então, que um mesmo objeto iluminado por fontes luminosas com diferentes composições espectrais (luz do dia, lâmpada de tungstênio, luz de vapor de mercúrio, etc) apresenta a um observador diferentes sensações de cor, embora suas propriedades físicas permaneçam inalteradas. Portanto, a cor de um objeto não é definida unicamente por suas características físicas, mas também pelo espectro da radiação que o ilumina (BOUMA, 1947; LOZANO, 1978).

4.2 ESPAÇOS DE COR

Com a possibilidade de decompor os estímulos coloridos em uma base de fontes primárias é natural definir um espaço gerado por elas. Nestes espaços, cujas bases podem ser escolhidas arbitrariamente, é possível localizar as sensações coloridas e identificar as coordenadas que as definem, assim como em posse das coordenadas pode-se determinar a sensação visual que resultam.

4.2.1 O Sistema de coordenadas XYZ da CIE de 1931

Apesar de ter permitido a especificação de cores de maneira objetiva, o sistema RGB apresentou alguns inconvenientes práticos: não era possível determinar a luminosidade da cor de maneira direta e como existiam valores de tristímulos negativos, a determinação das cores poderia se tornar ainda menos direta (LOZANO, 1978).

Assim, buscando uma maior simplicidade nos cálculos práticos, a CIE propôs o sistema XYZ de coordenadas. O conjunto de primárias que representam, no entanto, não são luzes concebíveis e por vezes são ditas “fontes imaginárias” ou “fontes ideais”, escolhidas de modo a conter todas as cores espectrais dentro da área que definem no espaço. A transformação dos dados e escolha das primárias foi feita ainda tal que a função Y fosse equivalente à função de eficiência luminosa fotópica $V(\lambda)$, de modo que as primárias X e Z contenham toda a informação cromática da cor, possuindo, porém, luminância igual a zero (BOUMA, 1947; SHEVEL, 2003).

4.2.2 Decomposição da sensação de cor em luminosidade e cromaticidade

Fazendo a escolha da primária Y coincidir com a curva de eficiência luminosa $V(\lambda)$ a característica trivariante da sensação de cor pôde ser, então, decomposta em dois aspectos fundamentais: *luminosidade* e *cromaticidade*, uma vez que apenas um dos primários carrega a informação de luminosidade, enquanto os outros dois correspondem ao aspecto cromático da sensação. A coordenadas cromáticas são definidas como (LOZANO, 1978; MACADAM, 1985):

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4.8)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (4.9)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (4.10)$$

De modo que

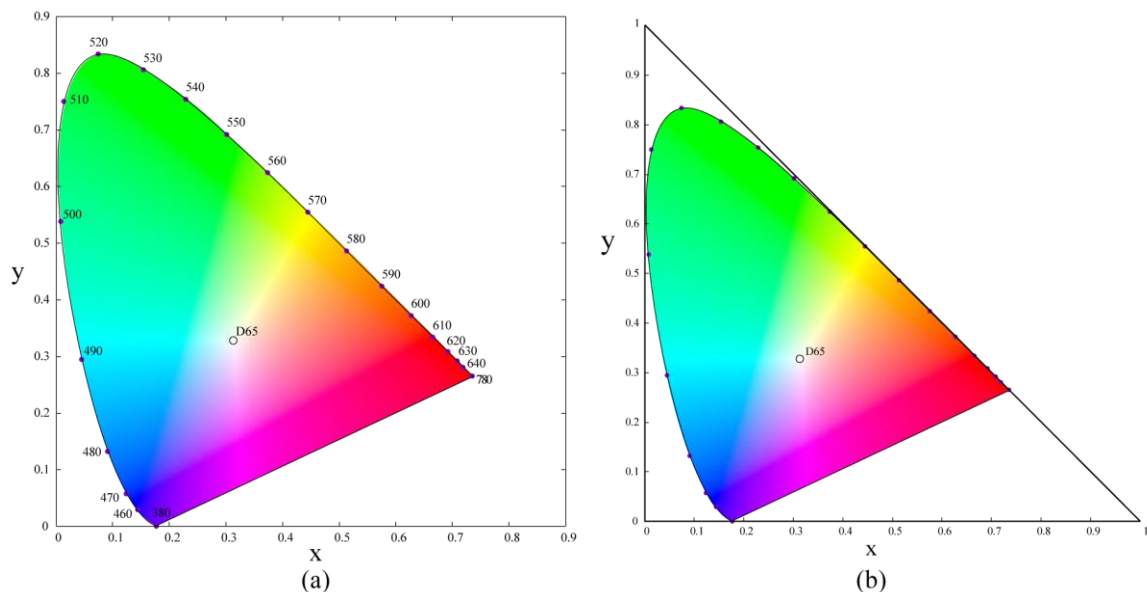
$$x + y + z = 1 \quad (4.11)$$

Da onde se verifica que apenas duas delas são linearmente independentes. É comum, no entanto, o uso da notação y para a coordenada z , de modo que as coordenadas de cromaticidade sejam denotadas por (x, y) , mantendo-se para a luminosidade o valor e notação do tristímulo Y .

4.2.3 Diagrama de cromaticidade CIE 1931

A partir da definição das coordenadas (x,y) de cromaticidade, os espaços de cores, antes tridimensionais, como por exemplo RGB e XYZ, puderam ser simplificados numa representação 2D. Utilizando os valores para X , Y e Z , disponíveis no Anexo A, e as equações 4.8-11 pode-se calcular os valores de x e y que resultam na forma:

Figura 4.4 – Diagrama de Cromaticidade CIE 1931.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

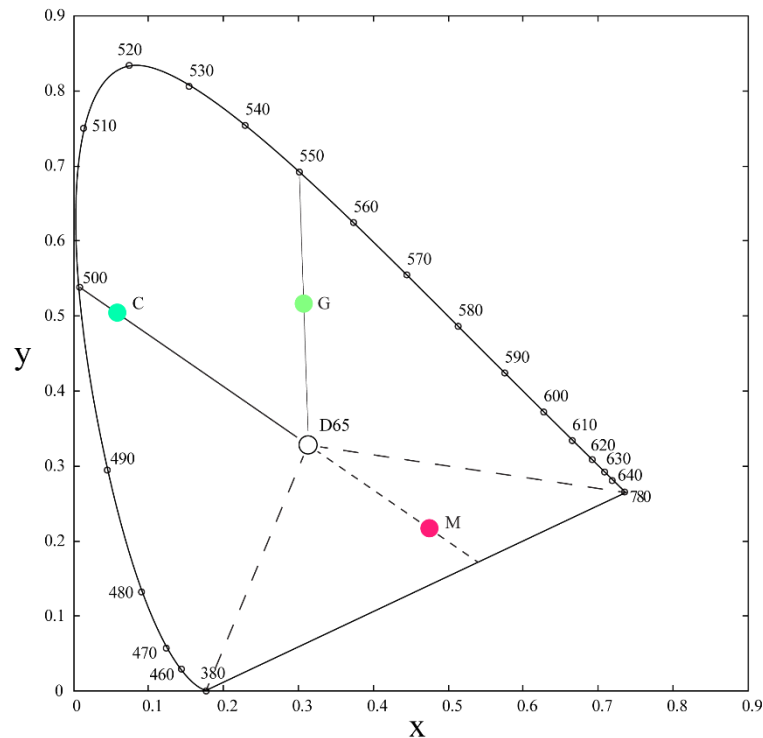
A Figura 4.4 (a) mostra que as cores espectrais, representadas pelos comprimentos de onda associados, definem uma forma cuja área representa toda a gama de cores reais, uma vez que toda a sensação de cor deve ser resultado da combinação de componentes espectrais. Na linha que liga os comprimentos de onda 380 nm a 780 nm estão os tons de roxo e magenta que não existem no espectro visível, sendo estas sensações causadas pelo estímulo simultâneo de mais de um comprimento de onda. O ponto $D65$ no diagrama representa as coordenadas do

Iluminante Padrão *D65* da CIE e define um ponto de referência para o branco, equivalente à radiação de um corpo negro a temperatura de aproximadamente 6500 K. Na figura 4.4 (b) está explicitada a escolha das primárias situadas nos pontos (0,0), (1,0) e (0,1), que definem um triângulo retângulo no qual estão contidas todas as cores espectrais (MACADAM, 1985; SHEVEL, 2003).

4.2.4 Comprimento de onda dominante e pureza

O Diagrama de Cromaticidade permite determinar também os *comprimentos de onda dominante* (λ_d) e *complementar* (λ_c) para cada cor localizada dentro dele. É possível descrever uma sensação cromática através da mistura de uma cor espectral pura e o ponto de branco adotado como referência. A Figura 4.5 mostra os pontos C e G, cujas linhas que os ligam ao ponto branco D65 intercepta cada uma um comprimento de onda. Esse comprimento de onda é o comprimento de onda dominante dessas cores: $\lambda_d = 500 \text{ nm}$ para o ponto C e $\lambda_d = 550 \text{ nm}$ para o ponto G:

Figura 4.5 – Comprimentos de onda Dominante e Complementar.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

As linhas que interceptam os pontos C e G contêm todas as sensações de cor associadas aos respectivos λ_d , diferenciando-se apenas na *pureza* da sensação. Definindo a pureza da cor espectral como 100% e a do ponto branco 0%, a distância entre o ponto da cor avaliada nesta escala define sua pureza (p). No exemplo da Figura 4.5: $p_C \sim 83\%$ e $p_G \sim 51\%$. Matematicamente a pureza pode ser escrita como:

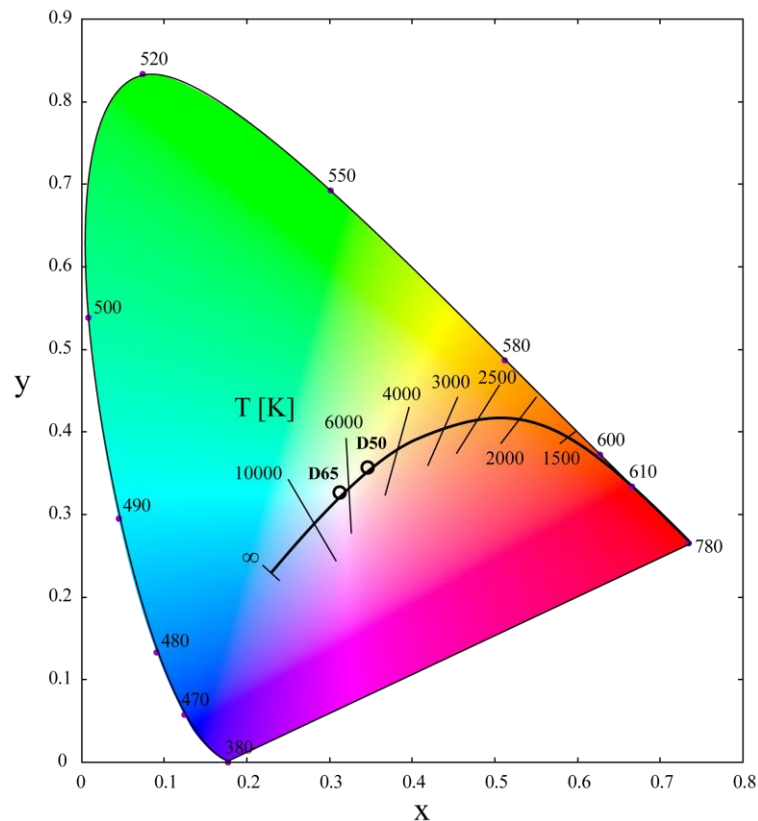
$$p = \frac{|\overline{AB}|}{|\overline{A\lambda}|} \cdot 100\% \quad (4.12)$$

Onde A representa o ponto de branco escolhido e B o ponto de cor no diagrama que se deseja avaliar, sendo $|\overline{AB}|$ o módulo da distância entre A e B e $|\overline{A\lambda}|$ o módulo da distância entre A e λ . Ainda na Figura 4.5, está representado o ponto M, que se encontra na região dos roxos e magentas (abaixo das linhas pontilhadas), ao qual não é possível associar um único comprimento de onda. Neste caso, convencionou-se o uso do comprimento de onda complementar λ_c , que representa o comprimento de onda da cor espectral que subtraída do branco gera a sensação pretendida. Nesse exemplo M possui $\lambda_c = 500nm$ e sua pureza pode ser determinada definindo como 100% puras as sensações que se encontram na linha que liga 380 nm a 780 nm no diagrama. Dessa forma pode-se estimar a pureza de um roxo ou magenta avaliando a sua distância em relação ao branco e a linha de tons puros, assim como feito anteriormente para o comprimento de onda dominante. A cor do ponto M da Figura 4.5 possui $p_M \sim 70\%$ (LOZANO, 1978; MACADAM 1985).

4.2.5 Temperatura de cor: locus planckeano

A partir do espectro emitido por um corpo negro é possível calcular a sensação de cor que este assume para um observador. Assim, utilizando-se o método descrito na seção 4.1.4, pode-se encontrar a posição exata da sensação colorida em um dado espaço. Na figura 4.6 está representada uma curva com pontos referentes a diversas temperaturas no diagrama de cromaticidade xy de 1931:

Figura 4.6 – Locus planckeano no diagrama de cromaticidade xy da CIE de 1931.



Fonte: adaptada de MacAdam (1985, p. 29).

As linhas retas transversais presentes na figura são chamadas de *linhas de isotemperatura* e representam sensações de cor que podem ser associadas à temperatura que interceptam no locus. A figura mostra também os pontos dos iluminantes padrão D65 e D50, que são associados às temperaturas de 6504 K e 5003 K, respectivamente. Cabe notar, no entanto, que a temperatura associada a uma sensação de cor nem sempre corresponde à temperatura real do objeto ou fonte luminosa. Por exemplo, o céu azul tem temperatura associada de aproximadamente 20000 K, mesmo estando o ar na atmosfera muito mais (MACADAM, 1985).

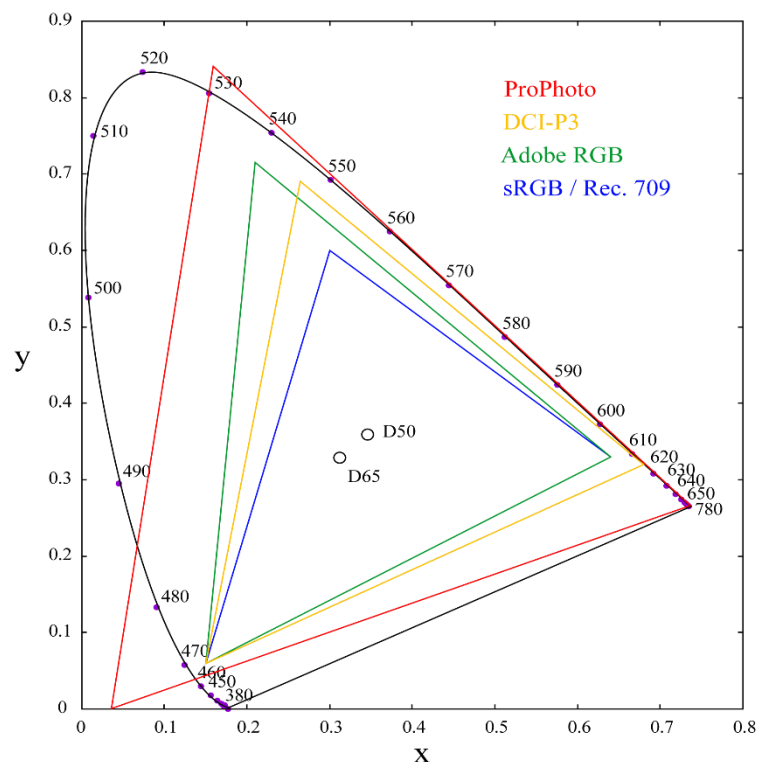
É interessante notar também que, diferentemente da terminologia popular, “cores quentes” como a cor vermelha, laranja e amarela estão associadas a corpos negros com temperaturas mais baixas do que “cores frias”, como azul e verde. Ou seja, quanto maior a temperatura associada, mais deslocada para o azul estará a sensação de cor e quanto menor a temperatura, mais deslocada para o vermelho.

4.2.6 Subespaços de cor

O Diagrama de Cromaticidade define um espaço onde se encontram todas as sensações de cor visíveis para o observador padrão, como definido pela CIE. A totalidade destas sensações, no entanto, não é reproduzível por sistemas físicos, uma vez que estes devem escolher uma base de primárias reais e, portanto, mais limitada que aquelas idealizadas que definiram o diagrama. A escolha de uma base real, então, gera um subespaço dentro do diagrama, que engloba as sensações reproduzíveis a partir dela.

A Figura 4.7 mostra alguns subespaços criados pela indústria numa tentativa de padronizar e melhorar a reprodução de cores em diferentes contextos. O primeiro padrão a ser largamente adotado foi o sRGB (Santard RGB), proposto por engenheiros da HP (Hewlett-Packard) e da Microsoft em 1996 (e atualizado em 1999) numa tentativa de padronizar a reprodução de cores em monitores de CRT (Tubo de raios Catódicos), TVs, scanners, câmeras digitais e sistemas de impressão. A base de primárias utilizada para este subespaço define também o subespaço utilizado para reprodução de cores para HDTV (High Definition Television), também chamado de Rec. 709, como recomendado pela ITU (International Telecommunication Union). Este espaço abrange cerca de 35% das sensações de cores visíveis.

Figura 4.7 – Subespaços dentro do Diagrama de Cromaticidade da CIE 1931.



Fonte: elaborada pelo autor (2017).

Em 1998, a Adobe Systems criou o subespaço Adobe RGB para suprir a demanda de um espaço que fosse capaz de reproduzir melhor as cores usadas em mídia impressa, quando estas fossem visualizadas em meios digitais, como monitores, por exemplo, utilizando um sistema de primárias RGB. Este subespaço é capaz de reproduzir aproximadamente 50% do espectro de cores visíveis.

Definido pela Digital Cinema Initiatives (DCI) em 2010, o subespaço DCI-P3 foi criado para ampliar e padronizar a gama de cores adotada pela indústria cinematográfica e televisiva. Está dentro dos subespaços ditos de “ampla gama” e cobre cerca de 45% das cores possíveis no diagrama de cromaticidade.

Por fim, a Figura 4.7 mostra ainda o subespaço ProPhoto RGB, ou ainda ROMM RGB, o único exemplo a utilizar uma base onde nem todas as primárias são cores reais (apenas uma delas se encontra dentro da área definida pelo diagrama). Este espaço foi desenvolvido no final dos anos 1990 pela Kodak Research Laboratories, também no intuito de ampliar a gama de cores disponíveis para processamento de imagens digitais e impressas. É o único da lista também a não utilizar o ponto D65 como branco padrão, adotando o iluminante D50 para este fim.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram investigados os mecanismos físicos de produção de luz e de sua interação com a matéria, no âmbito de gerar estímulos visuais coloridos. Os aspectos fisiológicos da visão foram considerados apenas no nível necessário para a condução do estudo. Posteriormente, foram abordados métodos para representar e caracterizar as cores, como os espaços de cor XYZ e diagrama de cromaticidade xy da CIE. A definição de tais espaços de cor permitiu, também, atribuir de forma objetiva um comprimento de onda e/ou uma temperatura associada à radiação de corpo negro a uma sensação visual colorida.

Pôde-se verificar que as teorias e modelos que dão conta de descrever o aspecto físico do problema estão bem estabelecidos, já o entendimento da resposta do aparelho visual e seu funcionamento, embora num estágio avançado de desenvolvimento, ainda pode ser aperfeiçoado, como mostram os trabalhos de Kawamura e Tachibanaki (2008) e Mustafi, Engel e Palczewski (2009). Isto confere ao problema da visão em cores um status atual. Conclui-se, então, que a percepção consciente experimentada por um observador de estímulos coloridos é, acima de tudo, um fenômeno psicofísico, cujos aspectos inerentes ao aparelho visual humano desempenham papel central no fenômeno.

O problema da definição e reprodução de cores encontra especial motivação para ser estudado, devido à crescente demanda da indústria por telas, sensores e câmeras que sejam capazes de captar e reproduzir imagens de forma cada vez melhor e mais precisas. Essa demanda beneficia diversas áreas do conhecimento, já que o tópico reside na interface de várias ciências, justificando o seu investimento em pesquisa e desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

ARISTÓTELES; HETT, W.S. **Minor Works**. Londres: Harvard University Press, 1936.

ADOBE SYSTEMS INC. **Adobe® RGB (1998) Color Image Encoding**. v2005-05, 2005. Disponível em: <<https://www.adobe.com/digitalimag/pdfs/AdobeRGB1998.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

ANSTIS, Stuart. The Purkinje rod-cone shift as a function of luminance and retinal eccentricity. **Vision Research**, v.43, n.22, p.2485-2491, out. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698902002675>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

BOUMA, P.J. **Physical aspects of colour: an introduction to the scientific study of colour stimuli and colour sensations**. Eindhoven: N.V. Phillips Gloeilampenfabrieken, 1947.

DEMTRÖDER, Wolfgang. **Atoms, Molecules and Photons: An introduction to atomic-, molecular- and quantum-physics**. Berlin: Springer, 2006.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas**. Rio de Janeiro: Elsevier/Campus, 1979.

HECHT, Eugene. **Óptica**. 2. ed. Lisboa: Calouste Gulbenkain, 2002.

IERODIAKONOU, Katerina. Theophrastus. **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Jun. 2016. Disponível em: <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2016/entries/theophrastus/>>. Acesso em: 26 maio 2017.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Radiocommunication Sector of ITU. Recommendation **ITU-R BT.709-6: Parameter values of the HDTV standards for production and international programme exchange**. 2015. Disponível em: <http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.709-6-201506-I!!PDF-E.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2017.

KAWAMURA, Satoru; TACHIBANAKI, Shuji. Rod and cone photoreceptors: Molecular basis of the difference in their physiology. **Comparative Biochemistry and Physiology, Part A**, v.150, n.4, p.369-377, ago.2008.

LOZANO, Roberto Daniel. **El Color y su medición:** com uma introducción a la óptica fisiológica y al estudio de la visión. Buenos Aires: Editorial Americalee S.R.L., 1978.

MACADAM, David L. **Color measurement:** theme and variations. 2. ed. Berlin: Springer, 1985.

MURRAY, H.D. **Colour in theory and practice.** London: Chapman & Hall, 1952.

MUSTAFI, D.; ENGEL, A. H.; PALCZEWSKI, K. Structure of cone photoreceptors. **Progress in Retinal and Eye Research**, v.28, n.4, p.289-302, jul.2009.

NAVE, Carl R. **Rayleigh Scattering.** 2005. Disponível em: < <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html/>>. Acesso em: 06 mar. 2017.

PEATROSS, Justin; WARE, Michael. **Physics of light and optics.** 2015 edition. Disponível em: <<http://optics.byu.edu/>>. Acesso em: 30 abr. 2017.

PEGORARO, Vincent. **Handbook of Digital Image Synthesis:** Scientific Foundations of Rendering. Boca Raton: CRC Press, 2017.

PEREUR NETO, Paulo. **Estado Sólido.** 2. ed. Porto Alegre, 2010.

SHARPE, Lindsay T. et al. A luminous efficiency function, $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. **Journal of Vision**, vol.5, n.11, p. 948-958 dez. 2005. Disponível em <<http://jov.arvojournals.org/pdfaccess.ashx?url=/data/journals/jov/932833/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

SHEVEL, Steven K. **The Science of Color.** 2. ed. Oxford: Elsevier, 2003.

STROKES, Michael et al. **A Standard Default Color Space for the Internet – sRGB.** vers.1.10, 5 nov. 1996. Disponível em: <<https://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

TIPLER, Paul A. **Física Moderna.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

TORRANO, Adriano de Andrade. **Teoria de Visão em Cores e de Aparências.** 2007. 32f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

**ANEXO A – FUNÇÃO DE CORRESPONDÊNCIA DE CORES PARA O
OBSERVADOR PADRÃO DA CIE (1931) NOS SISTEMAS RGB E XYZ**

Comprimento de onda (nm)	R	G	B	X	Y	Z
380	0	0	0,0012	0.0014	0	0.0065
390	0,0001	0	0,0036	0.0042	0.0001	0.0201
400	0,0003	-0,0001	0,0121	0.0143	0.0004	0.0679
410	0,0008	-0,0004	0,0371	0.0435	0.0012	0.2074
420	0,0021	-0,0011	0,1154	0.1344	0.0040	0.6456
430	0,0023	-0,0012	0,2477	0.2839	0.0116	1.3856
440	-0,0026	0,0015	0,3123	0.3483	0.0230	1.7471
450	-0,0121	0,0068	0,3167	0.3362	0.0380	1.7721
460	-0,0261	0,0148	0,2982	0.2908	0.0600	1.6692
470	-0,0393	0,0254	0,2299	0.1954	0.0910	1.2876
480	-0,0494	0,0391	0,1449	0.0956	0.1390	0.813
490	-0,0581	0,0569	0,0826	0.032	0.2080	0.4652
500	-0,0717	0,0854	0,0478	0.0049	0.3230	0.272
510	-0,0890	0,1286	0,0270	0.0093	0.5030	0.1582
520	-0,0926	0,1747	0,0122	0.0633	0.7100	0.0782
530	-0,0710	0,2032	0,0055	0.1655	0.8620	0.0422
540	-0,0315	0,2147	0,0015	0.2904	0.9540	0.0203
550	0,0228	0,2118	-0,0006	0.4334	0.9950	0.0087
560	0,0906	0,1970	-0,0013	0.5945	0.9950	0.0039
570	0,1677	0,1709	-0,0013	0.7621	0.9520	0.0021
580	0,2453	0,1361	-0,0011	0.9163	0.8700	0.0017
590	0,3093	0,0975	-0,0008	1.0263	0.7570	0.0011
600	0,3443	0,0625	-0,0005	1.0622	0.6310	0.0008
610	0,3397	0,0356	-0,0003	1.0026	0.5030	0.0003
620	0,2971	0,0183	-0,0001	0.8544	0.3810	0.0002
630	0,2268	0,0083	-0,0001	0.6424	0.2650	0
640	0,1597	0,0033	0	0.4479	0.1750	0
650	0,1017	0,0012	0	0.2835	0.1070	0
660	0,0593	0,0004	0	0.1649	0.0610	0
670	0,0315	0,0001	0	0.0874	0.0320	0
680	0,0169	0	0	0.0468	0.0170	0
690	0,0082	0	0	0.0227	0.0082	0
700	0,0041	0	0	0.0114	0.0041	0
710	0,0021	0	0	0.0058	0.0021	0
720	0,0010	0	0	0.0029	0.0010	0
730	0,0005	0	0	0.0014	0.0005	0
740	0,0002	0	0	0.0007	0.0003	0
750	0,0001	0	0	0.0003	0.0001	0
760	0,0001	0	0	0.0002	0.0001	0
770	0	0	0	0.0001	0	0
780	0	0	0	0	0	0

Fonte: adaptado de Lozano (1978, p. 202) e Shevel (2003, p. 112).