



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Engenharia de Controle e Automação



Nayder Teixeira de Almeida

**Fundamentos e Análise de Sensores Ópticos e Modelos Cromáticos
Aplicados à Identificação Automatizada de Cores**

Ouro Preto
2026

Nayder Teixeira de Almeida

**Fundamentos e Análise de Sensores Ópticos e Modelos Cromáticos
Aplicados à Identificação Automatizada de Cores**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia de Controle e Automação da
Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro de Controle e
Automação

Orientadora: Profa. Dra. Adrielle de
Carvalho Santana

Ouro Preto
2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nayder Teixeira de Almeida

Fundamentos e Análise de Sensores Ópticos e Modelos Cromáticos Aplicados à Identificação Automatizada de Cores

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 22 de junho de 2026

Membros da banca

Dra. Adrielle de Carvalho Santana - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Danny Augusto Vieira Tonidandel - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Adrielle de Carvalho Santana, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 30/06/2026



Documento assinado eletronicamente por **Adrielle de Carvalho Santana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/06/2026, às 09:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1127421** e o código CRC **B9A8F08C**.

RESUMO

A identificação automatizada das cores se tornou essencial nos processos industriais modernos, visto que a tonalidade dos materiais e produtos passou a ser tratado como parâmetro técnico para garantir uniformidade visual, precisão reprodutiva e confiabilidade operacional. Frente a esse cenário, o presente estudo teve como objetivo examinar os principais métodos de representação cromática e as tecnologias ópticas empregadas para captar e interpretar as informações de cor em sistemas automatizados. Para isso, adotou-se uma metodologia baseada em revisão de literatura, reunindo pesquisas científicas, normas técnicas e aplicações industriais, possibilitando comparar abordagens e identificar tendências emergentes. Durante o desenvolvimento, abordou-se os fundamentos matemáticos de cor até o funcionamento de dispositivos ópticos e suas aplicações em diversos setores, incluindo o papel de sistemas de padronização como o *Pantone Matching System* e o avanço da visão computacional e da inteligência artificial na análise cromática. Portanto, concluiu-se que a identificação automatizada de cor é fundamental para elevar a qualidade e reduzir os desperdícios, fortalecendo a padronização industrial ao mesmo tempo que abre espaço para inovações futuras em sensores, algoritmos e integração digital.

Palavras-chaves: Automação industrial. Identificação de cores. Modelos cromáticos. Sensores ópticos.

ABSTRACT

Automated color identification has become essential in modern industrial processes, as the tonality of materials and products has come to be treated as a technical parameter to ensure visual uniformity, reproductive precision, and operational reliability. Given this context, the present study aimed to examine the main methods of chromatic representation and the optical technologies employed to capture and interpret color information in automated systems. To this end, a methodology based on literature review was adopted, gathering scientific research, technical standards, and industrial applications, enabling the comparison of approaches and identification of emerging trends. Throughout the development, mathematical foundations of color were addressed, along with the functioning of optical devices and their applications across various sectors, including the role of standardization systems such as the Pantone Matching System and the advancement of computer vision and artificial intelligence in chromatic analysis. Therefore, it was concluded that automated color identification is fundamental to enhancing quality and reducing waste, strengthening industrial standardization while simultaneously creating space for future innovations in sensors, algorithms, and digital integration.

Keywords: Industrial automation. Color identification. Chromatic models. Optical sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ao atingir o córtex occipital, na parte posterior do cérebro, os efeitos da luz provocam a sensação de cor.	14
Figura 2 - Espectro eletromagnético e luz visível em relação a composição da radiação solar.	15
Figura 3 - Anatomia resumida do olho humano: (A) corte sagital do olho humano; (B) Destaque para as células presentes na retina.	15
Figura 4 - Cones e suas respectivas faixas de comprimento de onda.....	16
Figura 5 - Experimentações de Newton com os Prismas.	17
Figura 6 - Diferenças entre a eficiência luminosa fotópica (550 nm) e escotópica (505 nm).....	19
Figura 7 - Sistema RGB.	24
Figura 8 - Cubo do modelo de cores RGB.	24
Figura 9 - Sistema CMYK.....	26
Figura 10 - Separação de cores, as imagens da primeira linha são as decomposições por cada cor, já as imagens da segunda linha correspondem a sobreposição das tintas.	27
Figura 11 - Tri estímulos CIE XYZ.	28
Figura 12 - Diagrama de cromaticidade xy.	29
Figura 13 - Espaço de cores CIELAB.	30
Figura 14 - Sensor TCS34725.	36
Figura 15 - Colorímetro Keyence LV-J Series.....	37
Figura 16 - Etapas de uma medida espectrofotométrica: (a) Fonte de luz, (b) Lente Colimadora, (c) Prisma ou rede de difração, (d) Fenda seletora, (e) Cubeta (vidro, quartzo), (f) Detector, (g) Leitor.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversão analógico-digital
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
CMYK	<i>Cyan, magenta, yellow, key</i>
CNNs	<i>Convolutional Neural Network</i>
IA	Inteligência Artificial
NTSC	<i>National Television Systems Committe</i>
PMS	Pantone Matching System
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA.....	9
1.2. PROBLEMATICA INVESTIGATIVA.....	10
1.3. OBJETIVOS	11
1.3.1. Objetivo Geral	11
1.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.4. METODOLOGIA	11
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2. CONCEITO DA PERCEPÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE CORES.....	14
2.1. PERCEPÇÃO HUMANA DA COR	14
2.2. CONCEITOS BÁSICOS DE COR.....	17
2.3. COMPARAÇÃO ENTRE PERCEPÇÃO HUMANA E SENSORES ELETRÔNICOS REFERENTE A COR	20
3. MODELOS DE REPRESENTAÇÃO CROMÁTICA.....	23
3.1. MODELO RGB.....	23
3.2. MODELO CMYK	25
3.3. MODELO CIE XYZ.....	27
3.4. MODELO CIELAB.....	30
3.5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS E APLICAÇÕES ADEQUADAS ...	32
4. SENSORES ÓPTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA COR	34
4.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE SENSORES DE COR	34
4.2. SENSORES ACESSÍVEIS: TCS34725.....	35
4.3. COLORÍMETROS.....	37
4.4. ESPECTROFOTÔMETROS	39
5. APLICAÇÕES EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS E INDÚSTRIA.....	41

5.1. APLICAÇÕES DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE COR NAS INDÚSTRIAS	41
5.2. <i>PANTONE MATCHING SYSTEM</i> (PMS).....	43
5.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE COR NAS INDÚSTRIAS.....	46
5.4. APLICAÇÕES AVANÇADAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS AUTOMATIZADOS NA DETECÇÃO DE CORES	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
7. REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA

A colorimetria é a parte da ciência das cores que determina numericamente a cor de um estímulo visual de interesse, especificando pequenas variações de cores. As aplicações de sensores ópticos nas áreas médicas e industriais estão crescendo cada vez mais nas pesquisas, sendo utilizados em diversas aplicações, desde rastreamento de poluentes até como identificador de doenças, apresentando respostas analíticas rápidas e precisas (BEZERRA, 2025). Esse avanço evidencia a importância de compreender os fundamentos e as tecnologias envolvidas para a medição da cor, especialmente em cenários no qual a automação e o controle de qualidade se mostram cada vez mais essenciais.

Outro ponto a se ressaltar é a crescente demanda por sistemas automatizados capazes de identificar cores de forma confiável, o que reforça a importância de estudos que abordem tanto sobre os sensores ópticos quanto sobre os modelos matemáticos usados na representação cromática. Com isso, a precisão na identificação de cores é um fator determinante em diversos setores, como indústria têxtil, alimentícia, gráfica, automotiva, farmacêutica, entre outras, em que pequenas variações cromáticas comprometem processos produtivos, padrões de qualidade ou até a segurança do consumidor.

Além disso, destaca-se a diferença entre a percepção humana da cor e a medição realizada por dispositivos eletrônicos, no qual o olho humano interpreta cores de forma subjetiva conforme o contexto, enquanto os sensores ópticos operam baseados nos princípios físicos e matemáticos, tornando indispensável o estudo dos modelos cromáticos e das técnicas de calibração para aproximar a interpretação eletrônica da percepção humana, garantindo maior confiabilidade em sistemas automatizados.

A escolha do estudo teórico também se justifica pela importância de consolidar os conhecimentos existentes de sensores de baixo custo, como o TCS34725, e equipamentos profissionais, como colorímetros e espectrofotômetros. Embora sejam amplamente aplicados, os dispositivos apresentam limitações distintas, sendo fundamental compreender suas diferenças junto com uma análise crítica de fundamentos

e tecnologias disponíveis para orientar projetos e aplicações práticas baseado em modelos cromáticos e sensores adequados a cada contexto.

Por fim, a relevância do estudo também é baseada na importância crescente da padronização cromática em processos industriais e de design, em que sistemas como o *Pantone Matching System* desempenham papel central para garantir a consistência visual e compreender como os padrões se relacionam com sensores e modelos matemáticos nas aplicações modernas de automação e controle de qualidade.

Portanto, o estudo se justifica pela necessidade de se reunir, organizar e analisar de maneira crítica os conhecimentos disponíveis sobre sensores ópticos e modelos cromáticos, proporcionando uma base teórica sólida para pesquisas futuras e para desenvolvimento de soluções mais precisas e eficientes na identificação automatizada de cores.

1.2. PROBLEMATICA INVESTIGATIVA

Embora a identificação automatizada de cores seja amplamente aplicada em processos industriais modernos, existem lacunas significativas na compreensão integrada dos fundamentos teóricos, dos modelos matemáticos disponíveis e das tecnologias ópticas empregadas. Neste contexto, emergem as seguintes questões investigativas:

- a) Quais são os principais modelos cromáticos utilizados em sistemas automatizados e como suas diferenças matemáticas e conceituais impactam na precisão das medições e na interpretação dos dados capturados?
- b) Como os sensores ópticos disponíveis, desde dispositivos de baixo custo até equipamentos profissionais, diferem em termos de funcionamento, precisão e adequação para diferentes contextos industriais?
- c) De que forma a percepção humana da cor diverge da detecção realizada por sensores eletrônicos, e como essas divergências podem ser compensadas por meio de modelos cromáticos e algoritmos de correção?
- d) Quais são os desafios técnicos (iluminação, textura de superfícies, variabilidade de materiais) que limitam a precisão dos sistemas automatizados de detecção de cores, e que oportunidades de aprimoramento existem por meio de inteligência artificial?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

O estudo tem como principal objetivo desenvolver uma revisão de literatura abrangente e sistemática referente aos principais métodos, sensores e modelos matemáticos utilizados para identificar as medições e representações de cores em sistemas automatizados, analisando suas características, limitações e aplicações como também identificando os desafios e as oportunidades de aprimoramento tecnológico.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Investigar de forma aprofundada o funcionamento dos principais sensores ópticos utilizados na detecção de cores, desde dispositivos baixo custo até equipamentos profissionais;
- Analisar os modelos cromáticos RGB, CMYK, CIE XYZ e CIELAB considerando suas características, limitações e aplicações;
- Comparar tecnologias e metodologias de medição e representação de cores referente a precisão, sensibilidade à iluminação, influência das propriedades da superfície analisada e complexidade operacional;
- Identificar lacunas, desafios e oportunidades para aprimorar as técnicas e tecnologias de detecção e representação de cores em sistemas automatizados.

1.4. METODOLOGIA

A metodologia adotada nesse trabalho é a revisão bibliográfica com o objetivo exploratório, descritivo e analítico, com o intuito de reunir, organizar e analisar de forma crítica os conhecimentos disponíveis sobre sensores ópticos de detecção de cor e modelos matemáticos sobre representação cromática. A pesquisa foi conduzida exclusivamente com fontes secundárias, sem realização de experimentos práticos, priorizando a análise

dos materiais científicos, técnicos e industriais sobre o funcionamento, aplicações e limitações das tecnologias abordadas.

O levantamento bibliográfico desenvolvido foi realizado por meio das bases de dados conhecidas como SciELO, Google Scholar, Periódicos CAPES como também livros especializados, normas técnicas, manuais de fabricantes, dissertações, teses, entre outros trabalhos técnicos e documentos oficiais. Para contemplar os avanços tecnológicos mais recentes, priorizou-se as publicações mais recentes, especialmente dos últimos 10 anos (2016-2026), entretanto, manteve-se as obras clássicas essenciais com datas retroativas para abordar os conceitos fundamentais dos temas.

Nos critérios de inclusão, foram selecionados documentos que foram publicados nos idiomas português, inglês ou espanhol, com publicação recente nos últimos 10 anos (2016-2026) exceto as obras clássicas que abordavam os conceitos fundamentais, e trabalhos que abordavam uma parte do tema proposto. Já nos critérios de exclusão, foram excluídas fontes sem fundamentação científicas, com dados inconsistentes ou que apresentavam temas periféricos que não estejam diretamente relacionados ao escopo do estudo.

Por fim, a síntese das informações obtidas possibilitou a elaboração de uma visão integrada sobre o estado da arte dos sensores ópticos e dos modelos cromáticos, auxiliando na compreensão das potencialidades e limitações de tecnologias existentes, proporcionando conteúdos teóricos para pesquisas futuras e aplicações práticas na área de automação e de controle de qualidade.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos principais, cada um desenvolvido de forma progressiva para apresentar os fundamentos teóricos, as tecnologias ópticas disponíveis e as aplicações práticas relacionadas à identificação automatizada de cores. A ideia foi partir de conceitos mais gerais e perceptivos, evoluindo gradualmente para questões técnicas e aplicações industriais específicas, permitindo que o leitor acompanhasse uma trajetória lógica e coerente, facilitando a compreensão tanto para quem já possui familiaridade com o tema quanto para iniciantes.

Os Capítulos 2 e 3 formam a base teórica do trabalho. O Capítulo 2 explora os conceitos fundamentais da percepção e representação de cores, abordando como o olho

humano percebe as cores, os conceitos básicos de óptica e a crucial diferença entre a percepção humana, subjetiva e influenciada pelo contexto, e a detecção por sensores eletrônicos, objetiva e baseada em princípios físicos. O Capítulo 3 mergulha nos modelos de representação cromática, analisando RGB, CMYK, CIE XYZ e CIELAB, explicando como cada modelo foi desenvolvido para resolver problemas específicos e quando cada um é mais apropriado para diferentes aplicações industriais e científicas.

Os Capítulos 4 e 5 apresentam as tecnologias e aplicações práticas. O Capítulo 4 trata dos sensores ópticos, desde dispositivos de baixo custo como o TCS34725 até equipamentos profissionais como colorímetros e espectrofotômetros, explicando seus princípios de funcionamento, vantagens reais e limitações práticas. O Capítulo 5 discute as aplicações em sistemas automatizados industriais, o papel do *Pantone Matching System* como padrão global, os desafios enfrentados na implementação, as vantagens em termos de eficiência e qualidade, além das aplicações emergentes de inteligência artificial que estão transformando a detecção de cores em ambientes complexos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, sintetizando os principais achados da revisão bibliográfica e refletindo sobre o estado atual da tecnologia de identificação automatizada de cores. Buscou-se não apenas resumir o que foi discutido, mas também apontar as lacunas existentes, os desafios técnicos a serem superados e as oportunidades promissoras para pesquisas futuras. Acredita-se que este trabalho, ao reunir e organizar o conhecimento disponível sobre o tema, possa servir como referência sólida para pesquisadores e engenheiros que desejam trabalhar nesta área da automação industrial.

2. CONCEITO DA PERCEPÇÃO E REPRESENTAÇÃO DE CORES

Neste capítulo, apresentam-se os fundamentos teóricos da percepção e representação de cores, explorando como o olho humano consegue identificar e interpretar as cores por meio de processos fisiológicos complexos. Serão abordados os conceitos básicos de luz e cor, desde a natureza ondulatória da luz visível até os mecanismos biológicos envolvidos na visão.

2.1. PERCEPÇÃO HUMANA DA COR

A cor é considerada uma sensação provocada por meio da luz sobre o órgão da visão. A cor tem uma relação íntima com uma luz, pois quando há a falta da luz, não há nenhuma cor, e o objeto apresenta variação de cor de acordo com o que o ilumina, concluindo que os corpos não apresentam cor em si mesmo. Na óptica fisiológica, quando a luz atravessa a pupila, ela é decomposta por três principais grupos de comprimento de ondas que se caracterizam como as cores-luz: vermelho, verde e índigo (PEDROSA, 2023), conforme apresentado na Figura 1.

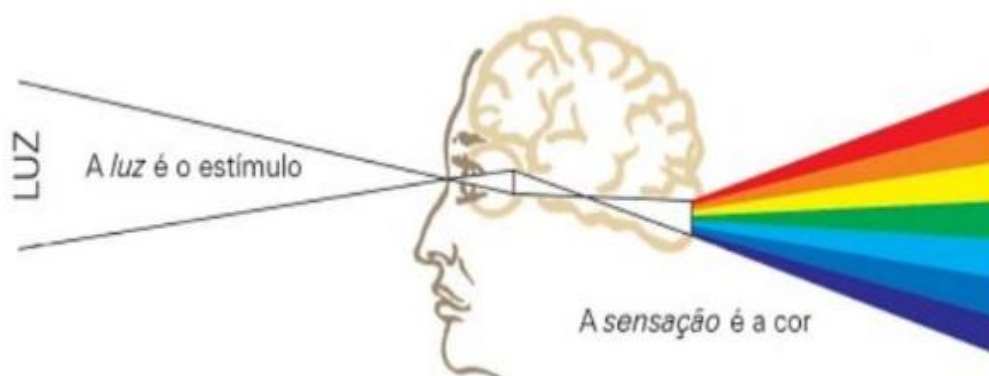


Figura 1 - Ao atingir o córtex occipital, na parte posterior do cérebro, os efeitos da luz provocam a sensação de cor.

Fonte: PEDROSA, 2023.

O olho humano consegue identificar os fótons conforme o comprimento de onda, sendo analisado entre 400 e 700 nm (Figura 2). O controle de entrada de luz no globo ocular é realizado pela pupila e, após passar pela pupila, o raio luminoso atinge a retina,

em que ficam os fotorreceptores denominados como cones e bastonetes (OLIVEIRA, 2022), como apresentado na Figura 3.

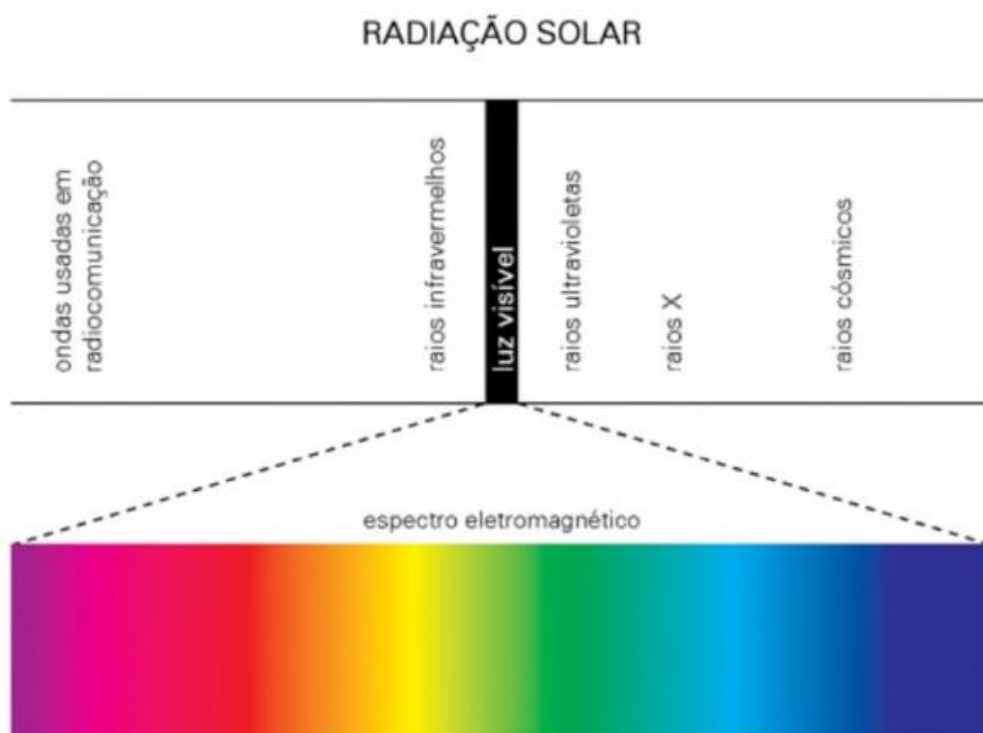


Figura 2 - Espectro eletromagnético e luz visível em relação a composição da radiação solar.

Fonte: PEDROSA, 2023.

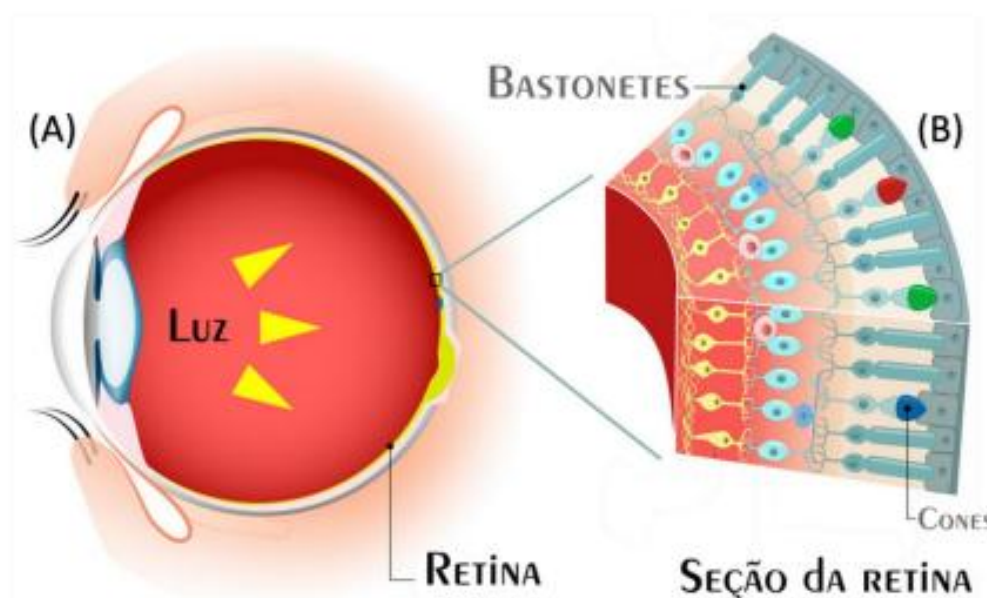


Figura 3 - Anatomia resumida do olho humano: (A) corte sagital do olho humano; (B) Destaque para as células presentes na retina.

Fonte: OLIVEIRA, 2022.

Os bastonetes possibilitam que o indivíduo consiga ter a percepção do brilho dos objetos, sendo fundamental para visão noturna e em ambientes com pouca iluminação. Já os cones são responsáveis por identificar as cores, apresentando três conjuntos de cones na retina: os cones S (*short*) são estimulados em comprimentos de ondas mais curtos, responsáveis pelas tonalidades azuladas, os cones M (*medium*) são estimulados por comprimentos de ondas médios, responsáveis pelas tonalidades esverdeadas, e por fim os cones L (*long*) que são específicos para comprimentos de ondas longos, responsáveis pelas tonalidades avermelhadas (HALL; GUYTON, 2017), conforme apresentado na Figura 4.

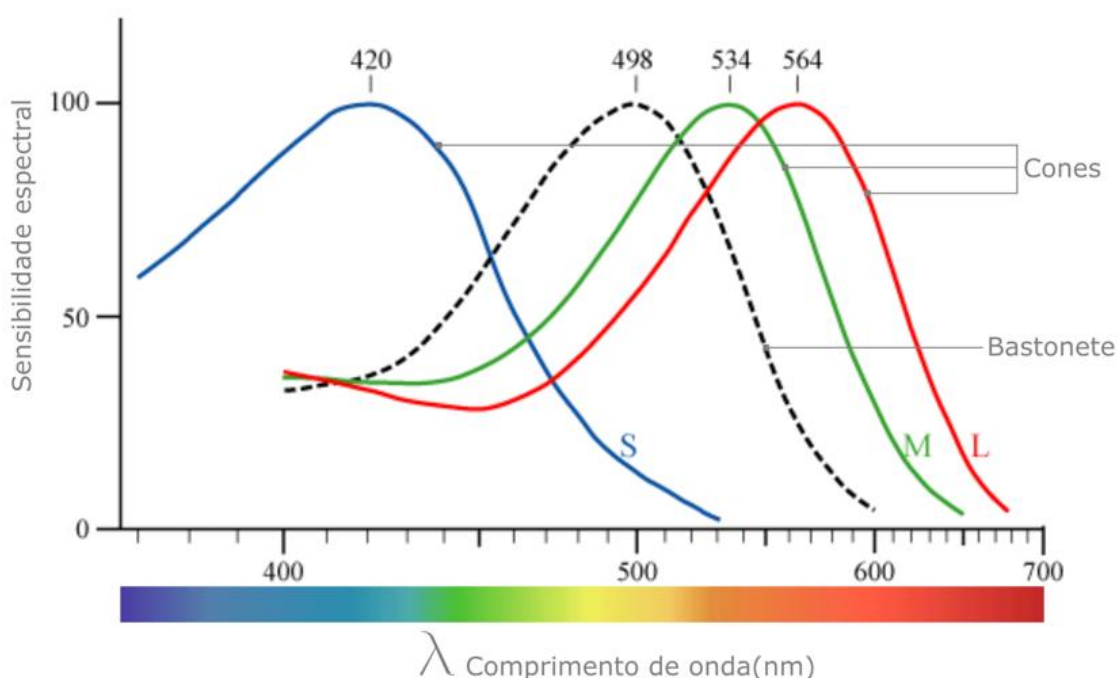


Figura 4 - Cones e suas respectivas faixas de comprimento de onda.

Fonte: CORRÊA, 2022.

Esses conjuntos de cones são os responsáveis por transmitir ao cérebro os impulsos elétricos com dados sobre o objeto observado, ou seja, se uma superfície reflete a luz de comprimento de onda mais curto, o cérebro reconhecerá a superfície como azul. Se a luz refletida resultar em uma composição de comprimentos de ondas diferentes, o cérebro combinará os sinais e teremos as cores misturadas como amarelo, roxo e laranja e, caso receber iluminação com comprimentos de ondas compreendendo toda a faixa da luz visível, o cérebro visualiza o objeto como sendo branco (OLIVEIRA, 2022).

2.2. CONCEITOS BÁSICOS DE COR

As primeiras reflexões sobre a natureza da cor iniciaram na antiguidade, em que filósofos como Aristóteles acreditavam que as cores eram propriedades intrínsecas dos objetos e resultavam da mistura entre luz e escuridão. Essa visão foi mantida por muitos séculos até ser contestada por meio dos experimentos científicos, sendo modificada de forma decisiva no século XVII após Isaac Newton demonstrar, em seu famoso experimento com o prisma (Figura 5), que a luz branca é composta por diferentes cores que podem ser separadas e recombinadas, sendo um marco na base física da cor como fenômeno associado ao espectro eletromagnético (SANTOS, 2025).

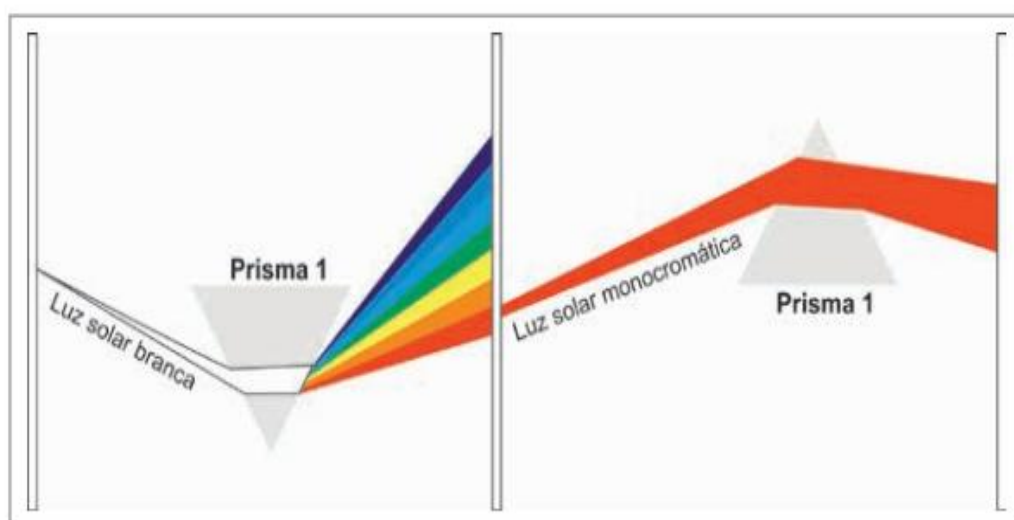


Figura 5 - Experimentações de Newton com os Prismas.

Fonte: SILVEIRA, 2015.

Quando Newton permitiu que um raio de sol entrasse por um pequeno orifício da janela em um quarto escurecido, passando por um prisma e produzindo um espectro, observou que a luz branca se desviava em diferentes ângulos. Esses desvios referem-se ao fenômeno da refração, enquanto as diferenças dos desvios ocorrem pela dispersão do índice de refração do prisma que é uma função do comprimento de onda em que a luz está associada. Para provar que estava correto referente a esses desvios, ele permitiu que um raio de sol entrasse por um pequeno orifício da janela em um quarto escurecido, passando por um prisma e produzindo um espectro. Em seguida, usando um anteparo

opaco com pequeno orifício, separou um feixe de luz de uma única cor e deixou-o passar por meio de um segundo prisma (SILVEIRA, 2015).

Nesse segundo prisma, quando a radiação monocromática passou, ela emergia sem nenhuma modificação de cor, resultando que o segundo prisma apenas reproduziu outro desvio de direção, ou seja, as radiações não poderiam se dividir em outras componentes com propriedades diferentes. Dessa forma, Newton compreendeu a manifestação cromática dos objetos em função da luz por meio da absorção e reflexão, sendo considerado um marco na ciência (SILVEIRA, 2015).

Em contraponto à visão física de Newton, o poeta e filósofo alemão Johann Wolfgang von Goethe desenvolveu, no início do século XIX, uma abordagem fenomenológica da cor publicada na obra *Zur Farbenlehre* (Teoria das Cores, 1810). Goethe centrou sua investigação na experiência perceptiva do observador, argumentando que a cor não pode ser compreendida de forma dissociada do contexto visual e psicológico em que é percebida. Para Goethe, a cor emerge da interação entre luz, escuridão e o olho humano, sendo, portanto, um fenômeno essencialmente relacional e subjetivo (SILVEIRA, 2015).

Já no século XIX, os avanços da fisiologia da visão trouxeram novas interpretações de como o olho humano percebe a cor, em que pesquisadores como Thomas Young e Hermann von Helmholtz apresentaram a teoria tricromática, em que a percepção cromática ocorre por meio da combinação de três tipos de receptores sensíveis a diferentes faixas do espectro visível, explicando os fenômenos perceptuais como também foi a base para a criação dos primeiros sistemas matemáticos da representação de cor (SZABADVÁRY; ROBINSON, 1980).

Ao observar que a luz vermelha, verde e azul conseguiria combinar quase qualquer cor desejada, Maxwell avançou ainda mais em 1860 ao desenvolver o *colorbox*, um colorímetro rudimentar que usava um prisma para ajustar os feixes de luz vermelha, verde e azul de forma independente para corresponder a cor da amostra, demonstrando que era possível medir os comprimentos de onda como um tipo de energia eletromagnética (SZABADVÁRY; ROBINSON, 1980).

Alguns anos depois, em 1870, Louis Jules Duboscq, um fabricante francês de instrumentos ópticos, desenvolveu um colorímetro para um professor de química industrial no *College Commercial* em Paris. Esse equipamento foi o primeiro que possibilitou a comparação simultânea da cor de dois líquidos, o que representou um marco

importante no desenvolvimento dos princípios que mais tarde se fundamentariam na colorimetria moderna (WARNER, 2006).

No início do século XX, tornou-se evidente a necessidade de métodos mais precisos e padronizados para medição da cor, especialmente frente aos avanços das aplicações científicas e industriais que exigiam rigor na quantificação dos estímulos visuais como a fotografia, da impressão e, posteriormente da televisão e dos sistemas digitais. Esse cenário evidenciou a urgência de estabelecer normas e modelos que possibilitassem descrever as cores de forma objetiva, reproduzível e independente do observador (WYSZECKI, 1982).

Nesse contexto, a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) desempenhou um papel fundamental. Em 1924, a CIE publicou a função de eficiência luminosa fotópica, que descreveu a sensibilidade do olho humano em relação a luz de diferentes comprimentos de onda de luz visível sob condições de alta luminosidade. Essa função estabeleceu base científica para compreender como o sistema visual humano responde à luz visível. Posteriormente, em 1951, a CIE divulgou os valores correspondentes à visão escotópica, que representa a sensibilidade do olho nas condições de baixa luminosidade (Figura 6). Essas duas funções tornaram-se referências essenciais para construção dos modelos colorimétricos modernos (KRUSCHWITZ, 2018).

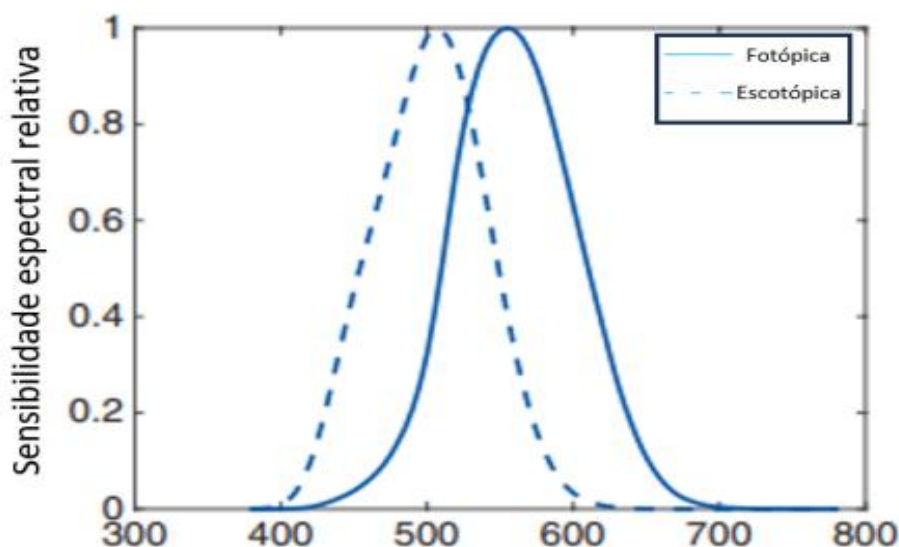


Figura 6 - Diferenças entre a eficiência luminosa fotópica (550 nm) e escotópica (505 nm).

Fonte: KRUSCHWITZ, 2018.

Além das condições fotópica e escotópica, existe um estado intermediário denominado visão mesópica, que ocorre em níveis de luminância entre aproximadamente

0,001 cd/m² e 3 cd/m², como os encontrados ao anoitecer, em túneis ou em vias públicas com iluminação artificial. Nessa condição, tanto os cones quanto os bastonetes contribuem simultaneamente para a percepção visual, resultando em sensibilidade espectral intermediária entre as curvas fotópica e escotópica (KRUSCHWITZ, 2018).

A visão mesópica tem relevância prática significativa na iluminação de estradas e vias urbanas, pois os motoristas e pedestres frequentemente operam nessa faixa de luminância durante a noite. Sistemas de iluminação projetados com base apenas na curva fotópica podem ser menos eficientes nessas condições, motivo pelo qual a CIE publicou em 2010 o modelo mesópico fotométrico oficial (CIE 191:2010, 2010), que passou a ser referência para projetos de iluminação viária.

Para sistemas automatizados de identificação de cores que operam em ambientes com iluminação variável, como câmeras industriais em galpões ou sensores em linhas de produção com diferentes turnos, compreender os efeitos da visão mesópica é relevante para calibrar corretamente os algoritmos de interpretação cromática e garantir a consistência das leituras independentemente das condições de luminosidade (KRUSCHWITZ, 2018).

Entre as publicações sobre eficiência luminosa, a CIE estabeleceu, em 1931, o primeiro modelo matemático universal para descrever as cores de forma numérica e reprodutível: o sistema CIE XYZ. Esse modelo representou um marco inicial para a colorimetria moderna, pois permitiu a representação das cores de maneira independente do dispositivo, iluminação e do observador, proporcionando uma base científica sólida para medições cromáticas (SANTOS, 2025).

2.3. COMPARAÇÃO ENTRE PERCEPÇÃO HUMANA E SENSORES ELETRÔNICOS REFERENTE A COR

No contexto sobre cor, é esperado que se cogite que tanto pessoas quanto máquinas identifiquem as cores do mesmo modo, entretanto, a percepção humana e a detecção realizada por sensores eletrônicos são realizadas de modos distintos. A cor, do modo como visualizamos, não é apenas um dado físico, ela é composta por interpretação, contexto, memória e, em alguns casos, até emoção. Já os sensores eletrônicos são desenvolvidos para trabalhar com números, intensidades e respostas espectrais. A

comparação é semelhante a uma experiência subjetiva em relação a uma medição objetiva (BURAMBEKOVA; SHAMOI, 2025).

O olho humano não registra a luz de um modo linear, ele se adapta ao ambiente, adequando a sensibilidade de acordo com a iluminação e corrigindo de forma automática algumas distorções. Um exemplo claro desse cenário é quando entra em um quarto escuro, no início tudo parece preto, mas após alguns segundos, é possível enxergar melhor, pois o sistema visual vai se adequando ao ambiente. Já os sensores eletrônicos não realizam esses ajustes sozinhos, eles precisam de algoritmos, calibração e controle de iluminação para compensar as mudanças no ambiente (AMORIM; BRET; GONZÁLEZ-MÉIJOME, 2022).

Outro ponto importante é que a percepção humana é realizada por meio de três tipos de cones, no qual cada um é sensível a uma faixa do espectro visível. A combinação das respostas dos três cones gera a sensação de cor, porém a sensação não é fixa, ela é alterada de acordo com o fundo, a luz ao redor, a fadiga visual e até pela expectativa do observador. Já os sensores eletrônicos usam filtros RGB ou arranjos espectrais que respondem de forma mais rígida, sem nenhuma interpretação, apenas registrando a luz quando recebem a informação (COJOCARU, 2024).

A comparação é outro fator de divergência, pois o cérebro humano realiza comparações todo o tempo, ajustando automaticamente o que denominamos de “ponto de branco”, ou seja, decide o que deve ser considerado branco em cada situação. Nesse contexto, um papel branco vai parecer branco tanto na luz do sol como também sob uma lâmpada amarelada devido ao conceito do papel. Já um sensor, por outro lado, registra as duas situações como cores completamente distintas, exceto que seja realizada uma calibração para compensar a divergência de iluminação (AMORIM; BRET; GONZÁLEZ-MÉIJOME, 2022).

Em relação a sensibilidade espectral, os cones humanos apresentam curvas de respostas específicas que não são iguais as curvas dos filtros utilizados nos sensores eletrônicos. Isso significa que quando duas cores parecem idênticas na percepção humana, ainda assim pode gerar leituras diferentes no sensor óptico, e o inverso também ocorre, o sensor pode considerar duas cores iguais, enquanto o olho humano percebe diferenças sutis. Essas divergências são um dos motivos que reforçam a importância sobre os modelos cromáticos e as transformações matemáticas (BURAMBEKOVA; SHAMOI, 2025).

Na percepção de cor de forma contextual, o ser humano consegue observar o mesmo tom mais claro ou mais escuro de acordo com as cores que se encontram ao seu redor, sendo denominado de “contraste simultâneo”. Já os sensores eletrônicos não sofrem esse tipo de influência, pois não há comparação entre cores próximas. Eles apenas fazem a medição da luz que entra em cada canal, sendo vantagens em determinadas aplicações, entretanto, podem gerar resultados que são divergentes em relação a percepção humana (ALTMANN *et al.*, 2022).

A iluminação é considerada um fator crítico, pois o olho humano consegue se adaptar a diferentes fontes de luz, enquanto os sensores dependem totalmente da qualidade de iluminação para proporcionar medições consistentes, em que mudanças pequenas de intensidade, ângulo ou temperatura da cor da luz podem modificar significativamente a leitura do sensor. Frente a esse cenário, os sistemas automatizados de identificação de cor normalmente precisam de ambientes controlados ou algoritmos de correção (COJOCARU, 2024).

É importante ressaltar que o olho humano também apresenta limitações, ele não consegue distinguir diferenças muito pequenas de comprimento de ondas, e sua percepção de cor varia de pessoa para pessoa. Nesse contexto, fatores como idade, saúde ocular e até genética impactam no modo como cada indivíduo consegue enxergar as cores. Por outro lado, os sensores eletrônicos apresentam maior consistência, visto que duas unidades do mesmo modelo tendem a medir a cor da mesma forma, desde que estejam calibrados (BURAMBEKOVA; SHAMOI, 2025).

Portanto, a grande diferença entre humanos e sensores está no propósito, no qual o olho humano evoluiu para interpretar o mundo de modo funcional e não para realizar medições de cores com precisão. Em contrapartida, os sensores foram desenvolvidos para quantificar o que visualizamos, eles não apresentam subjetividade, capacidade de adaptação e interpretação que o cérebro humano apresenta, sendo necessário combinar sensores com modelos cromáticos e algoritmos de correção para aproximar a medição eletrônica da percepção humana (ALTMANN *et al.*, 2022).

3. MODELOS DE REPRESENTAÇÃO CROMÁTICA

A representação cromática da cor é essencial para que sistemas digitais, sensores ópticos e dispositivos de reprodução visual consigam interpretar e manipular com cores de forma consistente. Como a percepção humana seja subjetiva, adaptativa e influenciada pelo contexto, os dispositivos eletrônicos dependem de modelos matemáticos para traduzir as cores em valores numéricos. Esses valores possibilitam que a informação cromática seja processada, comparada e reproduzida de maneira padronizada, independente do observador ou das condições ambientais (SANTOS, 2025).

Ao longo dos anos, diferentes modelos cromáticos foram desenvolvidos para atender necessidades específicas como reprodução em telas, impressão gráfica, medições laboratoriais, entre outros. Dessa forma, cada modelo possui características próprias, vantagens e limitações, no qual a sua escolha depende diretamente da aplicação desejada. Nos sistemas que envolvem sensores ópticos e análise colorimétrica, compreender essas diferenças é necessário para interpretar adequadamente os resultados obtidos e garantir a precisão nos resultados (SILVA, 2023).

Portanto, nos subtópicos a seguir, serão apresentados os principais modelos de representação cromáticas utilizados nas aplicações industriais, científicas e computacionais. A análise desses modelos permite entender como a cor é organizada matematicamente em cada sistema e o motivo pelo qual determinados modelos são mais adequados para medições com sensores ópticos e aplicações colorimétricas.

3.1. MODELO RGB

O sistema de cores RGB (Figura 7) é um dos espaços cromáticos mais utilizados nos dispositivos digitais, especialmente em câmeras, sensores ópticos e telas. Sua popularidade ocorreu devido ao seu conceito ser baseado no princípio da síntese ativa da luz, que se relaciona como a forma do olho humano percebe os estímulos luminosos pelos cones sensíveis às regiões vermelha, verde e azul do espectro visível. Por essa razão, diversos dispositivos de captura e reprodução de imagem são projetados para operar diretamente com as coordenadas RGB (OLIVEIRA, 2022).

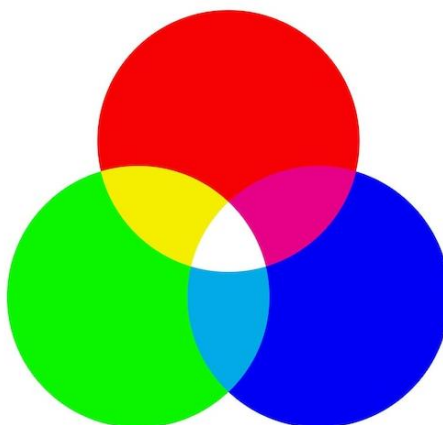


Figura 7 - Sistema RGB.

Fonte: ROCHA, 2010.

Nesse modelo, cada imagem digital é composta por um conjunto de pixels, no qual cada pixel representa a combinação de três componentes da cor, sendo eles o vermelho (R - *red*), o verde (G - *green*) e o azul (B - *blue*). Nos sistemas convencionais, cada componente possui 8 bits de profundidade, com variação de 0 a 255, resultando um total de 24 bits por pixel. Essa estrutura possibilita representar mais de 16 milhões de combinações possíveis, com uma ampla gama de cores e boa fidelidade visual nas aplicações digitais (OLIVEIRA, 2022).

O modelo de cores RGB segue o padrão de cores do Comitê Nacional de Sistema de Televisão (*National Television Systems Committee – NTSC*) que usa as três cores primárias para descrever uma cor dentro de uma imagem colorida, em que cada componente da cor representa um eixo ortogonal dentro de um espaço euclidiano tridimensional (RUSS, 1994), conforme apresentado na Figura 8.

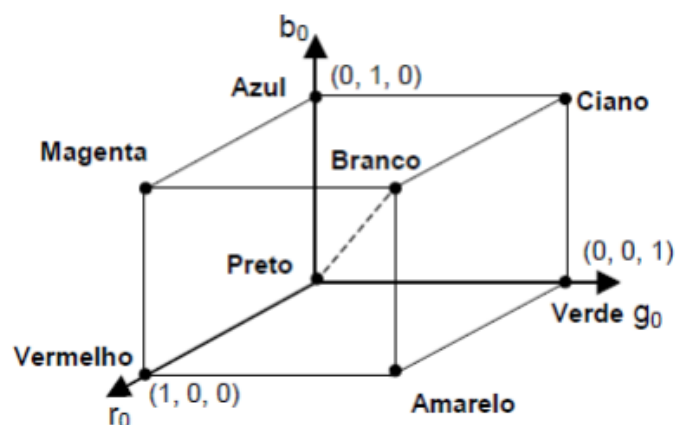


Figura 8 - Cubo do modelo de cores RGB.

Fonte: WEEKS, 1996.

Seis dos oito vértices da Figura 8 descrevem as três cores primárias (vermelho, azul, verde) e as três cores secundárias (magenta, ciano, amarelo), enquanto os dois cantos adicionais representam os tons de branco e preto. A linha pontilhada corresponde todas as combinações de valores iguais das três componentes de cor, resultando nos possíveis níveis de cinza que uma imagem digital poderia conter nesse padrão (WEEKS, 1996).

O modelo de cores RGB é considerado um espaço normalizado e definido pelas componentes (WEEKS, 1996), conforme apresentado pela Equação 1:

$$r = \frac{R}{R_{max}}, g = \frac{G}{G_{max}} \text{ e } b = \frac{B}{B_{max}} \quad (1)$$

O R_{MAX} , G_{MAX} e B_{MAX} são as intensidades máximas de cada componente da cor correspondente, enquanto o R , G e B são as componentes normalizadas em valores definidos entre 0 e 1. Portanto, esse modelo trata a imagem como um conjunto de três imagens independentes em tons de cinza, cada uma representando as cores vermelho, verde e azul (RUSS, 1994).

3.2. MODELO CMYK

O modelo CMYK é amplamente utilizado em processos de impressão e reprodução físicas da cor como fabricação de tintas e pigmentos, sendo o padrão adotado por gráficas, impressoras industriais e sistemas de produção visual baseado por pigmentos. Diferente do modelo RGB que atua por meio da síntese ativa da luz, o CMYK utiliza o princípio da síntese subtrativa, em que as cores são formadas por meio da absorção seletiva da luz incidente sobre a superfície. Nesse modelo, a cor percebida é resultado da proporção branca que não é absorvida pelos pigmentos aplicados, mas sim refletida na direção ao observador (ROCHA, 2010).

A sigla CMYK representa as quatro tintas primárias subtrativas, sendo elas o ciano (C - *cyan*), a magenta (M - *magenta*), o amarelo (Y - *yellow*) e o preto (K - *key*), conforme apresentado na Figura 9. Cada uma das tintas absorve uma faixa específica do espectro visível, no qual o ciano absorve o vermelho, o magenta absorve o verde, o

amarelo absorve e o azul, no qual a combinação dessas absorções determina a cor final refletida (SILVA *et al.*, 2022).

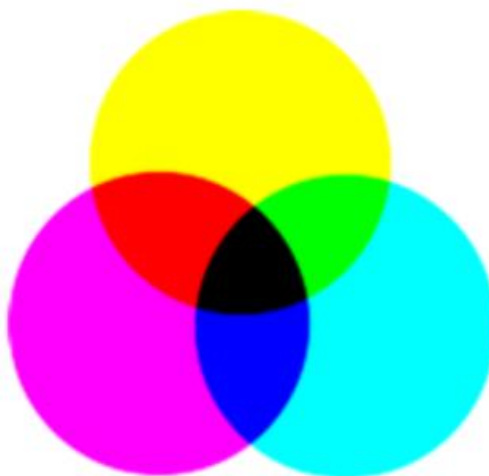


Figura 9 - Sistema CMYK.

Fonte: ROCHA, 2010.

Embora na teoria a combinação do C, M e Y conseguisse reproduzir um preto profundo, na prática a mistura resulta em um tom acinzentado ou amarronzado pelas imperfeições dos pigmentos, assim, foi incluído o componente K para garantir maior profundidade tonal, nitidez e economia da tinta. Esse item também resulta em uma melhor definição de textos, contornos e áreas de sombra, tornando o resultado mais eficiente e preciso (SILVA *et al.*, 2022).

Para demonstrar na prática, considerando uma impressão de uma fotografia colorida de uma paisagem, o arquivo em que a imagem chega é RGB, entretanto, a impressora trabalha com CMYK, então o sistema converte a imagem para os quatro canais, gerando a primeira linha dos efeitos individuais de cada componente, evidenciando como cada tinta absorve seletivamente determinadas faixas do espectro visível (SILVA, 2023).

Em seguida, a segunda linha representa a sobreposição progressiva das tintas e suas combinações, iniciando com o ciano, seguido pelo magenta, amarelo e por fim, o preto. Esse processo demonstra como a mistura das três tintas resultam em uma base cromática ampla, enquanto o preto reforça as sombras, profundidade e definição, resultando em uma reprodução nítida e fiel (SILVA *et al.*, 2022), conforme apresentado na Figura 10.

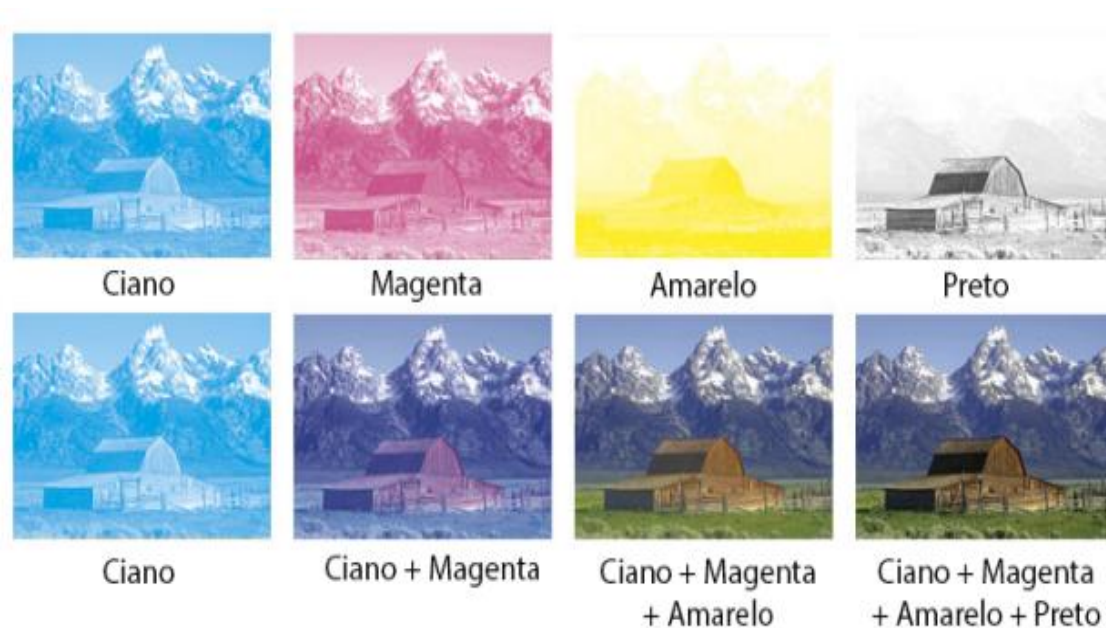


Figura 10 - Separação de cores, as imagens da primeira linha são as decomposições por cada cor, já as imagens da segunda linha correspondem a sobreposição das tintas.

Fonte: SILVA, 2023.

O modelo CMYK é relevante nos contextos em que a cor é reproduzida fisicamente, pois considera as propriedades ópticas dos pigmentos e dos substratos utilizados. Contudo, ele apresenta limitações quando comparado com modelos colorimétricos mais abrangentes devido a quantidades de cores que consegue representar. Por esse motivo, as conversões entre RGB e CMYK nem sempre resultam em correspondência exatas, sendo necessário gerenciamento de cores para reduzir as discrepâncias do que é visualizado na tela e o que é impresso (SILVA, 2023).

Apesar dessas limitações, o CMYK ainda é amplamente aplicado em ambientes gráficos e industriais, pois descreve de forma eficiente o comportamento físico dos pigmentos e controla com precisão a reprodução da cor em materiais impressos. Portanto, sua compreensão é fundamental em qualquer sistema que ocorra transição de ambiente digital e superfícies físicas, especialmente quando há a necessidade de consistência cromática entre sensores, telas e processos de impressão (SILVA et al., 2022).

3.3. MODELO CIE XYZ

O espaço de cores do modelo CIE XYZ foi desenvolvido no ano de 1931 pela CIE, sendo considerado um dos marcos importantes na colorimetria moderna. Ele foi

realizado por meio de experimentos psicofísicos que relacionavam os estímulos luminosos reais com a forma do ser humano perceber a cor. Diferentemente dos modelos práticos como o RGB ou CMYK, o CIE XYZ não depende dos dispositivos específicos, ele representa a cor de forma absoluta, de acordo com o comportamento médio do observador humano padrão definido pela CIE (MEYER; ZOLLINGER, 1998).

O modelo surgiu a partir de estudos em que os participantes ajustavam as quantidades de luz vermelha, verde e azul para igualar as cores monocromáticas. Os dados deram origem ao espaço CIE RGB que, posteriormente, foram transformados no espaço CIE XYZ para simplificar cálculos e garantir que as cores visíveis fossem representadas por valores positivos. Nesse espaço, as variações são derivativas dos valores de vermelho, azul e verde, representando os valores do tri estímulo X, Y e Z (FAIRCHILD, 2005), como mostra a Figura 11.

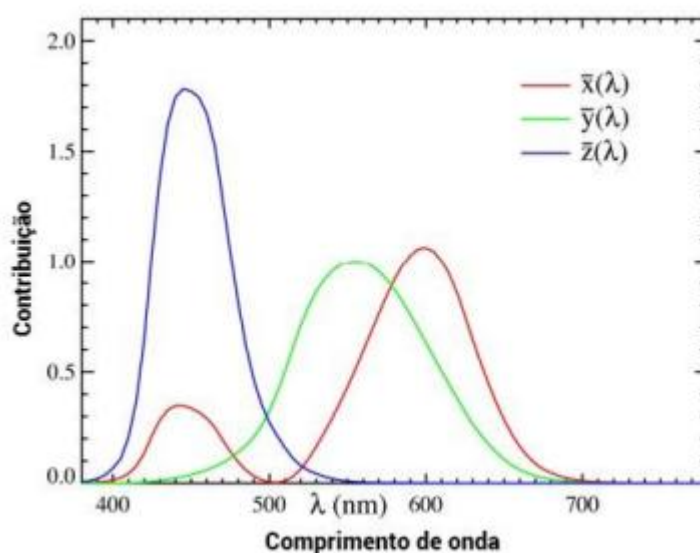


Figura 11 - Tri estímulos CIE XYZ.

Fonte: FAIRCHILD, 2005.

Cada uma das componentes representa uma resposta ponderada em relação as sensibilidades espectrais humanas. O eixo Y é importante, pois ele é definido para corresponder sobre a luminância, ou seja, a percepção de brilho, um aspecto necessário para o cálculo de iluminação e reprodução visual. Já os eixos X e Z completam o espaço, possibilitando representar todas as gamas de cores visíveis e, apesar de não corresponder diretamente as cores primárias do RGB, a estrutura torna o CIE XYZ um modelo linear, em que variações numéricas se relacionam de forma proporcional conforme as mudanças observadas na cor (MOREIRA, 2020).

Uma das aplicações mais relevantes do CIE XYZ é a construção do diagrama de cromaticidade CIE xy (Figura 12), que representa graficamente todas as cores visíveis ao olho humano. Esse diagrama é amplamente usado para comparar faixa de cores dos dispositivos, calibrar os sistemas de imagem e analisar as diferenças cromáticas dos materiais. Além disso, o CIE XYZ também serve como base para modelos mais avançados e uniformes como o CIELAB que foram desenvolvidos posteriormente para corrigir as limitações perceptuais do espaço original (RIDOLFI, 2012).

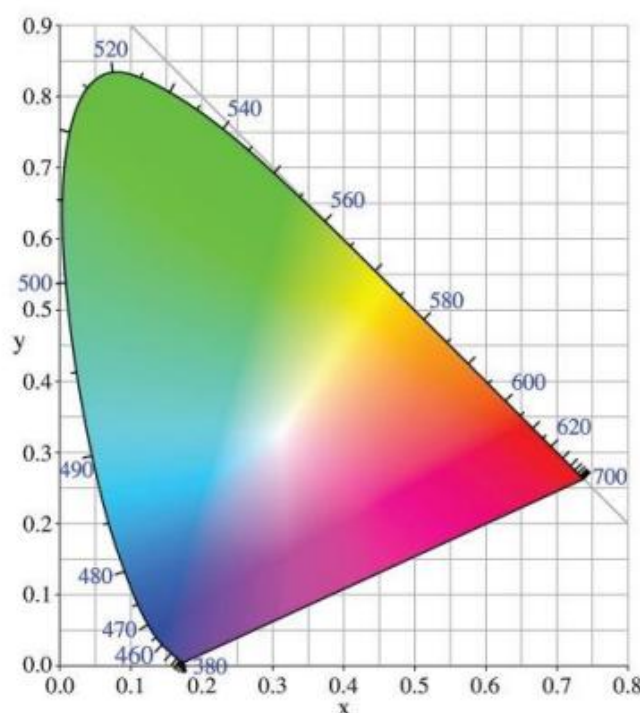


Figura 12 - Diagrama de cromaticidade xy.

Fonte: RIDOLFI, 2012.

Por ser um modelo independente de dispositivos e baseado em dados experimentais da percepção humana, o modelo CIE XYZ é amplamente aplicado em áreas que exigem alta precisão colorimétrica como na calibração de sensores ópticos, no controle de qualidade industrial, na iluminação, na fotografia científica e no desenvolvimento de tecnologias de exibição. A adoção desse modelo como padrão internacional permite a consistência na comunicação de cores entre diferentes sistemas, o tornando indispensável em aplicações que envolvam medição e reprodução fiel da cor (MOREIRA, 2020).

3.4. MODELO CIELAB

O modelo CIELAB também foi desenvolvido pela CIE no ano de 1976 com o objetivo de criar um espaço de cor de modo uniforme, ou seja, em que as diferenças numéricas entre os valores sejam correspondentes as diferenças percebidas pelo olho humano. Sendo construído utilizando a base do modelo CIE XYZ, ele usa as transformações não lineares que se aproximam de uma resposta matemática da resposta fisiológica da visão humana. Frente a isso, o CIELAB se tornou um dos modelos mais usados em aplicações com alta precisão colorimétrica como o controle de qualidade, a calibração de sensores ópticos, a análise de materiais e sistemas de visão computacional (SANTOS, 2025).

O espaço CIELAB é composto por três componentes: L^* , a^* e b^* . O parâmetro L^* representa a luminosidade, variando de 0 (preto) a 100 (branco) e está diretamente relacionado a percepção de claro e escuro. Enquanto isso, os eixos a^* e b^* representam as dimensões cromáticas, em que o eixo a^* varia do verde ao vermelho, enquanto o eixo b^* varia do azul ao amarelo. Essa estrutura bidirecional possibilita que qualquer cor seja posicionada de forma precisa dentro do espaço tridimensional, possibilitando os cálculos de diferença de cor e comparação de amostras (BROADBENT, 2010), conforme está demonstrado na Figura 13.

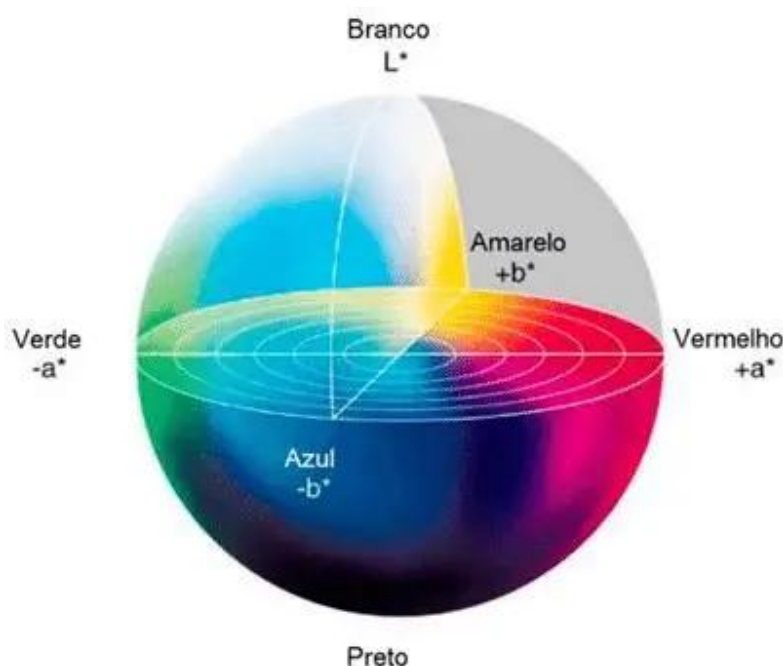


Figura 13 - Espaço de cores CIELAB.

Fonte: RIDOLFI, 2012.

Os cálculos desses valores podem ser feitos por meio das divisões dos valores dos três estímulos, utilizando o observador padrão suplementar de 1964, no qual o valor dos três estímulos corresponde a uma referência selecionada (X_n , Y_n e Z_n) (BROADBENT, 2010), conforme apresentado nas Equações 2 a 5.

$$L^* = 116f \times \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (2)$$

$$a^* = 500 \times \left[f \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (3)$$

$$b^* = 200 \times \left[f \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - f \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (4)$$

Em que:

$$f(t) = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}} & , t > 0,008856 \\ 7,787t + \frac{4}{29}, & t \leq 0,008856 \end{cases} \quad (5)$$

Uma das principais vantagens do modelo CIELAB é a independência de dispositivos, ou seja, os seus valores não dependem de sensores, telas ou impressoras específicas. Ao invés disso, ele utiliza como referência um iluminante padrão definido pela CIE, garantindo a consistência das medições mesmo em diferentes equipamentos. Outro ponto importante é que o CIELAB possibilita o cálculo de métricas de diferenças de cor, sendo amplamente empregado em processos industriais para avaliar desvios cromáticos entre produtos, lotes ou materiais (SCHANDA, 2007).

Outro ponto é que o CIELAB também é importante nos sistemas de visão computacional e sensores ópticos, pois permite uma representação mais próxima da percepção humana quando comparado com o modelo RGB. Enquanto há pequenas variações no RGB que não correspondem a diferenças perceptivas, no CIELAB essas variações são distribuídas de modo mais uniforme, possibilitando algoritmos de classificação, segmentação e identificação de cores. Dessa forma, diversos sistemas

convertem os valores RGB ou XYZ para CIELAB antes de realizar as análises colorimétricas (SANTOS, 2025).

Portanto, o modelo CIELAB combina a precisão matemática, a uniformidade perceptual e a independência de dispositivos, sendo um modelo importante para aplicações científicas e industriais que precisam de medições confiáveis da cor. Sua adoção amplia a capacidade de avaliar dados de sensores ópticos e garante maior consistência no processo de comparação e reprodução das cores nos diferentes contextos (SANTOS, 2025).

3.5. COMPARAÇÃO DOS MODELOS E APLICAÇÕES ADEQUADAS

Os modelos de representação cromáticas apresentados nos subcapítulos anteriores, RGB, CMYK, CIE XYZ e CIELAB, foram desenvolvidos para atender diferentes necessidades e, frente a esse cenário, são distintos referente ao modelo de organização de cor, tipo de aplicação e grau de fidelidade perceptual, sendo importante a compreensão das diferenças para selecionar o modelo mais adequado do sistema referente a captura, processamento, análise ou reprodução de cor (SANTOS, 2025).

O modelo RGB é amplamente aplicado para dispositivos emissores de luz como os monitores, as câmeras e sensores ópticos. Considerando a sua síntese aditiva, ele consegue descrever a cor por meio da combinação de luz vermelha, verde e azul. Embora seja eficiente para demonstrar as imagens digitais, ele apresenta limitação que é dependente do dispositivo e não apresenta uma uniformidade perceptual, limitando a aplicação para análises colorimétricas mais precisas (SILVA, 2023).

Por outro lado, o modelo CMYK é aplicado nos processos de impressão e na reprodução física da cor, utilizando a síntese subtrativa. Ele usa pigmentos que absorvem seletivamente parte do espectro visível. Sua faixa de cores é mais restrita que o RGB, o que justifica o motivo de determinadas cores vibrantes em telas não conseguirem ser reproduzidas no papel. Apesar disso, o CMYK é indispensável para contextos gráficos e industriais, em que a cor final depende da interação da tinta, do substrato e da iluminação (SILVA *et al.*, 2022).

Já o modelo CIE XYZ foi um marco na colorimetria por ser independente de dispositivos e baseado apenas na percepção humana. Esse modelo descreve qualquer cor visível por meio de valores tri estímulo e é referência para medições científicas. Contudo,

por não ter uniformidade perceptual, as diferenças numéricas em XYZ não correspondem geralmente as diferenças percebidas, o que tornou necessário desenvolver modelos derivados (MOREIRA, 2020).

Dentre os modelos derivados do CIE XYZ, se destaca o CIELAB que introduziu uma organização mais próxima da percepção humana, possibilitando que as distâncias no espaço de cor correspondam de forma mais coerente as diferenças visuais. Por essa razão, o CIELAB é amplamente aplicado em controle de qualidade, na calibração de sensores, na análise de materiais e em sistema de visão computacional. A uniformidade perceptual e a independência de dispositivos o tornaram especialmente adequado para aplicações que exigem precisão e comparabilidade entre diferentes equipamentos (SANTOS, 2025).

Portanto, em síntese cada modelo apresenta um papel específico, no qual RGB é para dispositivos emissores, o CMYK para impressão, o CIE XYZ como referência científica e o CIELAB para análises uniformes. A escolha do modelo adequado depende do objetivo de cada aplicação, do tipo de dispositivo envolvido e do nível de precisão necessário. Em sistemas que usam sensores ópticos, os modelos como CIE XYZ e CIELAB são particularmente relevantes, pois possibilitam interpretar os dados capturados de modo mais fiel a percepção humana e com maior consistência colorimétrica.

4. SENSORES ÓPTICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DA COR

Este capítulo explora os sensores ópticos como ferramentas tecnológicas para detectar e quantificar a composição cromática da luz refletida ou emitida por um determinado objeto. O capítulo começa com uma explicação dos princípios gerais de funcionamento desses dispositivos, desde como capturam a luz incidente até como a convertem em sinais elétricos interpretáveis pelos sistemas digitais. Em seguida, apresenta a diversidade de tecnologias disponíveis no mercado, abrangendo desde sensores de baixo custo como o TCS34725, que são acessíveis e fáceis de integrar em projetos educacionais e de prototipagem, até equipamentos profissionais sofisticados como colorímetros e espectrofotômetros, utilizados em laboratórios e ambientes industriais de alto padrão.

4.1. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE SENSORES DE COR

Os sensores de cores são dispositivos desenvolvidos para detectar e quantificar a composição cromática da luz refletida ou emitida por um determinado objeto. O seu funcionamento é baseado nos princípios ópticos e eletrônicos, convertendo os estímulos luminosos nos sinais elétricos para serem interpretáveis dentro dos sistemas digitais. Embora apresente diferentes estruturas, a maioria dos sensores de cor operam em três etapas fundamentais: captura da luz, filtragem espectral e conversão eletrônica do sinal (LEMOS, 2019).

A primeira etapa que é composta pela detecção da luz incidente geralmente é realizada por fotodiodos ou por fototransistores que são sensíveis ao espectro visível. Esses elementos convertem a energia luminosa na corrente elétrica proporcional a intensidade da luz recebida, no qual a luz refletida por um objeto possui dados sobre sua cor e a quantidade de energia captada em diferentes regiões do espectro possibilita inferir a sua composição cromática (ALBERTO, 2023).

Posteriormente, ocorre a filtragem espectral, a qual é fundamental para separar a luz nos componentes específicos. Os sensores de cor utilizam os filtros ópticos que geralmente apresentam as bandas RGB (vermelha, verde e azul) permitindo que apenas determinadas faixas de comprimento de onda atinjam cada fotodiodo. Dessa forma, o

sensor consegue medir a intensidade luminosa referente a cada banda espectral, realizando um processo semelhante ao funcionamento dos cones presentes na retina humana. Em alguns sensores mais avançados há filtros adicionais como ciano, magenta, amarelo ou canais espectrais mais estreitos, ampliando a precisão da medição (BRIGIDA *et al.*, 2025).

Após a filtragem, os sinais elétricos gerados pelo fotodiodo passam pelo processo da conversão analógico-digital (ADC), em que a corrente elétrica se transforma nos valores numéricos representando a intensidade luminosa em cada canal. Os valores podem ser processados e expressos diretamente em RGB ou convertidos para outros modelos cromáticos como, por exemplo, o CIE XYZ ou CIELAB, conforme a aplicação. A conversão digital possibilita que os microcontroladores, sistemas embarcados ou algoritmos de visão computacional processem e interpretem as cores de modo padronizado (LEMOS, 2019).

Por fim, diversos sensores incorporam os mecanismos de compensação de iluminação, como LEDs integrados ou ajustes automáticos de ganho, permitindo medições mais estáveis mesmo em condições variáveis da luz ambiente. Esse processo é especialmente importante, pois a cor percebida não depende apenas do objeto, mas também da fonte luminosa. Com isso, os sensores com iluminante integrados minimizam essa variabilidade, tornando as medições mais confiáveis (BRIGIDA *et al.*, 2025).

Portanto, os sensores de cor funcionam combinando os princípios ópticos e eletrônicos para transformar luz em informação numérica. A detecção espectral, a filtragem RGB e a conversão digital formam a base do processo, possibilitando que eles sejam amplamente aplicados em automação, robótica, controle de qualidade, agricultura de precisão e sistemas de visão artificial (ALBERTO, 2023).

4.2. SENSORES ACESSÍVEIS: TCS34725

O sensor TCS34725 (Figura 14) é um dos sensores de cor de baixo custo mais utilizados em aplicações embarcadas, automações e projetos educacionais devido a sua relação satisfatória entre precisão, estabilidade e simplicidade de integração. Fabricado pela AMS, o dispositivo combina fotodiodos sensíveis ao espectro visível com filtro RGB e um canal de luz clara (*clear*), além de incorporar um conversor analógico-digital de 16 bits e um iluminante integrado tipo LED branco. Essas características tornam o

TCS34725 uma solução acessível para medições básicas de cor, mesmo em ambientes que apresentem variações de iluminação (COSTA, 2024).



Figura 14 - Sensor TCS34725.

Fonte: Adaptado: COSTA, 2024.

O princípio de funcionamento do sensor é por meio da detecção de luz refletida pelo objeto por meio dos seus quatro canais independentes: vermelho (R), verde (G), azul (B), e claro (C). Cada canal de cor apresenta um fotodiodo dedicado e um filtro espectral que permite a passagem de determinadas faixas de comprimento de onda, enquanto o canal C mede a intensidade total da luz incidente, funcionando como referência para compensação do brilho. Os sinais captados pelos fotodiodos são convertidos em valores digitais pelo ADC interno, permitindo que o microcontrolador leia diretamente os dados via comunicação I²C (TEXAS ADVANCED, 2012).

Uma das principais vantagens do sensor TCS34725 é o LED branco integrado que proporciona uma fonte de iluminação constante e diminui a influência da luz ambiente. Essa característica é importante em sensores de baixo custo, pois eles tendem a apresentar variações muito significativas quando são expostos a diferentes condições de iluminação. Outro ponto importante é que esse sensor também oferece controle automático de ganho e de tempo de integração, possibilitando o ajuste de sensibilidade conforme a intensidade luminosa do ambiente ou do material analisado (TEXAS ADVANCED, 2012).

Entretanto, apesar de promissor, ele apresenta limitações em relação à sua categoria, com o espectro de resposta relativamente amplo, reduzindo a precisão quando comparado aos sensores espectrais ou colorímetros profissionais. Além disso, a sua capacidade de diferenciar nuances próximas de cores são limitadas, especialmente com materiais que apresentam baixa refletância ou superfícies brilhantes. Contudo, para aplicações em que não é necessário alta exatidão como, por exemplo, robótica

educacional, identificação simples de cores e prototipagem, o sensor apresenta desempenho satisfatório considerando seu custo-benefício (COSTA, 2024).

Portanto, o sensor TCS34725 é uma solução eficiente e economicamente viável para ser aplicado nos sistemas que precisam de detecção de cor com baixo custo e fácil integração. Apesar de não ter a precisão elevada de equipamentos laboratoriais, a sua combinação dos filtros RGB, o canal C com ADC interno e iluminante integrado o torna adequado para diversas aplicações práticas, especialmente em sistemas embarcados ou projetos de engenharia com demandas de medições de colorimetria básicas (COSTA, 2024).

4.3. COLORÍMETROS

O colorímetro (Figura 15) é um instrumento com a função de medir a cor de um determinado objeto de forma objetiva, padronizada e independente da percepção humana. O seu funcionamento é baseado na captura da luz refletida pela superfície e conversão da informação em valores numéricos que representam as cores nos modelos colorimétricos, geralmente aplicados nos modelos CIE XYZ e CIELAB, adequados para análises científicas e industriais (OLIVEIRA, 2022).



Figura 15 - Colorímetro Keyence LV-J Series.

Fonte: AGUSTI; CORRÊA, 2018.

Ao contrário de sensores de baixo custo que medem apenas a intensidades RGB, o colorímetro utiliza filtros ópticos calibrados e iluminantes padronizados, com maior precisão e repetibilidade nas medições. Com isso, ele é amplamente aplicado em controle

de qualidade, em indústria têxtil, em alimentos, cosméticos, tintas, plásticos, entre outros processos que exijam avaliação rigorosa da cor (BAPTISTA FILHO *et al.*, 2024).

O seu funcionamento consiste de três principais etapas: a iluminação controlada, a filtragem espectral e a conversão para modelos colorimétricos. Na etapa da iluminação controlada, o equipamento possui uma fonte de luz interna, geralmente LED ou lâmpada padronizada, que ilumina o objeto de modo constante e uniforme, eliminando o impacto da luz ambiente e garantindo que todas as medidas sejam comparáveis (FARIAS, 2023).

Já na etapa de filtragem espectral, a luz refletida pelo objeto passa pelos filtros ópticos que simulam a sensibilidade dos cones humanos, sendo calibrados para corresponder às curvas de resposta do observador seguindo o padrão da CIE. Diferente dos sensores RGB simples, os filtros de um colorímetro são mais precisos e seguem as normas internacionais (YOUNG; FREEDMAN, 2016).

Por fim, na conversão para modelos colorimétricos, os sinais captados são convertidos em valores tri estímulo X, Y e Z referente ao modelo CIE XYZ e, posteriormente, em L^* , a^* e b^* para o modelo CIELAB, possibilitando realizar a análise quantitativa de cor. Essa conversão é importante para aplicações que exigem comparações precisas, como o cálculo de diferença de cor, avaliação de lotes de produção e monitoramento da estabilidade cromática nos processos industriais (AGUSTI; CORRÊA, 2018).

Uma das principais vantagens do colorímetro é a alta repetibilidade devido a combinação entre o iluminante controlado, os filtros calibrados e a geometria de medição padronizada. Com isso, é possível garantir que as medições realizadas em momentos diferentes, por operadores distintos ou em equipamentos semelhantes possuam variações mínimas. Outro ponto é que muitos colorímetros permitem selecionar diferentes iluminantes padrões e geometrias de medições, ampliando a aplicabilidade para diferentes tipos de materiais, tais como superfícies foscas, brilhantes, translúcidas ou texturizadas (LEMOS, 2019).

Embora tenha alta precisão, o colorímetro apresenta limitações quando comparado com o espectrofotômetro que consegue medir a distribuição espectral completa da luz refletida. O colorímetro trabalha com filtros que aproximam a resposta espectral humana, entretanto, ainda pode reduzir a exatidão em materiais com comportamento óptico complexo. Contudo, a sua relação custo-benefício, a facilidade de aplicação e a velocidade de medição faz essa ferramenta ser amplamente utilizada nos setores de tintas, cosméticos, plásticos, têxtil, alimentos e revestimentos (FARIAS, 2023).

Portanto, o colorímetro é uma ferramenta fundamental para realização de medições colorimétricas confiáveis, com precisão superior das de sensores de baixo custos e permite análises quantitativas da cor em modelos padronizados pela CIE. Sua aplicação permite maior controle nos processos produtivos e maior consistência na avaliação dos materiais, sendo indispensáveis para aplicações que necessitam de rigor na reprodução e comparação das cores (BAPTISTA FILHO *et al.*, 2024).

4.4. ESPECTROFOTÔMETROS

O espectrofotômetro é um instrumento de alta precisão aplicado para medição de distribuição espectral da luz refletida, transmitida ou absorvida por um material. Ele realiza uma análise espectral completa, registrando a intensidade da luz em diversos comprimentos de onda, o que o torna o equipamento mais confiável e robusto para medições colorimétricas profissionais, sendo amplamente aplicado em laboratórios, indústrias ou centros de pesquisa (SCHAFER, 2017).

Seu princípio de funcionamento (Figura 16) é baseado na separação da luz em diferentes comprimentos de onda por meio de um monocromador, utilizando uma grade de difração ou filtros espectrais de alta precisão. A luz incidente se direciona ao material e, em sequência, a luz refletida ou transmitida é avaliada pelo detector, no qual o equipamento avalia a intensidade luminosa em intervalos estreitos, geralmente entre 1 nm e 10 nm, ao longo do espectro visível. O processo gera uma curva espectral que representa a assinatura óptica do material, possibilitando identificar nuances que não seriam detectadas pelos sensores RGB ou colorímetros (FARIAS, 2023).



Figura 16 - Etapas de uma medida espectrofotométrica: (a) Fonte de luz, (b) Lente Colimadora, (c) Prisma ou rede de difração, (d) Fenda seletora, (e) Cubeta (vidro, quartzo), (f) Detector, (g) Leitor.

Fonte: FARIAS, 2023.

Por meio da curva espectral, o espectrofotômetro calcula os valores dos modelos CIE XYZ com extrema precisão, considerando iluminantes padrão e geometrias de medição conforme estabelecido pela CIE. Os valores podem ser convertidos para os modelos CIELAB que permite análises avançadas como o cálculo de diferenças de cor, controle de qualidade rigoroso e comparação de lotes de produção. A possibilidade de medir o espectro completo torna o espectrofotômetro indispensável nas indústrias que exigem alta fidelidade cromática como, por exemplo, as indústrias automotivas, gráficas e pesquisas científicas (BARBOSA, 2023).

Uma das principais vantagens do espectrofotômetro é a elevada exatidão e repetibilidade, resultado da combinação entre iluminantes calibrados, controle rigoroso de geometria de medição e análise espectral detalhada. Como o equipamento permite selecionar diferentes iluminantes e geometrias, ele possibilita que a medição seja adequada para diferentes tipos de materiais e essa flexibilidade é fundamental para padronizar processos industriais e garantir consistência nas diferentes etapas da cadeia produtiva (OLIVEIRA; LEITE, 2016).

Embora tenha alta precisão, o espectrofotômetro tem custo elevado e maior complexidade operacional quando comparado com o colorímetro e sensores de baixo custo. O seu uso precisa de calibração recorrente, manutenção adequada e operadores treinados, o que torna sua aplicação mais comum em ambientes laboratoriais ou industriais que exigem controle rigoroso da cor, enquanto as soluções mais simples são aplicadas ferramentas com menor nível de complexidade (AZEVEDO; SOUZA; CASTRO, 2019).

Portanto, o espectrofotômetro apresenta o padrão mais avançado e confiável de medições colorimétricas, apresentando análise espectral detalhada e alta precisão para determinar a cor. Sua capacidade de capturar as informações completas do espectro visível o torna necessário para processos de controle rigoroso, rastreabilidade e comparabilidade de materiais, consolidando-se como o instrumento de referência na ciência da cor (BARBOSA, 2023).

5. APLICAÇÕES EM SISTEMAS AUTOMATIZADOS E INDÚSTRIA

Este capítulo traz a discussão dos fundamentos teóricos para o mundo prático e industrial, apresentando como diferentes setores da economia utilizam sistemas automatizados de identificação de cores em seus processos produtivos. O capítulo aborda aplicações específicas em indústrias como a alimentícia, têxtil, automotiva, cosmética e de polímeros, demonstrando como a automação baseada em cor contribui para aumentar a eficiência produtiva, melhorar a qualidade dos produtos e reduzir desperdícios. Além disso, discute-se o papel estratégico do *Pantone Matching System* como padrão global de referência cromática, facilitando a comunicação e padronização entre fabricantes, designers e clientes.

5.1. APLICAÇÕES DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE COR NAS INDÚSTRIAS

A automação industrial evoluiu de forma acelerada nas últimas décadas devido a necessidade de aumentar a sua eficiência produtiva, diminuir os seus custos operacionais e garantir os padrões rigorosos de qualidade. A identificação automatizada de cores se tornou uma ferramenta estratégica em diversos setores, possibilitando que os processos que inicialmente eram dependentes de inspeção visual humana fossem realizados de forma contínua, padronizada e com alta confiabilidade. Assim, a cor que inicialmente era considerada um atributo subjetivo passou a ser um parâmetro técnico essencial para monitorar processos, validar produtos e garantir as conformidades de acordo com as especificações industriais (ARAUJO, 2025).

A adoção de sistemas automatizados para realizar a análise de cor atende a demanda crescente de precisão e repetibilidade, pois em linhas de produção de alta velocidade torna-se inviável a inspeção manual devido a limitação fisiológica da visão humana quanto pela impossibilidade de manter a atenção constante em ambientes repetitivos. Nesse contexto, a automação elimina as limitações por conseguir realizar medições contínuas, rápidas e livres de subjetividade, garantindo que cada unidade

produzida seja avaliada pelos mesmos critérios, reduzindo variabilidade entre lotes e aumentando a confiabilidade dos processos (VIDAL *et al.*, 2025).

Em ambientes industriais, a identificação das cores também desempenha papel importante no controle de qualidade, pois em setores como o gráfico, alimentício, têxtil e de embalagens, pequenas variações cromáticas podem comprometer a percepção do consumidor, podendo resultar em rejeições e prejuízos financeiros. Com sistemas automatizados, eles são capazes de detectar desvios mínimos, geralmente imperceptíveis ao olho humano, possibilitando o ajuste imediato durante o processo produtivo. Com a capacidade de resposta rápida, reduz os desperdícios e garante que o produto contenha a identidade visual pré-estabelecida pelo fabricante (GOMES, 2024).

Além do controle de qualidade, a automação baseada em cor também é amplamente aplicada nos processos de classificação e de triagem, no qual, em linhas de separação de produto, a cor normalmente é utilizada como critério para distinção de categorias, identificação de defeitos ou direcionar itens para diferentes etapas de processo. Um exemplo de aplicação é nas indústrias alimentícias, em que frutas, grãos e vegetais são classificados conforme sua tonalidade indicando maturação, frescor ou deterioração, realizando a triagem com velocidade e precisão superior aos operadores humanos (VIDAL *et al.*, 2025).

Já a indústria têxtil apresenta como principal desafio a uniformidade de tingimento, no qual variações mínimas da concentração do corante, temperatura ou tempo de imersão podem resultar em diferenças perceptíveis entre rolos de tecidos. Com isso, a automação consegue monitorar de forma contínua todo o processo, ajustando os parâmetros em tempo real para garantir que a tonalidade final esteja dentro das especificações, reduzindo retrabalho, evitando desperdícios e assegurando que o produto apresente a consistência visual desejada, independente do lote (ABREU, 2022).

No setor automotivo, a cor desempenha um papel crítico referente a qualidade, no qual a pintura dos veículos exige precisão extrema, visto que qualquer discrepância entre peças metálicas e plásticas compromete a estética do produto. Dessa forma, os sistemas automatizados conseguem monitorar cada etapa do processo de pintura, desde a preparação até a aplicação das camadas finais para identificar falhas como manchas, variações de brilho ou diferenças de tonalidades, garantindo que o acabamento se mantenha uniforme e visualmente impecável (ARAÚJO, 2025).

A indústria cosmética também tem forte dependência da automação baseada em cor devido aos seus produtos como bases, batons e sombras que precisam apresentar

tonalidades consistentes entre lotes, visto que o consumidor espera que a cor adquirida seja idêntica a apresentada nos catálogos e embalagens. Nesses casos, os sistemas automatizados comparam de forma contínua a cor produzida com o padrão de referência, adequando as formulações e processos para garantir a fidelidade cromática, sendo muito importante nos produtos com grande variedade de tonalidade como as bases, em que pequenas diferenças podem ser facilmente observadas (MEDEIROS; PERES, 2024).

Em indústrias de polímeros e plásticos, a cor é aplicada como um indicador de estabilidade térmica, de degradação por UV e conformidade de formulações, em que a automação monitora as características durante os processos de extrusão, moldagem e resfriamento para garantir que o material apresente as propriedades desejadas. O monitoramento constante da cor também ajuda na detecção de contaminação, variações de pigmentações ou falhas no processo de mistura (ARAUJO, 2025).

A integração entre sistemas de visão computacional e automação industrial ampliou as possibilidades de aplicação da análise de cor, no qual as câmeras industriais de alta resolução ao serem combinadas com algoritmos avançados de processamento de imagem conseguem analisar simultaneamente a cor, a textura, a forma e o padrão, possibilitando identificar defeitos complexos como manchas, riscos, falhas de impressão e inconsistências de acabamento. A visão computacional também possibilita a inspeção dos produtos em movimento, mesmo em altas velocidades, garantindo que nenhum item passe pelo percurso sem ser avaliado (ABREU, 2022).

O uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina potencializou ainda mais a automação baseada em cor, com algoritmos treinados com grandes volumes de dados eles conseguem reconhecer padrões cromáticos complexos, identificam anomalias sutis e prever falhas antes de ocorrerem. Assim, os sistemas aprendem continuamente com o processo produtivo, tornando cada vez mais preciso ao longo do tempo, permitindo que a automação não apenas detecte problema, mas antecipe os ajustes necessários, contribuindo para processos mais inteligentes e autônomos (ARAUJO, 2025).

5.2. *PANTONE MATCHING SYSTEM (PMS)*

Dentro do ecossistema industrial, os sistemas de referência cromática apresentam um papel fundamental para garantir a padronização e a comunicação precisa entre diferentes etapas da cadeia produtiva. Entre esses sistemas, se destaca o *Pantone*

Matching System (PMS), que é utilizado em escala global, amplamente aplicado nos setores gráficos, têxtil, cosmético e de embalagem, com biblioteca padronizada de cores identificadas por um código numérico único, permitindo a comunicação entre fabricantes, designers e clientes de forma objetiva e sem ambiguidade sobre tonalidade desejada (COSTA, 2023).

Contudo, é importante analisar criticamente o papel da *Pantone* no ecossistema industrial e criativo. A empresa detém posição praticamente monopolista no mercado de padronização cromática, o que lhe confere poder significativo sobre como as cores são comunicadas, licenciadas e comercializadas globalmente. O acesso ao sistema PMS é condicionado à aquisição de guias físicos e licenças digitais com custos elevados, renovados periodicamente, o que pode representar barreira para pequenas empresas e profissionais independentes (LORENCINI, 2024).

Um caso emblemático dessa dominância ocorreu em 2022, quando a *Pantone* encerrou sua parceria com a Adobe, fazendo com que as cores PMS passassem a exibir um aviso de bloqueio nos softwares da empresa, a menos que os usuários pagassem por uma assinatura adicional específica da *Pantone*, episódio que gerou amplo debate na comunidade de design e impressão sobre a propriedade e o acesso a padrões cromáticos amplamente utilizados (LORENCINI, 2024).

Esse cenário levanta questionamentos sobre até que ponto um sistema de referência pode ser considerado padrão universal quando seu acesso depende de licenciamento privado. Para a automação industrial, isso tem implicação prática: empresas que integram o PMS em seus sistemas de visão computacional precisam gerenciar custos de licenciamento e atualização das bibliotecas *Pantone*, além de estar sujeitas a mudanças comerciais impostas pelo detentor do sistema (LORENCINI, 2024).

Dessa forma, a automação industrial utiliza o PMS como referência para realização da calibração dos equipamentos e validação dos produtos, garantindo que a cor final seja exatamente ao padrão especificado, mantendo a identidade visual das marcas e assegurando a consistência entre diferentes materiais e processos. A integração do PMS com sistemas automatizados possibilita que colorímetros, espectrofotômetros e câmeras industriais comparem medições em tempo real com os valores de referência (LORENCINI, 2024).

No setor de impressão, por exemplo, o PMS funciona como um padrão que orienta a formulação de tintas e o ajuste de densidade durante a produção. Assim, os sistemas de automação monitoram de forma contínua a cor impressa e ajustam a

densidade da tinta automaticamente para manter a fidelidade ao padrão Pantone. Esse processo é importante nas embalagens de produtos alimentícios, farmacêuticos e cosméticos, no qual a consistência visual é fator crítico para a percepção de qualidade e para a confiança do consumidor (ALBUQUERQUE, 2022).

Já no setor têxtil, o PMS é usado para garantir que os tecidos tingidos correspondam exatamente as cores previamente definidas nos catálogos, evitando rejeição e retrabalhos. A automação possibilita que o colorímetro ou espectrofotômetro realizem medições contínuas no processo de tingimento e compare com os valores obtidos no padrão Pantone, reduzindo significativamente a ocorrência de lotes rejeitados, retrabalhos e desperdícios de matéria-prima, além de garantir que a tonalidade seja reproduzida com precisão, independente da fibra, lote ou planta de produção (ABREU, 2022).

Por fim, o PMS apresenta papel importante para harmonizar as cores entre diferentes substratos, por exemplo, nas embalagens no qual é comum que o mesmo produto use papel, plástico, metal e tinta com composições diferentes. A automação baseada em PMS possibilita que os sistemas ópticos validem se todos os materiais apresentam tonalidades visuais equivalentes, mesmo se suas propriedades físicas diferenciam significativamente, garantindo uniformidade visual no ponto de venda e fortalecendo a identidade da marca (COSTA, 2023).

Outro ponto importante é a integração do PMS com os *softwares* industriais e os sistemas de visão computacional, pois muitas plataformas modernas já possuem bibliotecas Pantone incorporadas, possibilitando que os algoritmos comparem diretamente as medições capturadas pelos sensores com os seus valores de referência, facilitando o controle de qualidade automatizado, diminuindo o tempo de setup e otimizando a eficiência operacional. Em ambientes de produção digital, o PMS auxilia na conversão de cores entre diferentes dispositivos, garantindo consistência entre telas, impressoras e materiais físicos (LORENCINI, 2024).

Portanto, o PMS contribui para a rastreabilidade e documentação de processos, pois ao usar os padrões Pantone como referência, as empresas conseguem registrar de forma precisa as especificações cromáticas de cada produto, auxiliando auditorias, certificações e comunicações com fornecedores internacionais. Com isso, a *Pantone Matching System* não apenas padroniza a cor, mas fortalece a integração entre a automação, o controle de qualidade e a gestão industrial (ALBUQUERQUE, 2022).

5.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE COR NAS INDÚSTRIAS

A automação baseada em cor contribui para a rastreabilidade industrial, em que sistemas integrados registram cada medição realizada ao longo do processo produtivo, possibilitando identificar de forma rápida a origem do desvio cromático. Com isso, é possível realizar de forma simplificada as auditorias, análises de causa raiz e ações corretivas, como também fornecer documentação completa para certificações de qualidade. Essa rastreabilidade é especialmente importante em setores regulados como o alimentício e farmacêutico, no qual a conformidade de padrões é obrigatória (ARAÚJO, 2025).

Outro benefício importante da automação é a redução de desperdícios, pois ao identificar os desvios cromáticos no início do processo, os sistemas automatizados evitam que os produtos fora de especificação avancem para as próximas etapas, reduzindo os retrabalhos e economizando matéria-prima. Isso torna o processo mais eficiente e sustentável, alinhado com as demandas atuais de responsabilidade ambiental e redução de impactos (GOMES, 2024).

A automação também apresenta como benefício a melhora da segurança operacional, pois em ambientes industriais a inspeção manual pode expor os trabalhadores a riscos como o contato com substâncias químicas, máquinas em movimento ou temperaturas elevadas. Com esses sistemas automatizados, há a eliminação da necessidade de intervenção humana nas áreas perigosas, aumentando a segurança e reduzindo os acidentes (ABREU, 2022).

Apesar dos avanços significativos referentes a identificação automatizada das cores, a influência da iluminação, a variabilidade de superfícies texturizadas ou brilhantes e a necessidade de calibração recorrente são fatores que impactam a precisão das medições. Nos ambientes industriais há condições adversas como poeira, vibração e variações térmicas que podem influenciar o desempenho dos sistemas ópticos, além das superfícies metálicas, translúcidas ou altamente reflexivas que também são desafiadoras, pois exigem algoritmos e equipamentos especializados (VIDAL *et al.*, 2025).

Uma tendência importante é a aplicação de algoritmos com correção de cor utilizando a inteligência artificial, no qual eles conseguem compensar as variações de iluminação, reflexo e sombra, tornando as medições mais robustas em ambientes

industriais complexos. A combinação entre IA, visão computacional e sensores ópticos avançados apresentam potencial para transformar o modo em como a cor é analisada na indústria, tornando os sistemas mais precisos, autônomos e adaptativos (MEDEIROS; PERES, 2024).

A integração entre automação e análise de cor também é uma oportunidade para processos produtivos mais flexíveis, em linhas de produção inteligentes, os sistemas automatizados podem ajustar os parâmetros de modo dinâmico, se adaptando a diferentes materiais, especificações ou lotes. Com isso, há maior personalização, redução de tempo de setup e aumento da eficiência operacional que é fundamental para a competitividade industrial (ARAUJO, 2025).

Portanto, embora tenham desafios técnicos e operacionais, os benefícios da automação baseada em cor superam amplamente suas limitações. A combinação entre sensores ópticos, sistemas de referência como o PMS, visão computacional e inteligência artificial estabelece uma base sólida para processos produtivos mais inteligentes, eficientes e confiáveis. Assim, a tendência é que a identificação automatizada de cores se expanda e consolide como uma ferramenta indispensável para a indústria moderna.

5.4. APLICAÇÕES AVANÇADAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E SISTEMAS AUTOMATIZADOS NA DETECÇÃO DE CORES

A aplicação das técnicas de inteligência artificial (IA) nos sistemas de detecção de cores se consolidou como uma das principais frentes da automação industrial devido a necessidade do aumento da precisão, velocidade e confiabilidade dos processos produtivos. Novos estudos demonstram que os algoritmos de aprendizado de máquina conseguem superar as limitações tradicionais referente a iluminação, textura e ruídos visuais, proporcionando resultados mais robustos que os métodos convencionais. Além disso, casos de modelo de *machine learning* aplicado na detecção de cores apresentam desempenho superior nos ambientes industriais dinâmicos, possibilitando que sistemas automatizados identifiquem os padrões cromáticos com maior consistência e adaptação nas condições reais de operação (SHALOO; PRINCZ; EROL, 2023).

Nas abordagens mais aplicadas, as redes neurais convolucionais (CNNs – *Convolutional Neural Network*) se mostraram particularmente eficazes para extração das características visuais complexas, incluindo nuance, cor, brilho e textura. Ao serem

aplicadas na detecção de objetos baseados em cor, conseguem identificar as variações sutis que seriam imperceptíveis ao olho humano, sendo uma ferramenta essencial para inspeção de qualidade nos setores como alimentício, têxtil e de embalagens. A combinação de CNNs e câmeras industriais de alta resolução possibilitam análises em tempo real com linhas de produção de alta velocidade, possibilitando que cada unidade consiga ser avaliada de modo padronizado (MALATHI *et al.*, 2025).

Além disso, os modelos clássicos de redes neurais também são aplicados com sucesso nos sistemas de inspeção cromática, no qual o sistema automatizado de inspeção baseado nas redes neurais artificiais consegue identificar os desvios de cor em superfícies industriais com elevada precisão. Embora tenha arquitetura menos complexas que as CNNs, é possível atingir resultados satisfatórios quando há procedimento adequado de calibração e treinamento, especialmente nos ambientes controlados. Essa abordagem é útil em indústrias que precisam de soluções com menor custo computacional, mas precisam de confiabilidade nas medições (SHALOO; PRINCZ; EROL, 2023).

A técnica de análise colorimétrica combinada com aprendizado de máquina para inspeção de superfícies pode ser utilizada para avaliar a qualidade das superfícies adesivas, demonstrando que a integração de sensores ópticos e modelos de *machine learning* conseguem identificar os defeitos com maior precisão do que os métodos puramente espectrofotométricos. É importante ressaltar que a IA consegue interpretar padrões cromáticos complexos, não considerando apenas a cor absoluta, mas a sua distribuição espacial e as suas variações locais (SENGUPTA; MITTAL; MODI, 2020).

A influência da iluminação é um dos principais desafios para detecção automatizada das cores, no qual soluções baseadas em IA buscam mitigar esse problema. Dentre elas, observam que os modelos de aprendizado supervisionado conseguem ser treinados para compensar variações luminosas, conseguindo ajustar automaticamente a interpretação cromática de acordo com as condições do ambiente. Essa capacidade adaptativa é necessária para aplicações industriais no qual a iluminação não consegue ser rigidamente controlada como as linhas de produção abertas ou ambientes que são sujeitos a interferências externas (SENGUPTA; MITTAL; MODI, 2020).

Outro avanço importante na integração de IA nos sistemas de visão computacional embarcado é a possibilidade de criar dispositivos compactos e de baixo custo que conseguem realizar detecção cromática avançada. Como as redes neurais leves conseguem ser implementadas nos microcontroladores e sistemas embarcados, é possível implementar a automação dos processos em pequenas e médias indústrias com custo

reduzido, que antes não tinham acesso a tecnologias de inspeção sofisticadas. A acessibilidade dessa tecnologia amplia o alcance da automação baseada em cor e auxilia na modernização de diferentes setores produtivos (MALATHI *et al.*, 2025).

A IA também é aplicada nos sistemas de inspeção preditiva, em que algoritmos são treinados para identificar os padrões cromáticos que antecedem as falhas no processo produtivo, em que combinar a análise colorimétrica com aprendizado de máquina conseguem mitigar degradações em superfícies adesivas antes de se tornarem visíveis, possibilitando intervenções antecipadas e reduzindo custos com retrabalho. A abordagem preditiva possibilita um avanço significativo em relação aos sistemas tradicionais que permitem a ação de forma reativa (SHALOO; PRINCZ; EROL, 2023).

Portanto, considera-se que a combinação entre IA, os sensores ópticos e a automação industrial são promissores na detecção automatizada de cores, em que modelos avançados de aprendizado de máquina apresentam maior precisão, adaptabilidade e capacidade de operar em condições complexas, superando limitações dos métodos tradicionais. A evolução tecnológica impulsiona a criação de processos produtivos mais inteligentes, eficientes e confiáveis, consolidando IA como elemento central na automação baseada em cor.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo investigar de forma abrangente e sistemática os fundamentos teóricos, os modelos cromáticos e as tecnologias ópticas aplicadas a identificação automatizada de cores, como também suas aplicações práticas na automação industrial. Desde a introdução, buscou evidenciar que a cor que inicialmente era considerado como atributo subjetivo, assumiu papel estratégico nos processos produtivos modernos, se tornando parâmetro técnico indispensável para controle de qualidade, padronização e tomada de decisão em sistemas automatizados. Dessa forma, o trabalho atendeu o objetivo de contextualizar a importância da cor como elemento técnico e não apenas perceptivo.

Durante o trabalho, foram analisados os modelos cromáticos que permitiram a compreensão de como as diferentes representações matemáticas (RGB, CMYK, CIE XYZ e CIELAB) impactam na forma como a cor é quantificada, interpretada e utilizada nas aplicações industriais. Essa base conceitual apresentou que a escolha do modelo adequado influencia diretamente a precisão das medições, da sensibilidade referente as condições de iluminação e a capacidade de distinguir nuances cromáticas relevantes no processo de inspeção e controle. Assim, considera-se cumprido o objetivo específico relacionado à análise crítica dos modelos cromáticos.

O estudo sobre sensores ópticos evidenciou a diversidade de tecnologias disponíveis, desde sensores de baixo custo usados em protótipos e sistemas embarcados, até instrumentos profissionais como colorímetros e espectrofotômetros aplicados em ambientes laboratoriais e industriais. Essa variedade ressalta que a medição de cor é adaptada as necessidades de cada aplicação, variando a precisão, robustez e a complexidade operacional. Com isso, o objetivo de investigar o funcionamento dos principais sensores ópticos foi plenamente atendido.

Já a análise das aplicações industriais apresentou que o sistema automatizado de cores apresenta papel central em diversos setores, permitindo inspeções contínuas, rápidas e livres de subjetividade, garantindo que cada unidade seja produzida sob critérios padronizados. Além disso, a inclusão do PMS demonstrou a relevância dos sistemas de referência cromática na indústria moderna, permitindo que especificações cromáticas sejam comunicadas entre diferentes equipamentos, materiais e processos para garantir a reprodução fiel das cores, fortalecendo a rastreabilidade e a confiabilidade dos processos

industriais. Essa discussão contribuiu para o cumprimento do objetivo de comparar tecnologias e metodologias de medição e representação de cores.

Por fim, o estudo também possibilitou identificar as lacunas e desafios presentes nas tecnologias atuais como a dependência da condição de iluminação, a influência na textura e refletância das superfícies, as limitações de sensores de baixo custo e a importância de modelos cromáticos mais robustos para aplicações mais avançadas. Essas observações demonstram oportunidades de aprimoramento tecnológico, atendendo ao último objetivo específico proposto.

Portanto, concluiu-se que esse trabalho contribuiu ao reunir os fundamentos teóricos, as tecnologias ópticas e as aplicações industriais, proporcionando uma visão sobre a identificação automatizada de cores. Os resultados apresentados forneceram uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimento de soluções inovadoras na área de automação, controle de qualidade e sistemas ópticos. Acredita-se que a análise de cor continue a se expandir como uma ferramenta indispensável para a indústria moderna, resultando em processos mais eficientes, inteligentes e confiáveis.

Com base nas lacunas identificadas ao longo da revisão bibliográfica, propõem-se algumas direções para pesquisas futuras. Primeiramente, o desenvolvimento e a validação de algoritmos de correção cromática baseados em aprendizado de máquina que operem adequadamente em condições mesópicas e de iluminação variável, visando ampliar a confiabilidade dos sistemas automatizados em ambientes industriais não controlados. Em segundo lugar, estudos comparativos experimentais entre sensores de baixo custo, como o TCS34725, e equipamentos profissionais, como espectrofotômetros, quantificando com precisão as diferenças de desempenho em materiais com propriedades ópticas complexas, como superfícies translúcidas, metálicas ou altamente texturizadas.

Outra direção promissora é a investigação de modelos cromáticos alternativos ao CIELAB para aplicações em visão computacional embarcada, buscando representações que equilibrem uniformidade perceptual e custo computacional reduzido, viabilizando implementações em microcontroladores de baixo custo. Por fim, do ponto de vista crítico, pesquisas sobre modelos abertos e padronizados de referência cromática, que possam substituir ou complementar sistemas licenciados como o PMS em contextos industriais, representam uma contribuição relevante tanto para a acessibilidade tecnológica quanto para a soberania na definição de padrões cromáticos.

7. REFERÊNCIAS

- ABREU, V. A. **Projeto de automação na indústria têxtil baseado em rede de Petri**. 68 f. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.
- AGUSTI, C. A. B.; CORRÊA, L. S. Colorímetro – Sensor de cores RGB e sistema selecionador de amostras. **Instrumentação A**, p. 1-37, 2018.
- ALBERTO, J. V. R. **Sensores e sua importância: descrição e uso na indústria 4.0**. 49 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023.
- ALBUQUERQUE, C. O. **Produção gráfica: princípios fundamentais**. Inter Saberes, 2022.
- ALTMANN, B. A.; GERTHEISS, J.; TOMASEVIC, I.; ENGELKES, C.; GLAESENER, T.; MEYER, J.; SCHAFER, A.; WIESEN, R.; MORLEIN, D. Human Visual System vs. Machine Vision: A Review on Color Interpretation. **Meat Science**, v. 188, 2022.
- AMORIM, A. R.; BRET, B.; GONZÁLEZ-MEIJOME, J. M. Opto-Mechanical Eye Models, a Review on Human Vision Applications and Perspectives for Use in Industry. **Sensors**, v. 22, n. 19, 2022;
- ARAÚJO, F. G. **Pintura automotiva: evolução, inovação e controle de qualidade**. 44 f. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, 2025.
- AZEVEDO, A. L.; SOUSA, A. K. S.; CASTRO, T. J. Espectroscopia óptica de baixo custo: uma estratégia para a introdução de conceitos de física quântica no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, 2019.
- BAPTISTA FILHO, M.; ADMIRAL, T. D.; MACHADO, C. B. H.; LUBE, L. M. Explorando a absorção óptica por meio da construção de um colorímetro de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, p. 1-8, 2024.
- BARBOSA, A. C. **Desenvolvimento de um espectrofotômetro de luz visível**. 45 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2023.
- BEZERRA, B. L. B. C. **Avaliação computacional de sensores ópticos baseados em espectroscopia de plásmons de superfície localizada em nanopartículas metálicas: considerações sobre a sensibilidade e o fator de qualidade**. 74 f. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Paraíba, João Pessoa, 2025.
- BRIGIDA, A. C. S.; GONÇALVES, C. S. L.; BRASIL, M. F.; COSTA, D.; ALVES, L. C. S. D.; SILVA, L. MORAES, R. F. Ensino de física inclusivo com Arduino e sensor de cor. **Revista ARACÊ**, v. 7, n. 4, p. 20244-20268, 2025.

BROADBENT, A. D. Colorimetry, Methods. **Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry**, p. 372-379, 2010.

BURAMBEKOVA, A.; SHAMOI, P. Comparative Analysis of Color Models for Human Perception and Visual Color Difference. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INFORMATION SYSTEM AND TECNOLOGIES (SIST). 5. Anais [...]*. Cazaquistão, 2025.

CIE 191:2010. **Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance**. Vienna: CIE, 2010.

COJOCARU, S. The symbolic and psychosemantic polyvalence of colors. **Review of Artistic Education**, v. 28, p. 231-238, 2024.

CORRÊA, L. A. **Avaliação de sensores ópticos para determinações de fluoreto em amostras de águas**. 46 f. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

COSTA, C. R. **Revisão do sistema de codificação de uma unidade de produção têxtil**. Universidade do Minho, 2023.

COSTA, M. Q. **Desenvolvimento de um dispositivo portátil e wireless para análise colorimétrica RGB de concentração substâncias**. 45 f. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

FAIRCHILD, M. D. **Color Appearance Models**. 2. ed. Rochester: John Wiley & Sons, 2005.

FARIAS, V. C. **Uso da imagem digital para análises químicas**. 37 f. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal do Amazonas, Itacoatiara, 2023.

GOMES, G. T. **Protótipo de um seletor automatizado de blocos por cores**. 76 f. 2024. Projeto Final (Graduação em Engenharia Eletrônica de Telecomunicações) – Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2024.

HALL, J. E.; GUYON, A. C. **Tratado de Fisiologia Médica**. 13. ed. Elsevier, 2017.

KRUSCHWITZ, J. D. T. **Field Guide to Colorimetry and Fundamental Color Modeling**. Spie, 2018.

LEMONS, M. S. C. **Aprimoramento do código-fonte do sensor TCS3200 para utilização na aferição de cores da paleta do “kit LABCON TEST amônia tóxica água doce”**. 30 f. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2019.

LORENCINI, N. A. **Design e identidade visual**. SENAC, 2024.

MALATHI, P.; NITHISHKUMAR, R.; POODHARSHINI, R.; PRABHAKARAN, R. IA-Powered fruit ripeness detection using color and texture features for automation sorting system. **IEEE**, v. 3, 2024.

MEDEIROS, T. F. G.; PERES, J. C. G. O futuro da beleza inteligente: como a integração de IA e micro fluídica está transformando a indústria cosmética. **Contemporânea**, v. 4, n. 12, p. 1-50, 2024.

MEYER, B.; ZOLLINGER, H. R. **Colorimetria**. Clariant, 1998.

MOREIRA, L. B. **Desenvolvimento de uma metodologia para aprovação da cor em fase líquida**. 84 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia na Universidade do Porto, Porto, 2020.

OLIVEIRA, G. C. **Sensor de cor RGB para determinações colorimétricas: avaliação e análise quantitativa de soluções coloridas**. 74 f. 2022. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

OLIVEIRA, P. C. C.; LEITE, M. A. P. Espectrofotometria no ensino médio: construção de um fotômetro de baixo custo e fácil aquisição. **Química Nova na Escola**, v. 38, n. 2, p. 181-184, 2016.

PEDROSA, I. **O Universo da Cor**. SENAC, 2023.

RIDOLFI, L. F. G. G. M. **Construção de Espaços de Cor Euclidianos e Perceptualmente Uniformes com base na fórmula CIEDE2000**. 2012. Tese (Doutorado em Informática) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2012.

ROCHA, J. C. Cor luz, cor pigmento e os sistemas RGB e CMY. **Revista Belas Artes**, v. 3, n. 2, 2010.

RUSS, J. C. **The Image Processing Handbook**. Florida: CRC Press, 1994.

SANTOS, H. B. **Dispositivos analíticos colorimétricos para desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e sensíveis**. 53 f. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

SCHAFER, L. **Desenvolvimento de um sistema de espectroscopia com matriz de detectores sensíveis à posição usando a plataforma Arduino**. 97 f. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Física II) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

SCHANDA, J. **Colorimetry: Understanding the CIE System**. Wiley-Interscience, 2007.

SENGUPTA, S.; MITTAL, N.; MODI, M. Improved skin lesions detection using color space and artificial intelligence techniques. **Journal of Dermatological Treatment**, v. 31, n. 5, p. 511-518, 2020.

SHALOO, M.; PRINCZ, G.; EROL, S. Real-time color detection for automated production lines using CNN-Based Machine Learning. **Nature**, v. 4, p. 167-181, 2023.

SILVA, B. C.; DE MELO, L. Y. M.; SANTOS, P. A. M.; MACHADO, V. M. **Misturador automático de tonalidades de tintas**. 46 f. 2022. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SILVA, R. R. **Método de otimização global hibridizado com inteligência artificial para reprodução de cores em revestimentos cerâmicos impressos a jato de tinta**. 127 f. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

SILVEIRA, L. M. **Introdução à teoria da cor**. 2. ed. Curitiba: Editora UTFPR, 2015.

SZABADVÁRY, F.; ROBINSON, A. **The history of analytical chemistry**. Comprehensive Analytical Chemistry, 1980.

TEXAS ADVANCED. **Datasheet – TCS34725 – Color Light-to-Digital Converter with IR Filter**. Texas Advanced Optoelectronic Solution Inc., 2012.

VIDAL, V. M.; TEIXEIRA, M. B.; BARBOSA, U. C.; OLIVEIRA, T. H.; GALDINO, A. A.; LIMA, T. N.; PERARO, W. N.; MORAIS, W. A.; SOARES, F. A. L.; SOUZA, L. R. Qualidade de frutos de tomate grape em sistema de fertirrigação automatizado sob sensores e convencional. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 1, p. 2-21, 2025.

WARNER, D. J. **The Duboscq colorimeter**. Bulletin of the Scientific Instrument Society, 2006.

WEEKS, A. R. **Fundamentals of Electronic Image Processing**. New York: IEEE Press, 1996.

WYSZECKI, G. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. New York: Wiley, 1982.

YOUNG, H.; FREEDMAN, R. **Ótica e Física Moderna**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.