

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVOS A CORES UTILIZANDO
UMA CAMERA DIGITAL**

FREDERICO NOGUEIRA LEITE

ORIENTADOR: Dr. RICARDO LOPES DE QUEIROZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: 286A/06

BRASÍLIA / DF: 12/2006

FICHA CATALOGRÁFICA

LEITE, FREDERICO

Calibração de Dispositivos a Cores Utilizando uma Câmera Digital [Distrito Federal] 2006.

xiii, 61p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Calibração

2. Câmera Digital

3. Mapeamento

4. Interpolação

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEITE, F. N. (2006). Calibração de Dispositivos a Cores Utilizando uma Câmera Digital. Dissertação de Mestrado, Publicação: 286A/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Frederico Nogueira Leite.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Calibração de Dispositivos a Cores Utilizando uma Câmera Digital.

GRAU/ANO: Mestre/2006.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Frederico Nogueira Leite
Colina bl. K ap. 202 UNB
Brasília / Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Lopes de Queiroz, pela dedicação, apoio e paciência, que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Ao Prof. Dr. Ricardo Jacobi por acreditar em meu trabalho. Ao meu amigo Bruno Macchiavello que me acompanhou e auxiliou durante o desenvolvimento da pesquisa. Aos colegas Rodrigo Balzan, Tiago Alves e Edson Mintsu, Eduardo Peixoto e Alexandre Zaghetto que me auxiliaram sempre que precisei. Aos meus pais, Cleomar Nogueira e Lenícia Leite por me apoiarem em todos os momentos da minha vida e por acreditar em mim. A minha irmã Alyne Leite que sempre esteve comigo nos momentos mais difíceis da minha vida. A minha namorada Sara Fleury pelo seu amor e compreensão.

RESUMO

CALIBRAÇÃO DE DISPOSITIVOS A CORES UTILIZANDO UMA CÂMERA DIGITAL

Autor: Frederico Nogueira Leite

Orientador: Ricardo Lopes de Queiroz

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, dezembro de 2006

Em ambientes que possuem uma grande quantidade de monitores e impressoras, onde a coerência de representação de cor é requerida, a calibração de dispositivo é fundamental. Calibração é em geral executada utilizando ferramentas colorimétricas, usualmente requerendo dispositivos sofisticados como colorímetros ou espectrofotômetros. Nesta tese propomos um método mais barato de executar a calibração de maneira não colorimétrica utilizando uma câmera digital como substituta do colorímetro. Para isto, utilizamos a câmera como um simples dispositivo de mapeamento. A calibração é feita a partir de referências, isto é, um dispositivo é calibrado tendo como referência outro dispositivo. Desenvolvemos um método de evitar ou minimizar a adaptação da câmera e a lidar com metamerismo. Ambos podem prejudicar a medição feita com a câmera. Obtivemos resultados para a calibração WYSIWYG entre monitores e monitor e impressora com uma média de ΔE_{ab} menor que 6. Os resultados são mostrados e discutidos ao longo da dissertação, bem como um modelo de erros.

ABSTRACT

CALIBRATION OF COLOR DEVICES USING A DIGITAL CAMERA

Author: Frederico Nogueira Leite

Supervisor: Ricardo Lopes de Queiroz

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, dezembro of 2006

In environments with a multitude of monitors and printers, and where coherence of color representation is required, device calibration is vital. Calibration is in general performed using colorimetric tools, usually requiring sophisticated devices such as colorimeters or spectrophotometers. We propose a cheaper method to perform non-colorimetric calibration using regular digital cameras as surrogates of colorimeters. For that, we use the camera as a simple mapping device and calibration is done by reference, i.e. a device is calibrated to have the response of another “reference” device. We devise methods to avoid or minimize camera adaptation and to deal with metamerism. Both can impair the measurements made by the camera. We obtained results for WYSIWYG calibration between disparate monitors yielding an average ΔE_{ab} lower than 6. Results are shown and discussed along with an error model.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	I
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	2
1.3	OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO	3
1.4	SUMÁRIO DO TRABALHO	4
CAPÍTULO 2	CONCEITO DE COR E MANEIRAS DE MEDI-LA	5
2.1	O ESPECTRO DE CORES	5
2.2	TRICROMATICIDADE	7
2.3	SISTEMA VISUAL HUMANO	8
2.4	CORES PRIMÁRIAS ADITIVAS (RGB) E SUBTRATIVAS (CMY)	10
2.5	FONTE DE LUZ.....	11
2.5.1	<i>Meios de Propagação da Luz</i>	12
2.6	TEMPERATURA DE COR	13
2.7	PADRÃO DE ILUMINANTES.....	14
2.8	ESPAÇO DE COR	15
2.8.1	<i>Brilho Tonalidade e Saturação</i>	16
2.8.2	<i>Modelos de cores</i>	17
2.8.3	<i>Modelo XYZ</i>	16
2.8.4	<i>Modelos CIELAB</i>	17
2.9	METAMERISMO	22
2.10	CORREÇÃO GAMA	23
2.11	MANEIRAS DE MEDIR CORES	24
CAPÍTULO 3	GERENCIAMENTO TRADICIONAL DE CORES	26
3.1	REPRODUÇÃO DE CORES NO ESPAÇO DE COR DEPENDENTE DO DISPOSITIVO.....	26

3.2	REPRODUÇÃO DE CORES NO ESPAÇO DE COR INDEPENDENTE DO DISPOSITIVO.....	27
3.3	COMPOSIÇÃO BÁSICA DO GERENCIAMENTO DE CORES	28
3.4	DIFERENÇA ENTRE CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	32
3.5	PERFIS PARA MONITORES	32
3.6	CRIANDO PERFIS PARA IMPRESSÃO	34
3.7	MAPEAMENTO DE CORES	35
CAPÍTULO 4 CALIBRAÇÃO POR REFERÊNCIA UTILIZANDO CAMERAS DIGITAIS.....		38
4.1	CALIBRAÇÃO POR REFERÊNCIA	38
4.2	USANDO A CÂMERA DIGITAL PARA MEDIR CORES	40
4.2.1	<i>Invariância da Câmera Digital</i>	40
4.3	METAMERISMO	47
4.4	RESULTADOS	48
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES.....		55
5.2	APRESENTAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DO MESTRADO	56
5.3	PERPECTIVAS PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		58

LISTAS DE TABELA

Tabela 4.1 - Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em diferentes posições com relação ao ponto mais central da imagem, conforme a Figura 33.....42

TABELA 4.2 - Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central de uma imagem *raw*, conforme a Figura 33..42

Tabela 4.3 - Resultado do erro ΔE_{ab} das amostras de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central de cada região, conforme Figura 35. A Tabela (a) indica o erro ΔE_{ab} da região com *clusters* e (b) o erro ΔE_{ab} da região sem *clusters*.....44

Tabela 4.4 - Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central, conforme Figura 36.....45

Tabela 4.5 - Resultados da invariância temporal.....46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESPECTRO DE CORES VISTO AO SE PASSAR LUZ BRANCA ATRAVÉS DE UM PRISMA.....	6
FIGURA 2 - UMA SEÇÃO DO ESPECTRO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA MOSTRANDO A ESCALA DE COMPRIMENTO DE ONDA CORRESPONDENDO AO ESPECTRO VISÍVEL [11].	7
FIGURA 3 - COMPRIMENTO DE ONDA RECEPTIVO DOS CONES L,M,S.	8
FIGURA 4 - O ESPECTRO VISÍVEL [12].	8
FIGURA 5 - DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA SEÇÃO DO OLHO HUMANO [12].	9
FIGURA 6 - CÉLULAS SENSÍVEIS À LUZ, CONE E BASTONETE.	10
FIGURA 7 - CORES PRIMÁRIAS DA LUZ E DE PIGMENTOS [9].	11
FIGURA 9 - CORES SECUNDÁRIAS DA LUZ E DE PIGMENTOS [9].	11
FIGURA 10 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DE COR DE UM CORPO NEGRO.	14
FIGURA 11 - EXPERIMENTAÇÃO DO TRI-ESTÍMULO.....	15
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DE ESPAÇO DE COR [18].	16
FIGURA 13 - TONALIDADE, BRILHO/LUMINOSIDADE E SATURAÇÃO [17].	17
FIGURA 14– DIAGRAMA DE CROMATICIDADE CIE [20].	19
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DE ESCALA DE COR NO DIAGRAMA DE CROMATICIDADE DO CIE [20].	20
FIGURA 16 – MODELO DE COR CIELAB [19].	22
FIGURA 17 - EFEITO DO METAMERISMO NAS AMOSTRAS DE ACORDO COM A FONTE DE LUZ. [17].	22
FIGURA 18 – EXEMPLO DA CORREÇÃO GAMA DE UM CRT.	23
FIGURA 19 – COLORÍMETRO EYE ONE DISPLAY BY GRETAG MACBETH.....	24
FIGURA 20 - ILUSTRAÇÃO DE UM ESPECTROFOTÔMETRO E O RESULTADO ESPECTRAL DA AMOSTRA DE COR LOCALIZADA NA REGIÃO ALVO. [22].	25
FIGURA 21 - CORES DE ENTRADA SÃO TRANSFORMADAS PARA UM DISPOSITIVO DE SAÍDA.	26
FIGURA 22 - REPRESENTAÇÃO DAS CORES DEPENDENTES DO DISPOSITIVO [14].	27
FIGURA 23 - REPRESENTAÇÃO DAS CORES INDEPENDENTES DO DISPOSITIVO.	27
FIGURA 24 - TRIANGULAÇÃO DO ESPAÇO DEPENDENTE CMYK PARA O ESPAÇO INDEPENDENTE CIELAB [22] PÁG.70.	28

FIGURA 25 - OBJETO DE ACABAMENTO PERCEPTÍVEL. A IMAGEM É AJUSTADA DE ACORDO COM OS LIMITES DO DISPOSITIVO DE DESTINO [14].	30
FIGURA 26 – OBJETO DE ACABAMENTO POR SATURAÇÃO. PRESERVA-SE AS CORES SATURADAS NO PERFIL DA IMAGEM DE ORIGEM E MUDA-SE A TONALIDADE E BRILHO [14].	30
FIGURA 27 - OBJETIVO DE ACABAMENTO COLORIMETRIA RELATIVA. É PRESERVADA A COR QUE ESTÁ DENTRO DE AMBAS AS GAMAS DE CORES, PORÉM, SE REMAPEIA O PONTO BRANCO E O PONTO PRETO PARA O NOVO ESPAÇO DE COR, RESULTANDO EM QUE A ESCALA DE CINZA SEJA MANTIDA [14].	31
FIGURA 28 - OBJETIVO DE ACABAMENTO COLORIMETRIA ABSOLUTA. SEMELHANTE A COLORIMETRIA A RELATIVA, PORÉM, NEM O PRONTO BRANCO E NEM O PRONTO PRETO SÃO AJUSTADOS [14].	32
FIGURA 29 - CALIBRANDO O MONITOR UTILIZANDO UM COLORÍMETRO.	33
FIGURA 30 - CALIBRANDO O MONITOR UTILIZANDO UM COLORÍMETRO [18].	34
FIGURA 31 - CALIBRANDO A IMPRESSORA UTILIZANDO UM ESPECTROFOTÔMETRO.	35
FIGURA 32 - A DIVISÃO DE UM TETRAEDRO $P_0P_1P_2P_3$ DENTRO DE QUATRO SUB-TETRAEDRO $PP_1P_2P_3$, $P_0PP_2P_3$, $P_0P_1PP_3$ E $P_0P_1P_2P$, DEFINIDO PELA ENTRADA DO PONTO P. [21] PÁG. 89.	36
FIGURA 33 - NO MÉTODO PROPOSTO DE CORREÇÃO, USA-SE UMA CÂMERA DIGITAL NO LUGAR DE UM COLORÍMETRO OU UM ESPECTROFOTÔMETRO. AS CORES MOSTRADAS PELO MONITOR CRT E IMPRESSAS SÃO TRANSFERIDAS PARA O ESPAÇO DE COR RGB DA CÂMERA DIGITAL E PARA REALIZAR O MAPEAMENTO ENTRE OS DISPOSITIVOS UTILIZAMOS A INTERPOLAÇÃO TETRAEDRAL.	39
FIGURA 34 - UMA ÚNICA AMOSTRA DE COR REPLICADA EM DIFERENTES POSIÇÕES PODER SER VISTAS COMO CORES DIFERENTES POR UMA CÂMERA.	41
FIGURA 35 - IMAGEM DIVIDIDA EM DUAS PARTES: METADE COM <i>CLUSTERS</i> E A OUTRA METADE SEM <i>CLUSTERS</i>. UMA ÚNICA AMOSTRA DE COR REPETIDA EM DIFERENTES POSIÇÕES É MEDIDA COM RELAÇÃO A AMOSTRA MAIS CENTRAL.	43
FIGURA 36 - UMA ÚNICA AMOSTRA DE COR REPLICADA EM DIFERENTES POSIÇÕES CERCADA POR <i>CLUSTERS</i>.	45
FIGURA 37 - MAPEAMENTO ENTRE ESPAÇO DE CORES. (A) REPRESENTA O ESPAÇO DE COR RGB DO MONITOR, E (B) REPRESENTA O ESPAÇO DE COR RGB DA CÂMERA DIGITAL. OS BURACOS NO ESPAÇO DE COR DA CÂMERA DIGITAL INDICAM UMA REGIÃO DE CORES QUE A CÂMERA NÃO CONSEGUE REPRODUZIR, DEVIDO AO METAMERISMO.	47

FIGURA 38 - ESPAÇO DE COR LINEAR E NÃO LINEAR. NO ESPAÇO DE COR RGB (A), ESTÁ SENDO REPRESENTADO O ESPAÇO DE COR LINEAR E O RGB (B) ESTA SENDO REPRESENTADO O ESPAÇO DE COR NÃO-LINEAR E OS PONTOS AZUIS SÃO AS REGIÕES METAMÉRICAS.....	48
FIGURA 39 - HISTOGRAMA DO ERRO ΔE^*_{AB} ENTRE MONITORES ANTES DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO.....	49
FIGURA 40 - HISTOGRAMA DO ERRO ΔE^*_{AB} ENTRE MONITORES DEPOIS DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO A CÂMERA <i>R817</i>.....	50
FIGURA 41 - HISTOGRAMA DO ERRO ΔE^*_{AB} ENTRE MONITORES DEPOIS DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO A CÂMERA <i>R707</i>.....	50
FIGURA 42 - TESTE <i>QUI-QUADRADO</i> T_{χ^2} PARA VÁRIOS VALORES DE “A” (NA DISTRIBUIÇÃO MB) ANTES DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO	52
FIGURA 43 - TESTE <i>QUI-QUADRADO</i> T_{χ^2} PARA VÁRIOS VALORES DE “A” (NA DISTRIBUIÇÃO MB) DEPOIS DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO, UTILIZANDO A CÂMERA <i>R817</i>.....	52
FIGURA 44 - TESTE <i>QUI-QUADRADO</i> T_{χ^2} PARA VÁRIOS VALORES DE “A” (NA DISTRIBUIÇÃO MB)DEPOIS DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO UTILIZANDO A CÂMERA <i>R707</i>.....	53
FIGURA 45 - CORES GERADAS NO MONITOR, UTILIZADAS PARA O TESTE SUBJETIVO	53
FIGURA 46 – RESULTADO DO TESTE DE VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DA IMPRESSORA. O EIXO X INDICA O NUMERO DE CADA COR NA FIGURA 45, E O EIXO Y INDICA A FREQUÊNCIA DE SELEÇÃO DE CADA COR COMO SENDO MAIS SIMILAR À COR ORIGINAL MOSTRADA NO MONITOR.	54

LISTAS DE SIMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

RGB	- Cores primárias: Vermelho (R), Verde (G) e Azul (B).
CMY	- Cores secundárias: Ciano (C), Magenta (M) e Amarelo (Y).
CMYK	- Cores secundárias incluindo a cor preta (K).
Lab e XYZ	- Espaços de cores independentes.
ΔE_{ab}	- Distância Euclidiana no espaço cor independente Lab.
CRT	- Tubo de Raios Catódicos.
LCD	- Liquid Crystal Display ou Monitor de Cristal Liquido.
PDF	- Função de densidade de probabilidade.
MB	- Maxwell Boltzmann.
WYSIWYG	- “ <i>What you see is what you get</i> ”, cujo a tradução remete algo como “O que você vê é o que você tem”.
ICC	- <i>International Color Consortium</i> .
CIE	- <i>Comission International del’Eclairage</i> ou Comissão internacional de Iluminação.
HSB	- <i>Hue, Saturation and Brightness</i> ou Matiz, Saturação e Brilho.
HLS	- <i>Hue, Lightness and Saturation</i> ou Tonalidade, Luminosidade e Saturação.
V_{out}	- Voltagem de Entrada.
V_{in}	- Voltagem de Saída.
γ	- <i>Gamma</i> .
PCS	- <i>Profile Connection Space</i> , é o padrão utilizado para medir e definir a cor nos dois modelos de cores, o CIEXYZ e o CIELab.
CMM	- Color Management Module ou Módulo de Gerenciamento de Cores, parte do gerenciamento de cores.
CMS	- Color Managemen System ou Sistema de Gerenciamento de Cores, realiza a conversão dos valores RGB ou CMYK usando os dados contidos nos perfis.
LUT	- Lookup Table.
PDF	- Densidade de Probabilidade.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A demanda por calibração de cores em dispositivos digitais tem aumentado significativamente nos últimos anos. A crescente troca de imagem a cores entre muitos sistemas requer uma representação de imagem coerente nos dispositivos de saída. Para poder alcançar uma reprodução de cores consistente em um sistema de imagens é necessário entender as características das cores geradas nos diversos dispositivos envolvidos e executar um adequado algoritmo de correção. Este problema geralmente é resolvido com a calibração de cada dispositivo.

Atualmente dispositivos que conseguem reproduzir e capturar imagens coloridas são comercializados de maneira abundante, normalmente a um preço acessível, porém, cada dispositivo representa uma imagem de acordo com as suas características físicas e químicas, isto é, a imagem é representada de forma distinta em todos eles. A troca de imagens entre equipamentos se tornou algo comum, mas manter a coerência destas é uma tarefa árdua e dispendiosa.

A coerência da imagem pode ser feita a partir de um processo de calibração do dispositivo. Este processo padroniza a forma que o dispositivo vai representar cada cor, fazendo com que uma imagem seja representada por diferentes dispositivos de uma mesma maneira, ou seja, a imagem terá o mesmo espectro em diferentes dispositivos.

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Para realizar a calibração de dispositivos a partir da técnica clássica é necessário realizar medidas colorimétricas que fazem necessário o uso de instrumentos especializados como um colorímetro ou espectrofotômetro que são normalmente caros para um usuário comum.

No proposto método de calibração, utiliza-se uma câmera digital ao invés de um colorímetro ou um espectrofotômetro. A câmera digital é um dispositivo acessível ao usuário comum, portanto, a troca de imagens entre dispositivos pode ser realizada com coerência a um baixo custo.

A calibração do dispositivo, com relação ao proposto método, tem como resposta a referência do outro dispositivo. Portanto deve-se garantir que as amostras de cores capturadas pela câmera digital mantenham-se íntegras, ou seja, os dados obtidos em diferentes intervalos de tempo, não poderão sofrer alterações ao longo do tempo.

A automatização de uma câmera digital pode causar sérios problemas no processo de calibração, pois uma imagem nunca será a mesma se capturado em distintos intervalos de tempo, causando inconsistência no processo. Portanto manter a câmera estável é uma tarefa indispensável. O metamerismo é um fenômeno que será explicado depois, e que também deve ser controlado, para garantir a integridade da calibração.

As imagens não podem ser capturadas pela câmera digital de qualquer maneira, alguns cuidados devem ser levados em consideração, como: o controle da luz ambiente, a posição da câmera com relação à imagem a ser capturada, limpeza do monitor, a quantidade de brilho e contraste, entre outros, para garantir a fidedignidade dos dados.

1.2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Dois diferentes métodos de calibração foram desenvolvidos pelo [1]. O primeiro é um método clássico, que utiliza ferramentas colorimétricas específica para medir cores, e o segundo é a técnica “*closed-loop*” que utiliza um *scanner* como substituto da ferramenta colorimétrica para calibrar uma impressora, [2] também realiza a calibração de dispositivos utilizando um *scanner* e o [3] realiza a calibração de um *scanner*.

O autor [4] desenvolveu um método de caracterização de uma impressora. A caracterização fornece a transformação inversa do espaço de cor independente do dispositivo CIELAB para o espaço de cor dependente do dispositivo CMYK. O autor [5] descreve o mapeamento entre diferentes *gamuts*, utilizando um algoritmo de interpolação. O autor [6] descreve dois métodos de interpolação, um bidimensional e outro tridimensional. Para esta pesquisa utilizamos a interpolação tetraedral (3D).

Um instrumento de calibração foi desenvolvido pelo autor [7], Este é baseado em diodos emissores de luz, localizados em um *grid*, as cores do Macbeth ColorChacker são emitidas

por estes diodos. Com base na idéia do autor, cores foram geradas por um dispositivo que emite luz e capturados por uma câmera digital.

1.3 OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO

O gerenciamento de cores é indispensável para obter imagens fidedignas em dispositivos distintos. O gerenciamento de cores permite a criação de mapas matemáticos de cores para os mais diferentes dispositivos, que são chamados de perfis ICC (*International Color Consortium*). Estes perfis ICC permitem que a cor apresentada seja independente do dispositivo.

O principal objetivo do trabalho é desenvolver um método de calibração de baixo custo e confiável, de modo que o usuário comum tenha acesso a tal tecnologia. Neste método, um colorímetro e um espectrofotômetro são substituídos por uma câmera digital, minimizando assim, o custo com equipamentos colorimétricos. As metas do método proposto de calibração são listadas a seguir:

- Propor um método de calibração de cores utilizando câmeras digitais
- Manter a câmera digital estável.
- Minimizar o erro proveniente do metamerismo.
- Realizar um teste objetivo, onde um colorímetro irá medir as cores de dois monitores, antes e depois do método proposto de calibração, e comparar os resultados.
- Realizar um teste subjetivo, onde uma impressora será calibrada tendo como referência um monitor. Voluntários irão comparar as cores impressas, calibradas com as cores não calibradas e julgar qual delas mais se aproxima com as cores geradas pelo monitor.

1.4 SUMÁRIO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o presente capítulo introdutório, o primeiro deles. O capítulo 2 apresenta conceitos básicos de cores, envolvendo o espectro de cor, tricromaticidade, sistema visual humano, entre outros. Este capítulo ajudará no entendimento dos princípios básicos da colorimetria.

No capítulo 3 serão abordados os princípios básicos do gerenciamento de cores. A compreensão destes princípios é de grande importância para o entendimento do processo clássico e do processo proposto de calibração.

No capítulo 4 serão mostrados os resultados dos experimentos, onde será discutido a invariância da câmera digital, o metamerismo e os resultados dos testes objetivos e subjetivos de calibração.

Finalmente, o capítulo 5 é destinado às conclusões finais do trabalho, detalhando a contribuição do mestrando e as perspectivas para a continuidade de pesquisas futuras.

CAPÍTULO 2 CONCEITO DE COR E MANEIRAS DE MEDI-LA

Atualmente, imagens coloridas são presenciadas diariamente através de uma impressão colorida, fotografias, televisão, monitores de computador, em filmes e em diversos outros locais. Porém, manter a fidelidade das imagens coloridas transformou-se em uma árdua tarefa, pois os equipamentos não conseguem reproduzir cores consistentes em diversos aparelhos. Daí surge a necessidade de se calibrar estes dispositivos, a fim de se sanar este problema.

Antes de discutir-se sobre calibração, será abordar alguns conceitos, como: fonte de luz, temperatura de cor, cor do objeto, sistema visual humano, cores primárias aditivas (RGB) e subtrativas (CMY), metamerismo, espaço de cor, etc. E ainda, modelos de cores e as formas de medi-las

2.1 O ESPECTRO DE CORES

Embora o processo seguido pelo cérebro humano na percepção de cores seja um fenômeno fisiopsicológico, que ainda não é completamente compreendido, a natureza física das cores pode ser expressa em uma base formal suportada por resultados experimentais e teóricos.

Em 1666, Sir Isaac Newton fundamentou a ciência das cores, quando observou que a luz do sol é composta por uma mistura de todas as cores de um espectro. Ele descobriu que quando um feixe de luz solar é passado através de um prisma de vidro, o feixe de luz emergente não é branco, mas, ao contrário, consiste de um espectro de cores contínuo variando do violeta ao vermelho. O espectro de cores pode ser dividido em sete amplas regiões: violeta, azul, índigo, verde, amarelo, laranja e vermelho [8], conforme Figura 1. Quando visualizado em cores reais nenhuma cor no espectro termina abruptamente, mas cada cor mistura-se suavemente com a próxima, como visto na Figura 2.

As cores de um objeto percebidas pelos seres humanos são determinadas pela natureza da luz refletida do objeto. A luz visível é composta de uma banda de frequências relativamente estreita no espectro de energia eletromagnética [9]. Um corpo que reflete a luz de forma balanceada em todos os comprimentos de onda visíveis é visto pelo

observador como o espectro de uma cor branca. Contudo, um corpo que favoreça a reflectância de um limitado espectro de cor, exibirá cor [10]. Digamos que um objeto verde reflete a luz com o comprimento de onda primariamente no intervalo de 500 a 570nm e ele irá absorver a maior parte da energia de outros comprimentos de onda [11].

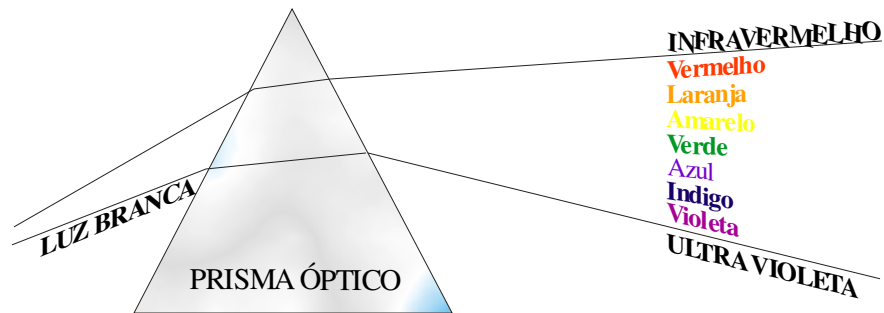


Figura 1 - Espectro de cores visto ao se passar luz branca através de um prisma.

A cor de um material é determinada pelas médias de frequência dos pacotes de onda que as suas moléculas constituintes refletem. Um objeto terá determinada cor se não absorver justamente os raios correspondentes à frequência daquela cor [11].

O infravermelho ou IR, do inglês *Infrared*, é uma parte da radiação eletromagnética cujo comprimento de onda é maior que o da luz visível ao olho do ser humano. Equipamentos como câmeras digitais e *scanners* possuem sensores muito sensíveis ao IR, utilizados para registrar a intensidade de luz, portanto estes equipamentos não funcionam de forma desejada quando expostos ao infravermelho.

O ultravioleta (UV) também pode resultar em alguns problemas para o gerenciamento de cores: Por exemplo, na produção de papéis e tintas, frequentemente adiciona-se clareador UV para produzir um papel muito branco ou uma tinta muito brilhante [5].

Para entender a ciência das cores é essencial compreender a caracterização da luz. A luz pode ser acromática ou cromática. Se a luz for acromática (sem cores), seu único atributo é sua intensidade. O termo nível de cinza refere-se a uma medida escalar de intensidade que varia do preto aos cinzas, e finalmente ao branco. A luz cromática abarca o espectro de energia eletromagnética desde aproximadamente 400 a 700nm, veja na Figura 2.

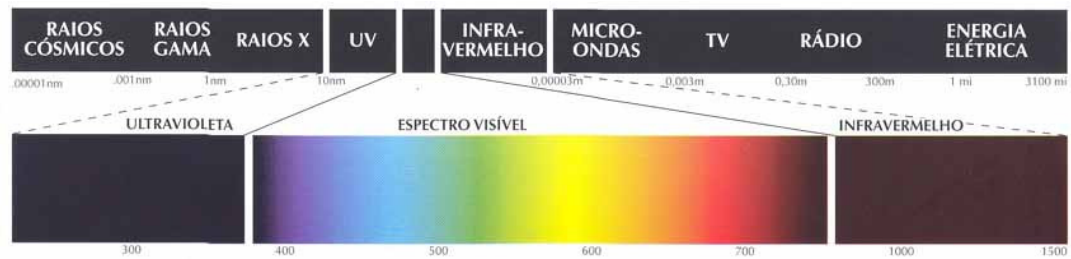


Figura 2 - Uma seção do espectro de energia eletromagnética mostrando a escala de comprimento de onda correspondendo ao espectro visível [11].

A qualidade de uma fonte de luz cromática possui três valores básicos: radiância, luminância e brilho. A radiância é a quantidade total de energia que flui de uma fonte de luz, sendo usualmente medida em watt (w). A luminância é medida em lúmen (lm), dá uma medida da quantidade de energia que um observador percebe de uma fonte de luz. O brilho é um descritor subjetivo, que é praticamente impossível de ser medido [8], ele incorpora a noção acromática de intensidade, sendo um dos fatores chave na descrição da sensação de cores.

2.2 TRICROMATICIDADE

As cores que o sistema visual humano consegue perceber estão relacionadas à energia radiante que se propaga por meio de onda eletromagnética. Porém a sensação de cor somente existe na nossa mente, após o sistema visual humano obter respostas de um determinado comprimento de onda.

A luz entra pela córnea e é focalizado sobre a retina onde os fotossensores são ativados baseados no número de fótons absorvidos. O fóton é a menor porção de radiação eletromagnética, qualquer que seja o comprimento de onda, frequência ou energia [11]. Há dois tipos de fotorreceptores, chamados de cones e bastonetes: Os cones são usados para cor e visão diurna e os bastonetes são usados para visão com baixa luminosidade. Há três tipos de cones separados por baixo, médio e longo baseados sobre a quantidade relativa de sensibilidade a luz de cada um. O comprimento de onda (*wavelength*) sensitivo longo (L) são frequentemente chamados de cones vermelhos, o cone médio (M) é chamado de verde, e o baixo (S) é chamado de azul. A curva espectral está relacionada diretamente à energia

espectral da luz refletida por um objeto, que está representada a partir de um diagrama. A luz, refletida por um objeto verde contém um pouco de fótons de comprimentos de onda curto, um pouco de fótons de comprimento de onda longo e a maior parte está compreendida nos fótons de comprimento de onda médio, conforme Figura 3.

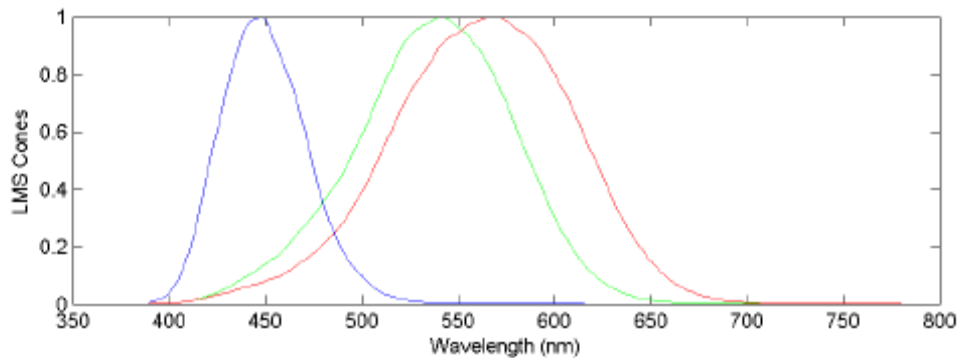


Figura 3 - Comprimento de onda receptivo dos cones L,M,S.

2.3 SISTEMA VISUAL HUMANO

A cor é formada no sistema visual humano a partir de impulsos elétricos gerados por sensores sensíveis à luz, existentes nos olhos. Estes sensores podem emitir diferentes impulsos elétricos ao cérebro variando de acordo com o comprimento de onda de cada cor primária. O cérebro recebe e processa esses sinais resultando na sensação da visão das cores.

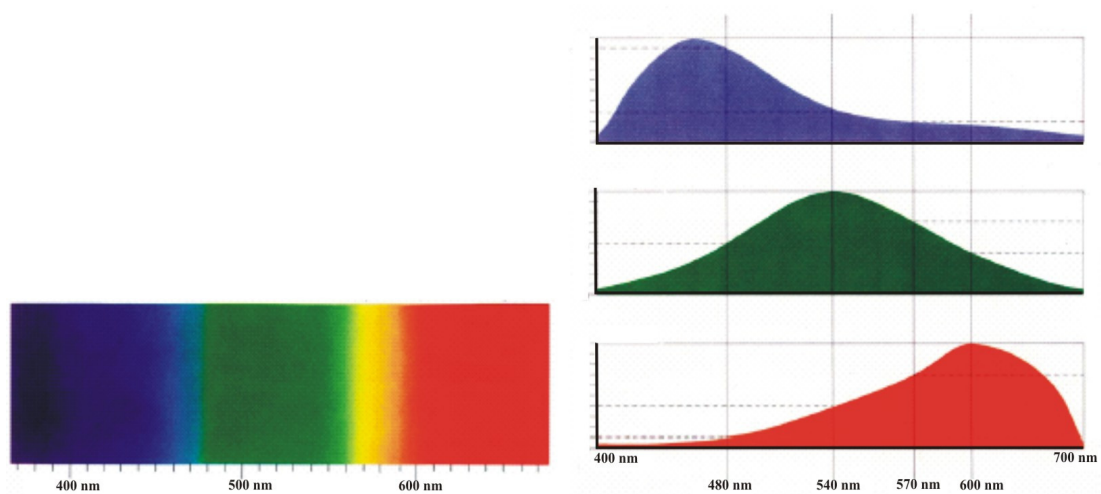


Figura 4 - O Espectro Visível [12].

As cores que o sistema visual humano consegue visualizar são provenientes de combinações de cores primárias. O cérebro divide as cores em regiões, conforme Figura 4.

O cristalino absorve aproximadamente 8% da luz, as luzes infravermelha e ultravioleta são ambas intensamente absorvidas por proteínas na estrutura do cristalino e, quando excessivas, podem danificar o olho [13]. A luz passa da córnea até o cristalino através de uma abertura chamada pupila. Esta abertura encolhe ou dilata de acordo com a intensidade da luz através da ação da íris, conforme Figura 5.

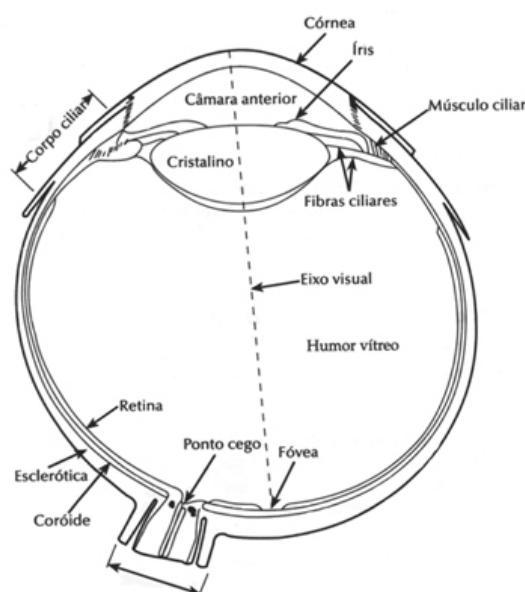


Figura 5 - Diagrama simplificado de uma seção do olho humano [12].

Sobre toda a porção posterior do olho encontra-se uma membrana denominada retina. Quando o olho focaliza um objeto, a luz que reflete do mesmo forma uma imagem sobre a retina. A retina possui receptores de luz sobre sua superfície. O número de cones em cada olho varia de 6 a 7 milhões [14]. Eles são posicionados principalmente na região central da retina, chamada fóvea, sendo altamente sensíveis a cores. Os músculos que controlam o olho rotacionam o globo ocular até que a imagem do objeto de interesse caia sobre a fóvea. A visão pelos cones é chamada fotópica ou de luz clara [15].

No sistema visual humano os bastonetes são encontrados em uma porção maior, com relação aos cones, cerca de 75 a 150 milhões e são distribuídos sobre a superfície da retina. Os bastonetes são muito úteis para detectar movimento e para visualização com baixo nível de luminosidade e diferentemente dos cones, que não estão envolvidos com a visão colorida [13].

Os fotorreceptores e as terminações nervosas sensíveis à luz estão localizados sobre a superfície da retina. Estas células são denominadas cone e bastonete e podem ser visualizadas na Figura 6.

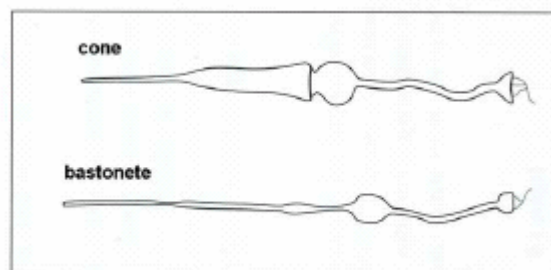


Figura 6 - Células sensíveis à luz, Cone e Bastonete.

2.4 CORES PRIMÁRIAS ADITIVAS (RGB) E SUBTRATIVAS (CMY)

Todas as cores que o ser humano consegue visualizar podem ser geradas por combinações variáveis das três cores chamadas primárias: vermelho, (R, do inglês *red*), verde (G, do inglês *green*) e azul (B, do inglês *blue*). A Comissão Internacional sobre Iluminação (CIE – *Comission Internationale del'Eclairage*) padronizou que os comprimentos de onda das cores primárias são: azul = 435,8nm, verde = 546,1 nm, e vermelho = 700 nm [8].

As cores secundárias da luz podem ser produzidas a partir da adição das cores primárias, sendo estas: magenta (vermelho e azul), ciano (verde e azul) e amarelo (vermelho e verde). A mistura das três cores primárias, ou uma secundária com sua cor primária oposta, em intensidade correta produz a luz branca. Este resultado pode ser visto na Figura 7. A mistura das cores secundárias com o seu primário oposto, produz o preto [10], visto na Figura 8.



Figura 7 - Cores primárias [9].

Os dispositivos que reproduzem ou capturam imagens coloridas disponíveis no mercado, utilizam o mesmo princípio de percepção visual humana. O método de interpretação da cor é baseado exatamente na resposta humana aos estímulos luminosos das cores primárias.



Figura 8 - Cores secundárias [9].

2.5 FONTE DE LUZ

Todo corpo capaz de emitir luz é dito uma fonte de luz. Os raios solares, por exemplo, transportam energia radiante que ao ser absorvida por um corpo, transforma-se em energia

térmica, provocando o seu aquecimento. De acordo com a origem da energia emitida pelas fontes luminosas, podemos classificá-las como fontes primárias (corpos luminosos) e fontes secundárias (corpos iluminados).

Fontes primárias emitem luz própria, isto é, a energia emitida é proveniente de outra modalidade de energia que é transformada em energia radiante luminosa. O vaga-lume é um exemplo. As fontes primárias admitem ainda uma subdivisão: fontes incandescentes e fontes luminescentes [11].

As fontes incandescentes são aquelas que emitem luz em decorrência da sua elevação da temperatura (em geral, acima de 500 °C). A emissão da luz corresponde à transformação de energia térmica em energia radiante luminosa. Exemplos: o sol, cuja temperatura em sua superfície é da ordem de 6000 °C; a lâmpada de incandescência, cujo filamento atinge uma temperatura superior a 2000 °C [11].

As fontes luminescentes emitem luz, embora tenham temperaturas relativamente baixas. As fontes luminescentes podem ser de dois tipos: fluorescentes ou fosforescentes. Exemplos: as lâmpadas fluorescentes e substâncias fosforescentes, em geral.

As fontes secundárias (corpos iluminados) são aquelas que não possuem luz própria. Tais fontes só se tornam visíveis quando recebem luz de fontes primárias. São exemplos de fontes secundárias: a lua, nossas roupas, as paredes de uma sala etc.

2.5.1 Meios de Propagação da Luz

Diferentes meios materiais como a água, o ar e o vidro comportam-se de maneiras diferentes ao serem atravessados pela luz. De acordo com a forma de propagação da luz no meio, eles podem ser classificados em: transparentes, translúcidos ou opacos [10].

Um meio óptico é transparente quando permite a propagação regular da luz em distâncias relativamente grandes, possibilitando uma visão nítida dos objetos, com riqueza de detalhes. Podemos ver, por exemplo, através da vitrina de uma loja ou através de um aquário porque esses meios são transparentes [16].

Meio translúcido é aquele que permite a propagação regular da luz em distâncias relativamente grandes, possibilitando uma visão nítida dos objetos, mas somente uma idéia de seus contornos. São corpos que deixam passar parte da luz, refletindo a outra parte. Como exemplo temos o vidro fosco, o papel de seda, um nevoeiro etc. Outro bom exemplo é a milenar arte chinesa das sombras. O ator põe-se à frente de luz e gesticula, apropriadamente, imitando figuras de animais. O teatro de sombras, ainda mais evoluído, contava com um operador que manjava silhuetas recortadas com aplicações de papel pintado, a fim de produzir efeitos coloridos na tela de papel [16].

O meio opaco não permite a propagação da luz, como exemplo, tem-se a madeira, o concreto, as chapas metálicas espessas etc. Um meio pode, em condições diversas, apresentar-se ora transparente, ora translúcido, ora opaco. Uma camada de água é transparente em pequenas profundidades, mas em grandes o mesmo não acontece. Assim, ao cair um objeto na parte rasa de uma piscina pode-se perceber sua forma e cor através da água, já se este mesmo objeto cair na parte mais funda não tem-se a nitidez e, portanto, o objeto não será visto [16].

2.6 TEMPERATURA DA COR

Todos os objetos emitem e absorvem continuamente energia. A temperatura de cor está relacionada à qualidade da energia irradiante e a propriedade da sua fonte geradora. Vamos supor que um pedaço de ferro esta recebendo uma grande quantidade de calor (energia), ele irá mudar de cor de acordo com a quantidade de energia que ele receber, primeiramente ele ficará avermelhado quando atingir a temperatura de 2000 °K (*Kelvin*). As cores do objeto irão mudar conforme a energia que receber. Isto acontece porque os elétrons do ferro ficam “agitados” com o calor e liberam energia luminosa. Na Figura 9 está sendo representada a curva espectral de um corpo negro em várias temperaturas, medida em *Kelvin* [11].

O filamento de tungstênio de uma lâmpada incandescente opera entre 2850 e 3100 K, resultando em uma luz amarelada. Entre 5000 e 7000 K, a luz emitida pelos corpos negros é representada de forma relativamente horizontal no espectro visível, produzindo um branco neutro. Nas altas temperaturas, acima de 9000 K, os comprimentos de onda curtos predominam, produzindo uma luz mais azul [11].

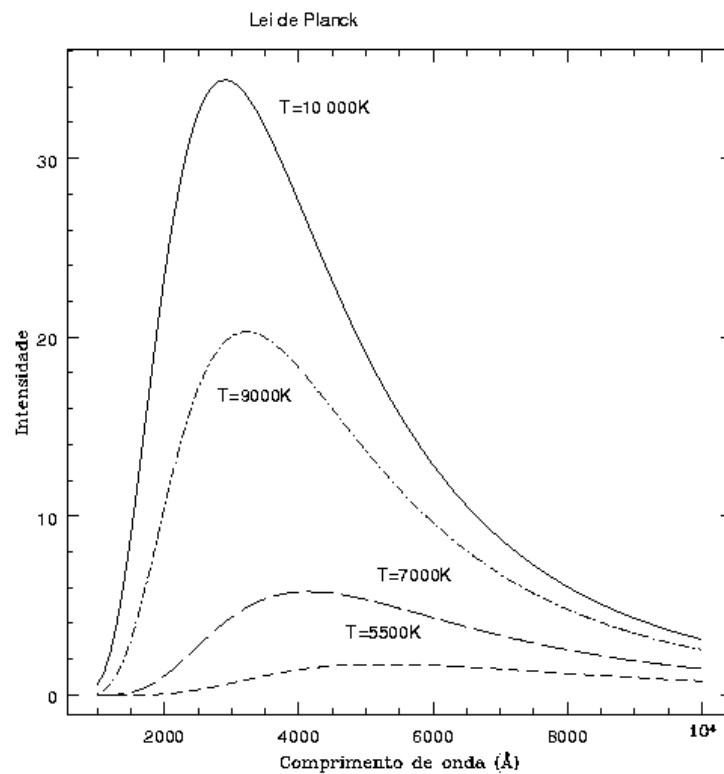


Figura 9 – Variação de Temperatura de cor de um corpo negro [12].

2.7 PADRÃO DE ILUMINANTES

A CIE (*Comission Internationale de l'Eclairage*, ou *International Commission on Illumination*, ou ainda Comissão Internacional de Iluminação) foi fundada em 1913 por um grupo internacional de pesquisadores autônomos com o objetivo de promover um fórum para a troca de idéias e informações e para padronizarem todos os termos relativos à iluminação. Como parte da sua missão, a CIE tem um comitê técnico para estudar o sistema visual e as cores, resultando numa diretriz para a colorimetria, desde a primeira padronização em Cambridge em 1931, na Inglaterra. Os elementos-chave do modelo CIE são as definições dos iluminantes padrões e as especificações para o observador padrão [17].

Os Iluminantes Padrões são fontes de luz com curvas espectrais determinadas. O Iluminante D é o mais utilizado no gerenciamento de cores, sendo o D50 correspondente à temperatura de cor de 5000 K e o D65 a 6500 K [17].

A Figura 10 representa um experimento onde o observador observa uma amostra de cor por um ângulo de visão definido e com uma separação no meio do furo, sendo uma metade iluminada por uma fonte de luz de cor conhecida e a outra pela adição sobreposta das cores primárias aditivas, o objetivo é igualar as cores das duas partes da imagem.

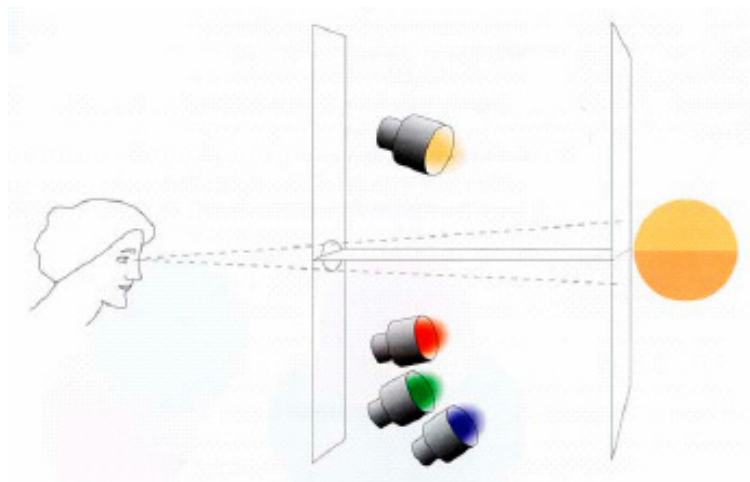


Figura 10 - Experimentação do tri-estímulo.

2.8 ESPAÇO DE COR

Espaço de cor ou *gamut* é uma representação geométrica, tri-dimensional, onde as cores podem ser visualizadas utilizando determinado modelo de cor. Conforme a Figura 11, cada dispositivo gera as cores dentro do seu próprio espaço de cor. Portanto alguns dispositivos conseguem representar mais cores do que outros [11].

O RGB é um modelo de mistura, ou método de descrição de cores, usado em monitores coloridos e outros meios luminosos, que se valem da superposição de cores. Consiste na reprodução de cor, utilizando as três cores-luz primárias (vermelha, verde e azul), em porcentagens variadas [11].

A mistura aditiva se dá quando se obtêm uma cor proveniente da soma das luzes coloridas emitidas por duas ou mais fontes. Esse é o processo usado nos monitores de CRT (tubo de raios catódicos) quando reproduzem uma imagem, a partir das três cores primárias.

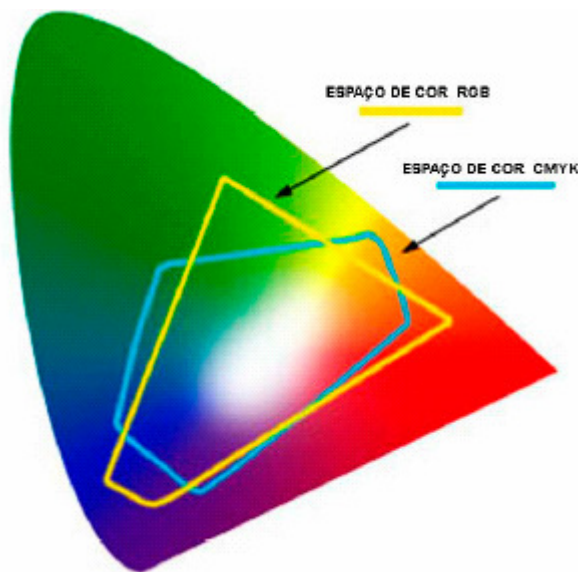


Figura 11 - Representação de Espaço de Cor [18].

Na mistura subtrativa, um objeto iluminado por uma fonte de luz branca absorve parte desta luz refletindo a parte restante. Este é o chamado sistema subtrativo, que baseia-se na mistura das cores-pigmento (amarelo, ciano e magenta) e é comum em equipamentos de impressão. A mistura destas cores-pigmento resulta no preto, já que as cores se anulam uma a uma, até que não reste cor ativa [11]. O preto, na verdade é a ausência de cor, visto na Figura 7.

O modelo de cores subtrativo é a base do processo de impressão em quatro cores. Neste processo de impressão, todas as cores são reproduzidas usando-se quatro chapas de impressão diferentes: C(*cyan* - ciano), M(magenta), Y(*yellow* - amarelo) e K(preto). O preto é sempre acrescentado à mistura devido à impureza dos pigmentos, e por fatores econômicos.

2.8.1 Brilho Tonalidade e Saturação

A quantidade de luz é chamada de brilho, este pode ser detectado por variações em sua intensidade. A tonalidade é a cor propriamente dita, seria o próprio nome da cor, ou seja, vermelho, verde, azul e etc. A saturação corresponde ao grau de intensidade ou croma, e relaciona-se com a pureza ou a opacidade da cor.

2.8.2 Modelos de cores

Modelos de cores são utilizados para classificar e qualificar as cores de acordo com a tonalidade, saturação e luminosidade ou brilho. Os modelos de cores RGB e CMYK são essenciais à computação gráfica e à impressão, porém cada dispositivo gera a sua cor conforme as suas características físicas e químicas. Na necessidade de criar modelos de cores com espaço de cor independente do dispositivo, o comitê da CIE criou o modelo de cores: HSB – (*hue, saturation and brightness* ou matiz, saturação e brilho) e o HLS (*hue, lightness and saturation* ou tonalidade, luminosidade e saturação). Sendo suas funções definir as cores nos programas gráficos de computadores de forma que combine com a percepção das cores pelo sistema visual humano e utiliza três eixos similares para definirem a cor [17], conforme a Figura 12.

O HSB baseia-se na percepção humana das cores e não nos valores do espaço de cor dependente do dispositivo. O olho humano vê cores como componentes de matiz, saturação e brilho. A matiz baseia-se no comprimento de onda de luz refletida de um objeto, ou transmitida por ele. A saturação, também chamada de *croma*, é a quantidade de cinza em uma cor. Quanto mais alta a saturação, mais baixo é o conteúdo e mais intensa é a cor. O brilho é uma medida de intensidade de luz em uma cor [19].

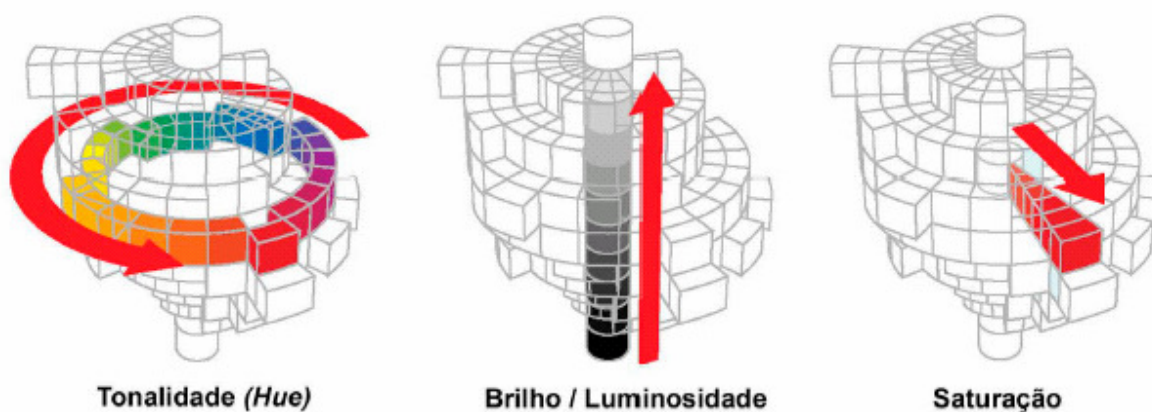


Figura 12 - Tonalidade, Brilho/Luminosidade e Saturação [17].

2.8.3 Modelo XYZ

O sistema XYZ de cores primárias da CIE (Comissão Internacional de Iluminação) descreve as cores através de 3 cores primárias virtuais X, Y e Z. Esse sistema foi criado devido à inexistência de um conjunto finito de cores primárias que produza todas as cores visíveis possíveis. Nesse sistema, as cores C_i podem ser expressas pela seguinte equação:

(1)

$$C_i = x.X + y.Y + z.Z$$

em que X, Y e Z especificam as quantidades das primárias padrões necessárias para descrever uma cor espectral. A normalização dessa quantidade em relação à luminância ($X + Y + Z$) possibilita a caracterização de qualquer cor. As cores desse sistema podem ser expressas como combinações das quantidades normalizadas abaixo:

(2)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

com $x + y + z = 1$. Assim, qualquer cor pode ser definida apenas pelas quantidades de x e y que, por dependerem apenas do matiz e da saturação, são chamadas de coordenadas de cromaticidade. A descrição completa de uma cor é dada pelas coordenadas de cromaticidade e pelo valor de um dos 3 estímulos originais, normalmente do Y, que contém a informação de luminância. Essa descrição possibilita a obtenção das quantidades de X e Z com as equações abaixo:

(3)

$$X = \frac{x}{y}Y \quad Z = \frac{z}{y}Y$$

onde $z = 1 - x - y$.

O sistema XYZ é formado por cores imaginárias que são definidas matematicamente. Nesse sistema, as combinações de valores negativos e outros problemas relacionados à seleção de um conjunto de primárias reais são eliminados. As coordenadas de cromaticidade x e y permitem representar todas as cores num gráfico bidimensional. O traçado dos valores normalizados de x e y para as cores no espectro visível resulta na curva ilustrada na Figura 13 [2].

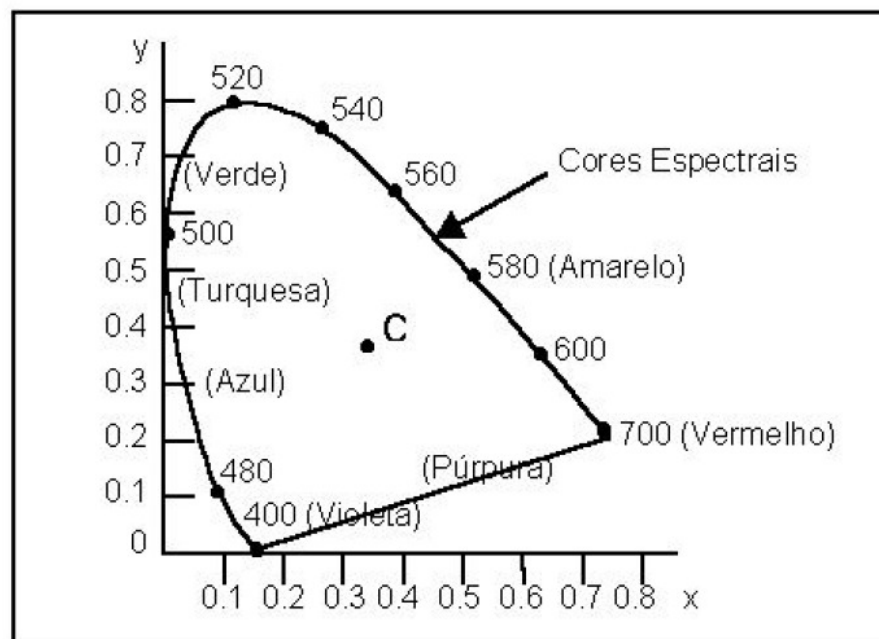


Figura 13– Diagrama de cromaticidade CIE [2].

Os pontos que representam as cores puras no espectro eletromagnético são rotulados de acordo com os seus comprimentos de onda e estão localizados ao longo da curva que vai da extremidade correspondente à cor vermelha até a extremidade correspondente à cor violeta. A linha reta que une os pontos espectrais vermelho e violeta é chamada linha púrpura, e não faz parte do espectro. Os pontos internos correspondem a todas as combinações possíveis de cores visíveis, e o ponto C corresponde à posição da luz branca [2].

Devido à normalização, o diagrama de cromaticidade não representa os valores de luminância. Por isso, as cores com luminâncias diferentes e cromaticidades iguais são mapeadas no mesmo ponto. Através desse diagrama, é possível determinar e comparar os espaços de cores dos diferentes conjuntos de primárias, identificar as cores

complementares (duas cores que, somadas, produzem a cor branca), determinar o comprimento de onda dominante e a saturação de uma cor.

Os espaços de cor são representados no diagrama, ilustrado na Figura 14a, através de linhas retas ou de polígonos. Todas as cores ao longo da linha que une os pontos C_1 e C_2 na Figura 14(a) podem ser obtidas através da mistura de quantidades apropriadas das cores correspondentes a esses pontos. A escala de cores para três pontos (por exemplo, C_3 , C_4 e C_5 na Figura 14(a)) é representada por um triângulo cujos vértices são definidos pelas cores correspondentes às três posições e inclui cores contidas no interior e nas margens desse triângulo.

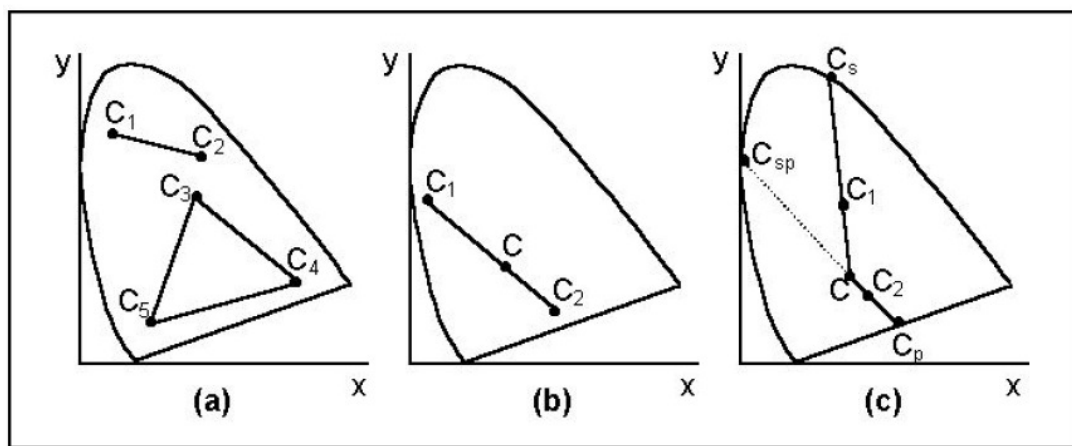


Figura 14 - Representação de escala de cor no diagrama de cromaticidade do CIE [20].

Observando o diagrama é possível perceber que nenhum conjunto formado por três primárias pode gerar todas as cores, pois nenhum triângulo contido no diagrama abrange todas as cores possíveis. As cores complementares são identificadas por dois pontos localizados em lados opostos do ponto C e conectados por uma linha reta. Por exemplo, misturando quantidades apropriadas de duas cores C_1 e C_2 (Figura 13(b)), obtém-se a luz branca [2].

A determinação do comprimento de onda dominante de uma cor pode ser feita interpretando-se a escala de cores entre duas primárias. O comprimento de onda dominante da cor C_1 , representada na Figura 14(c), é determinado traçando-se uma linha reta que parte do ponto C passando pelo ponto C_1 e intersectando a curva espectral no ponto C_s . A

cor C1, corresponde então, à combinação da luz branca com a cor espectral Cs, pois Cs é o comprimento de onda dominante de C1. O comprimento de onda dominante das cores que estão entre o ponto C e a linha púrpura é determinado de outra forma. Traça-se uma linha a partir do ponto C (Figura 14(c)) passando pelo ponto C2 e intersectando a linha púrpura no ponto Cp. Como esse ponto não pertence ao espectro visível, o ponto C2 é referenciado como sendo uma cor não espectral e o seu comprimento de onda dominante é obtido através do prolongamento da reta até que ela intercepte a curva espectral, no ponto Csp. As cores não espectrais estão entre púrpura e magenta, e são geradas através da subtração do comprimento de onda dominante (como, por exemplo, o Csp) da luz branca [2].

A pureza de uma cor (por exemplo, de C1 na Figura 14(c)) é determinada através da distância relativa do ponto C1, que corresponde à linha reta que vai do ponto C até o ponto Cs. Pode-se calcular a pureza do ponto C1 através da relação $dc1/dcs$, onde $dc1$ representa a distância entre C e C1 e dcs representa a distância entre C e Cs. A cor C1 é cerca de 33% pura porque está situada a aproximadamente um terço da distância total entre C e Cs [2].

2.8.4 Modelo CIELab

O modelo de cor CIELAB permite a especificação de percepções de cores em termos de um espaço tridimensional. A componente axial L é conhecida como luminosidade e se estende de 0 (preto) a 100 (branco). As outras duas coordenadas a^* que se estende de -100 (azul) ao 100 (amarelo) e b^* de -100 (verde) a 100 (vermelho), conforme a Figura 15. O espaço de cores CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) proporciona uma representação tridimensional para a percepção do estímulo de cores. Conforme aumenta a distância entre os dois pontos no espaço é razoável assumir que a diferença de cor percebida entre os estímulos representa aumentos correspondentes [17]. Uma medida da diferença na cor entre dois estímulos é, portanto, proporcional à distância Euclidiana entre os dois pontos no espaço tridimensional [20].

O modelo CIELab é mais percebido mais linearmente que outros espaços de cores, onde perceptualmente linear significa que a troca da mesma quantia em um valor de cor pode produzir sobre a mesma importância visual. Ele é também um espaço de cor absoluto. Isto é, define exatamente as cores, ao contrário, por exemplo, do RGB ou do CMYK que dependem do recebimento de luz ou tinta, respectivamente.

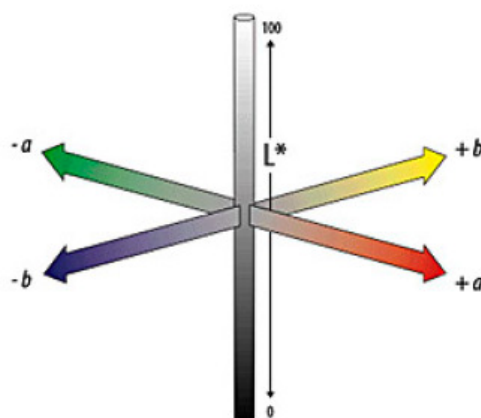


Figura 15 – Modelo de cor CIELAB [19].

2.9 METAMERISMO

O metamerismo é o fenômeno que ocorre quando duas distintas amostras de cores produzem uma mesma sensação de cor, isto é, amostras de cores com espectro de cor diferentes aparentam o mesmo espectro de cor. Este fenômeno pode ocorrer quando os distintos objeto são dependentes da luz que ilumina ambas amostras, como por exemplo, na Figura 16, as cores das amostras sob a fonte 1 são correspondentes e sob a fonte 2 as mesmas amostras não corresponderam [17].

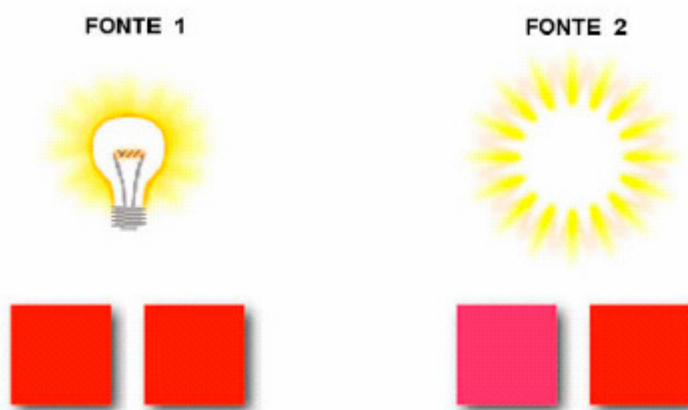


Figura 16 - Efeito do metamerismo nas amostras de acordo com a fonte de luz. [17].

Este fenômeno também pode ocorrer quando duas diferentes amostras de cores são capturadas por um dispositivo que possui um espaço de cor menor do que o da origem. Portanto para este dispositivo as duas cores possuem o mesmo espectro de cor.

2.10 CORREÇÃO GAMA

A Correção gama é um processo no qual a intensidade do valor de cada cor que é ajustado de tal forma que a curva obtida compense irregularidades do monitor ou da impressora, esta correção poder ser é definida, nos casos mais simples, pela lei de potência dada pela seguinte expressão:

(4)

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma}$$

Onde V_{out} é a voltagem de saída, que esta associada a luz de saída, V_{in} é a voltagem de entrada e o γ é o fator gama do CRT. Os valores de entrada e saída são valores reais não negativos, tipicamente em uma escala pré-determinada tal como 0 e 1. O caso $\gamma < 1$ é freqüentemente chamado de compressão gama e $\gamma > 1$ é chamado de expansão gama [4], ilustrado na Figura 17.

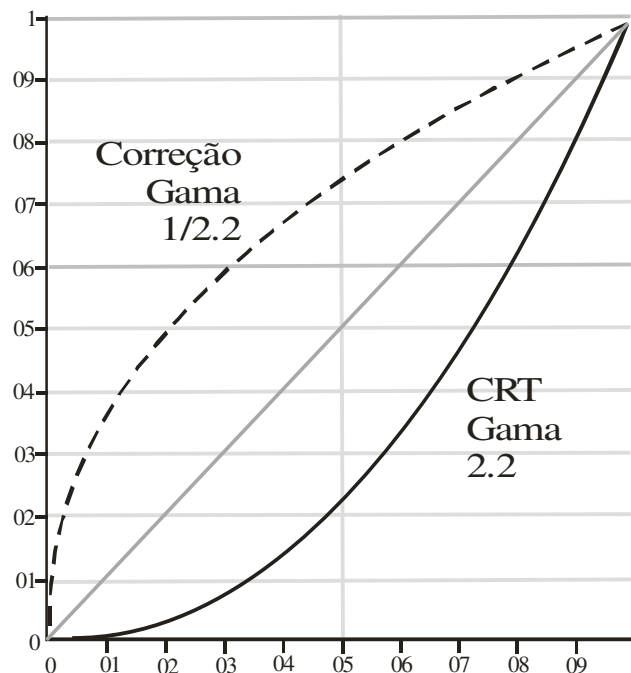


Figura 17 – Exemplo da correção gama de um CRT.

2.11 FORMAS DE MEDIR CORES

O estímulo de uma cor só pode ser medido por instrumentos especializados. Estes instrumentos possuem sensores responsáveis por medir a luz refletida ou a transmitida pelos dispositivos. Dentre alguns instrumentos especializados temos o colorímetro e o espectrofotômetro.

A colorimetria é a ciência do estudo da cor de acordo com a percepção humana padrão. O objetivo é construir um modelo numérico com capacidade de detectar a ocorrência do metamerismo [21]. Um modelo colorimétrico deve garantir que duas amostras de cores iguais sejam representadas numericamente com o mesmo valor e as cores distintas devem, obviamente, apresentar diferentes valores numéricos.

O princípio de ação do colorímetro é separar as componentes RGB da luz. Este equipamento utiliza filtros: vermelho, verde e azul para medir a cor e produz um resultado numérico em um espaço de cor independente. Um exemplo de colorímetro é mostrado na Figura 18.



Figura 18 – Colorímetro Eye One Display by Gretag Macbeth.

A espectrofotometria é a designação para toda técnica de levantamento de dados físico-químicos através da transmissão, absorção ou reflexão da energia radiante incidente em um objeto [4].

O espectrofotômetro é um instrumento capaz de obter informações mais completa das cores ao colorímetro, ou seja, valores da reflectância dentro de determinada faixa do espectro, conforme Figura 19 [17].

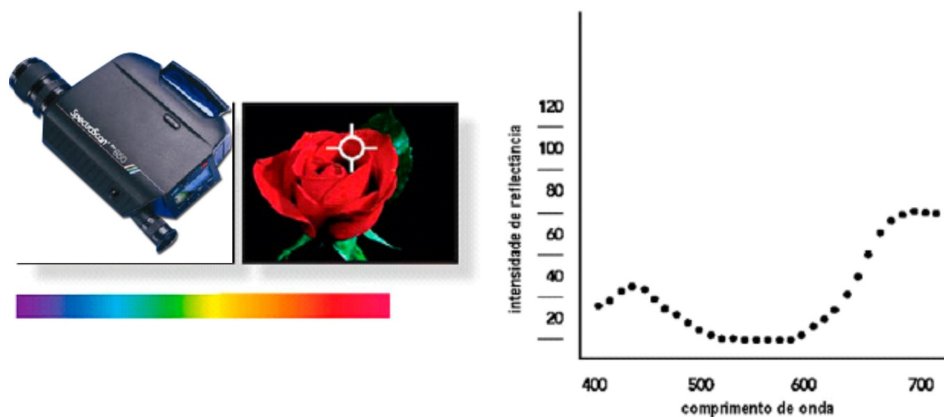


Figura 19 - Ilustração de um espectrofotômetro e o resultado espectral da amostra de cor localizada na região alvo. [22].

CAPÍTULO 3 GERENCIAMENTO TRADICIONAL DE CORES

Neste capítulo aborda-se a reprodução de cores de forma dependente e independente do dispositivo, a composição básica do gerenciamento de cores, a distinção entre calibração e caracterização e a criação de perfis para diversos dispositivos. Tais assuntos são explorados no intuito de se entender como é realizada a calibração de dispositivos utilizando equipamentos específicos como um colorímetro ou um espectrofotômetro.

3.1 REPRODUÇÃO DE CORES NO ESPAÇO DE COR DEPENDENTE DO DISPOSITIVO

A impressora, monitor, câmera digital entre outros dispositivos, produzem ou capturam imagens de forma proprietária. Os valores numéricos de RGB ou CMYK são específicos para produzirem cores em um único dispositivo, já que todos eles possuem o seu próprio espaço de cor. Desta forma, podemos dizer que os valores numéricos RGB e CMYK são dependentes do dispositivo.



Figura 20 - Cores de Entrada são transformadas para um dispositivo de Saída.

São ilustradas na Figura 20, amostras de cores, denominadas como “Entradas”. Estas são transformadas para um conjunto modificado de valores apropriados para um diferente dispositivo de “Saída”.

Amostras de cores criadas em n dispositivos de “Entrada” são representadas por m dispositivos de “Saída”. Cada dispositivo “Fonte” produz uma determinada cor, estas cores serão representadas por m dispositivos de “Destino” de forma divergentes, conforme Figura 21.

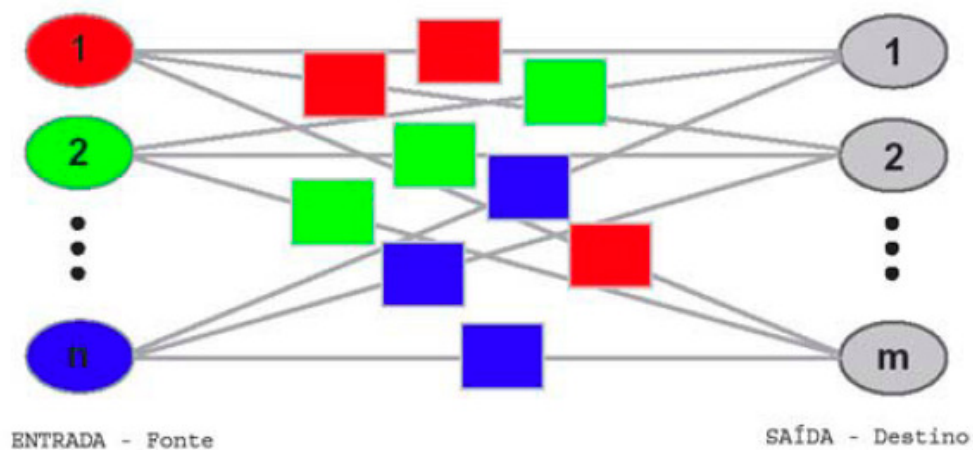


Figura 21 - Representação das cores dependentes do dispositivo [14].

3.2 REPRODUÇÃO DE CORES NO ESPAÇO DE COR INDEPENDENTE DO DISPOSITIVO.

Devido a necessidade de obter cores independentes do dispositivo, foram criados vários modelos numéricos de cores que são independentes dos dispositivos [17]. Os técnicos e cientistas da CIE desenvolveram os dois modelos mais adotados: CIEXYZ e o CIELAB.

No modelo de cor independente, os valores CIEXYZ ou CIELAB são os mesmos tanto no dispositivo de “Entrada” quanto no dispositivo de “Saída”, conforme Figura 22.

Os modelos CIE produzem a mesma cor em diferentes dispositivos, mas nem sempre esses dispositivos conseguem reproduzir essa cor, devido a limitações individuais de cada *gamut*.

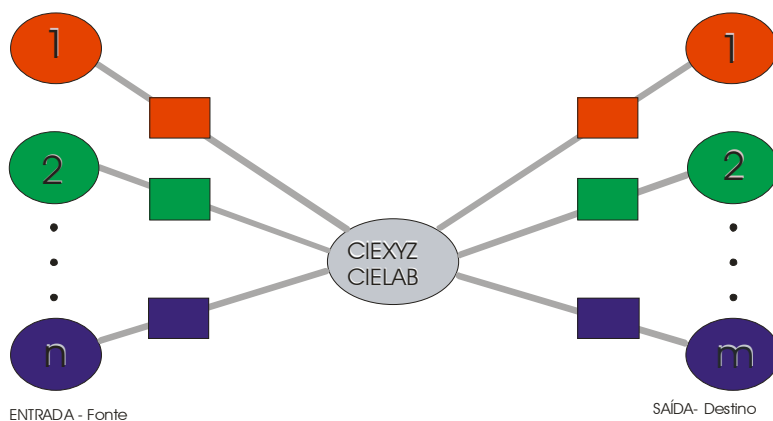


Figura 22 - Representação das cores independentes do dispositivo.

3.3 COMPOSIÇÃO BÁSICA DO GERENCIAMENTO DE CORES

As principais componentes do gerenciamento de cores são o espaço de conexão de perfis, os perfis, o módulo de gerenciamento de cores e os objetivos de acabamento.

A conexão de perfis (PCS – *Profile Connection Space*) é o padrão utilizado para medir e definir a cor nos dois modelos de cores, o CIEXYZ e o CIELAB. O perfil descreve a relação entre os valores numéricos do sinal de RGB ou CMYK e os valores correspondentes para o espaço de cor, ou seja, ele define os valores em CIEXYZ ou CIELAB correspondentes aos valores de RGB ou CMYK [17], como pode ser visto na Figura 23.

No processo de conversão de cores, o uso de perfis de ENTRADA-Fonte e de SAÍDA-Destino é indispensável. O perfil do dispositivo destino descreve as características de seu espaço de cor. Estes perfis possuem classes diferentes dependendo das características de cada dispositivo. Para dispositivos como uma câmera digital, usam-se os perfis de entrada. Para dispositivos como os monitores CRT ou LCD usam-se perfis de exibição e para dispositivos como uma impressora usa-se perfis de saída [17].

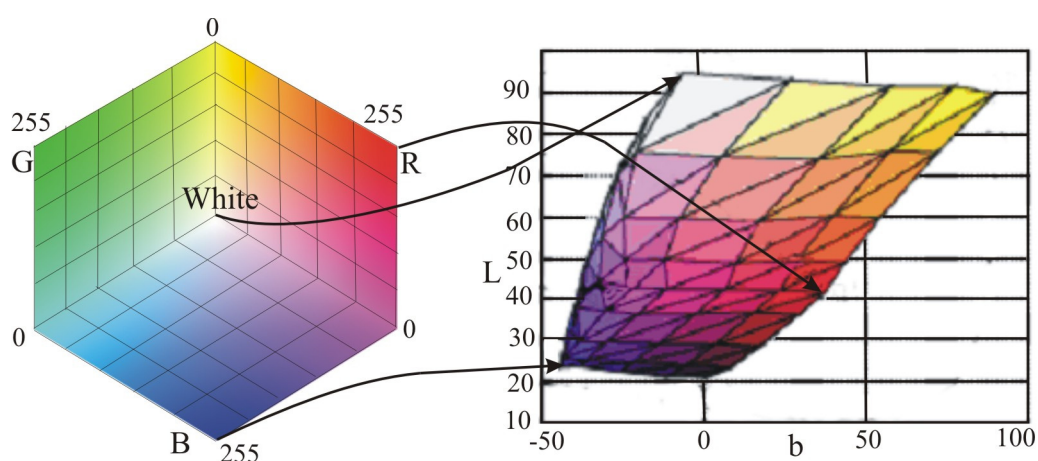


Figura 23 - Triangulação do espaço dependente CMYK para o espaço independente CIELAB [21] pág.70.

O Módulo de Gerenciamento da Cor (CMM - *Color Management Module*) é à parte do Sistema de gerenciamento de cores (CMS - *Color Management System*) que realiza a conversão dos valores de RGB ou CMYK usando os dados contidos nos perfis [17].

O CMM provê o método que realiza as conversões de valores no CMS do espaço de cor da imagem de origem para o PCS e deste para qualquer outro espaço de cor do dispositivo de saída. Ele utiliza o perfil para definir as cores que precisam ser combinadas no dispositivo de entrada, e os valores em RGB ou CMYK que precisariam ser combinados no dispositivo de saída [17].

O papel do CMM é utilizar a informação sobre os dispositivos de origem e de saída e converter as cores entre eles. Algumas vezes isto envolve uma conversão intermediária para o espaço de cor padrão do CMM, mas outras vezes o CMM pode encurtar o caminho pré-computando um "link" de dispositivos para converter cores diretamente do espaço de cor de origem para o espaço de cor final. Os detalhes são puramente definidos pelo fornecedor de seu CMM [23].

O conjunto de cores que um dispositivo consegue reproduzir é chamado de gama de cores ou *gamut*. O *gamut* dos dispositivos de saída está associado diretamente a características físicas, e químicas de cada dispositivo. A impressora, por exemplo, não consegue reproduzir uma cor ciano mais saturada do que a tinta ciano, nem o monitor consegue reproduzir um vermelho mais saturado que o fósforo vermelho. Quando uma cor não pode ser reproduzida no espaço de cor do dispositivo, dizemos que esta cor está fora do gama ou do *gamut* [17].

No processo de realocação das cores que estão fora do *gamut*, os perfis ICC sugerem quatro métodos diferentes de solução para este problema, sendo eles; perceptivo, por saturação, colorimétrico relativo e colorimétrico absoluto.

No processo perceptivo, o perfil da imagem de origem é ajustado de acordo com as limitações do dispositivo de saída. É certo que as cores de entrada são modificadas, porém é mantida a relação entre os valores absolutos, conforme ilustrado na Figura 24 [17].

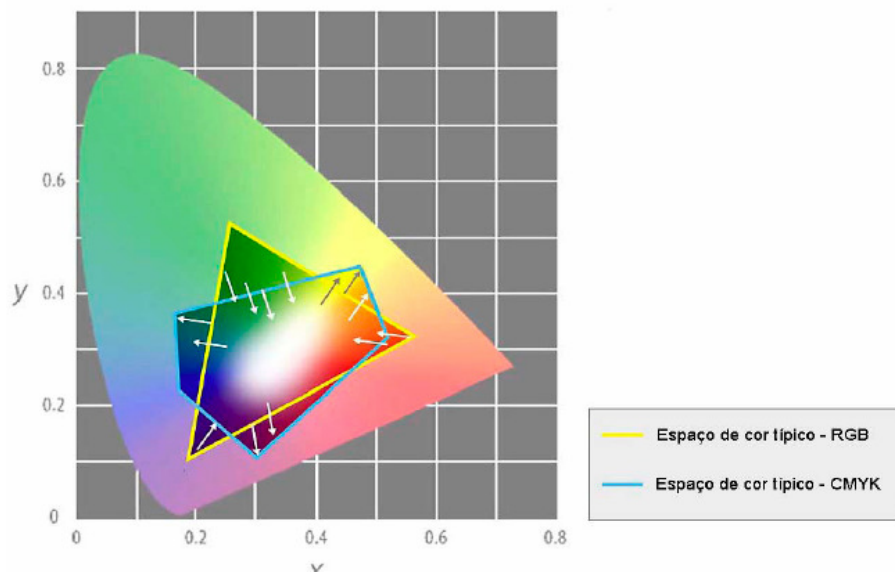


Figura 24 - Objeto de acabamento perceptível. A imagem é ajustada de acordo com os limites do dispositivo de destino [14].

Quando por saturação, serão preservadas as cores saturadas no perfil da imagem de origem e muda a tonalidade e brilho em alguns casos. Este método produz cores vivas sem se preocupar com a precisão das cores, conforme ilustrado na Figura 25. É bastante útil para peças gráficas, como mapas, gráficos e outros [17].

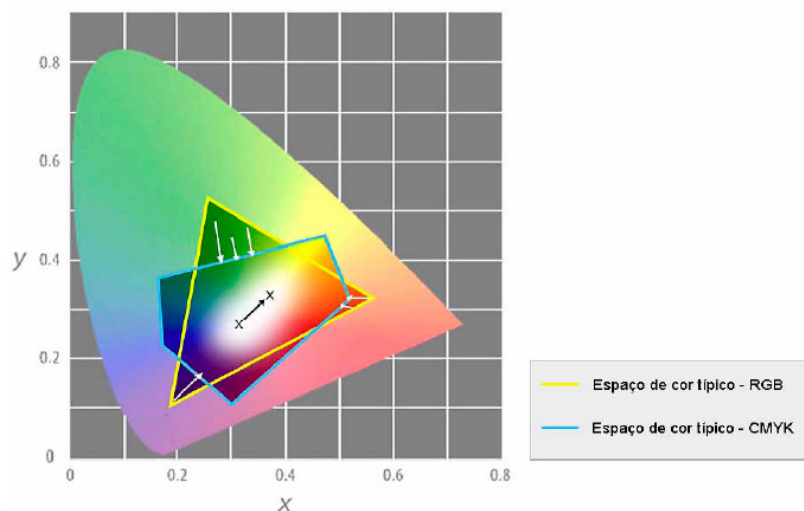


Figura 25 – Objeto de acabamento por saturação. Preserva-se as cores saturadas no perfil da imagem de origem e muda-se a tonalidade e brilho [14].

O método usando a colorimetria relativa preserva as cores que estão dentro de ambas as gamas de cores e remapeia o ponto branco e o ponto preto para o novo espaço de cor, resultando em que a escala de cinza seja mantida. É preservada a luminosidade e a

tonalidade das cores, mas não a saturação. As cores fora da gama são mapeadas para o ponto mais próximo da gama de saída, conforme Figura 26. Esta é uma opção muito utilizada, pois preserva grande parte das cores da imagem original [17].

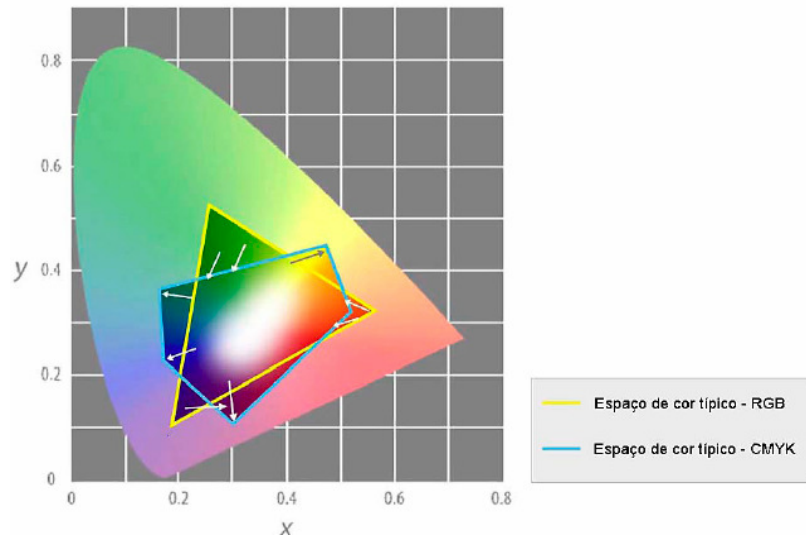


Figura 26 - Objetivo de acabamento colorimetria relativa. É preservada a cor que está dentro de ambas as gamas de cores, porém, se remapeia o ponto branco e o ponto preto para o novo espaço de cor, resultando em que a escala de cinza seja mantida [14].

O método usando a colorimetria absoluta é parecido com o da colorimetria relativa, mas este não ajusta o ponto branco nem o ponto preto, o que significa que todas as cores da gama de entrada serão mapeadas exatamente dentro da gama de cores de saída. As cores fora da gama serão mapeadas para o ponto mais próximo da gama de saída, conforme ilustrado na Figura 27. Este método é muito útil para as “cores assinadas”, ou seja, as cores que possuem alta capacidade de identidade nos produtos comerciais [17].

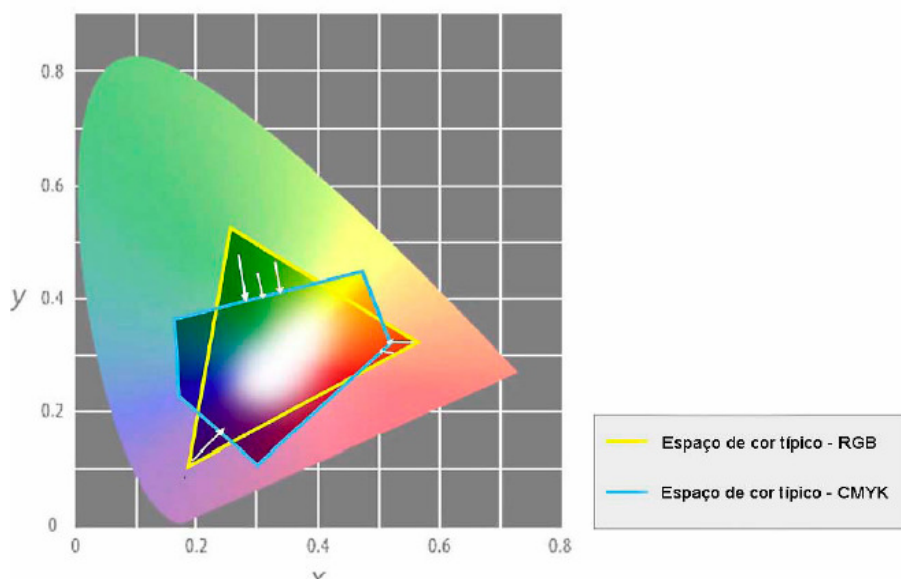


Figura 27 - Objetivo de acabamento colorimetria absoluta. Semelhante à colorimetria relativa, porém, nem o ponto branco e nem o ponto preto são ajustados [14].

3.4 DIFERENÇA ENTRE CALIBRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

Quando há a necessidade de alterar o comportamento de um dispositivo para obtermos uma condição estável e conhecida, este é chamado de calibração. Já a caracterização é o processo pelo qual se gravam as características do dispositivo dentro de um perfil, sendo também chamada de geração de perfil para o dispositivo. A caracterização não muda o comportamento do dispositivo, ela somente define como o dispositivo representa as cores e quais ele poderá ou não reproduzir. Em geral é necessário caracterizá-lo antes de realizar o processo de calibração. Nesta dissertação aborda-se uma metodologia na qual a caracterização não é necessária.

3.5 PERFIS PARA MONITORES

O processo de geração de perfil do monitor é feito pela comparação de valores conhecidos com os valores medidos. As cores são enviadas para o monitor pelo programa de geração de perfil com valores RGB conhecidos e compara-se com os valores obtidos pelos dispositivos de medição, como o colorímetro ou espectrofotômetro. O dispositivo colorimétrico faz a medição destas cores em um espaço de cor absoluto, como o CIELab e

ou CIEXYZ. A calibração e caracterização atingem todo o sistema de visualização, tanto o próprio monitor, como também a placa de vídeo [17], como pode ser visto na Figura 28 .

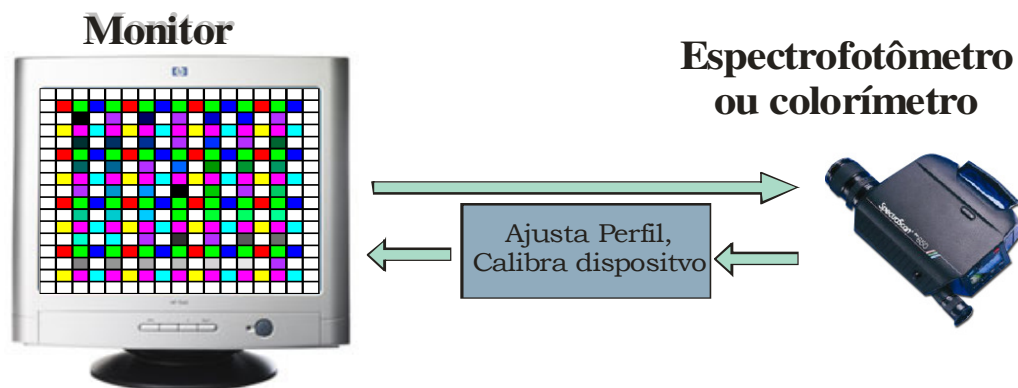


Figura 28 - Calibrando o monitor utilizando um colorímetro.

Antes de calibrar o monitor é necessário seguir alguns procedimentos para garantir a eficácia da calibração, entre estas podemos citar:

- A limpeza do monitor é muito importante. Deve-se utilizar produtos não abrasivos e soluções apropriadas.
- O tempo de aquecimento do monitor também deve ser levado em conta. Para os monitores CRT (tubo de raios catódicos) é importante que eles estejam ligados constantemente por, pelo menos, 30 minutos antes da calibração. Para os LCD (monitor de cristal líquido) este tempo deve ser de 30 a 90 minutos [21].
- A resolução do monitor, mais adequada para a calibração e a geração de perfil é aquela na qual o usuário da máquina trabalha, pois se a mesma for alterada após o processo de calibração, a intensidade do brilho pode sofrer alterações, comprometendo o processo [17].
- A temperatura recomendada para o monitor é de 6500 K (*Kelvin*), porém alguns profissionais adotam a temperatura de 5000 K, pois esta é a mesma temperatura de cor utilizada nas mesas de luz para visualização de materiais impressos [17].
- O valor recomendado de correção *gamma* é de 2.2.

O processo de calibração de monitores utilizando um colorímetro, conforme Figura 29, é feito da seguinte maneira:



Figura 29 - Calibrando o monitor utilizando um colorímetro [18].

- Ajusta-se o dispositivo na frente do monitor.
- Aciona-se o software de calibragem.
- Seleciona-se o tipo de monitor que será calibrado CTR ou LCD.
- Seleciona-se o ponto branco, *gamma* e a luminância desejada para calibrar o monitor.
- Após este processo, centenas de cores são mostradas no monitor e capturadas pelo colorímetro e posteriormente é criado o perfil do monitor.
- O software compara o perfil do monitor com o perfil que ele julga ser correto e faz os ajustes necessários para que o monitor produza as cores que julga corretas.

3.6 CRIANDO PERFIS PARA IMPRESSÃO

Os perfis de impressão ajudam o CMS (Sistema de Gerenciamento de Cores) a produzir números corretos que representam as cores nos dispositivos de saída, como também para visualização em monitores, informando como o dispositivo de saída traduziria a cor antes de imprimi-la. A maioria das imagens digitais contém cores que os dispositivos de impressão não conseguem reproduzir, devido aos espaços de cores serem maiores, tanto pelos de captura como das imagens exibidas diretamente nos monitores [17].

Ao se gerar o perfil da impressora é possível descrever o seu comportamento, portanto com base no perfil, pode-se gerar no monitor uma imagem semelhante a que seria impressa,

levando em consideração que o tipo do papel, as características das tintas, a temperatura do ambiente e a fonte de luz devem ser os mesmos utilizados na criação do perfil.

Para realizar o gerenciamento de cores da impressora é necessário selecionar a tabela de cores, com um programa específico, a imagem é gerada e impressa. É importante configurar o driver da impressora para “nenhum ajuste de cor” e não associar a imagem a um perfil [17].

Os procedimentos para a medição da cartela e a geração do perfil são:

- Após a impressão da cartela de cores, deve-se esperar a tinta secar. No caso de impressoras a laser não é necessário este tempo de espera.
- O software do dispositivo colorimétrico irá medir as cores impressas e gerar um arquivo contendo todas as informações das cores medidas. Este arquivo é então carregado pelo *software* de geração de perfis, para gerar o perfil da impressora é gerado.

A calibração da impressora pode ser feita associando-se o perfil da impressora ao driver de impressão do dispositivo, como observamos na Figura 30.

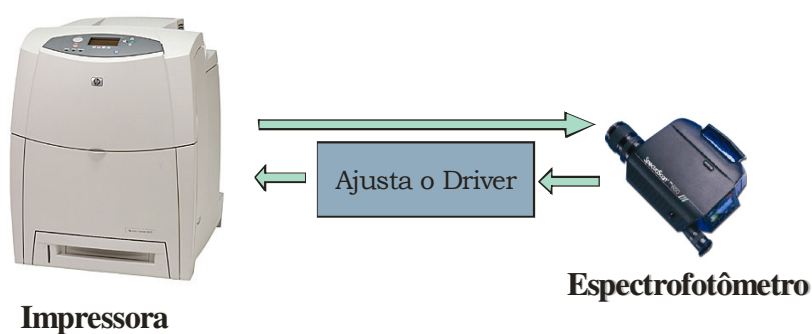


Figura 30 - Calibrando a impressora utilizando um espectrofotômetro.

3.7 MAPEAMENTO DE CORES

Para realizar o gerenciamento de cores é necessário saber como o dispositivo se comporta, isto é, como ele representa as cores de entrada. Um monitor e uma impressora, por

exemplo, possuem *gamuts* diferentes, portanto se for necessário realizar a calibração da impressora, um processo de mapeamento é indispensável. Este processo consiste em identificar as cores fonte de determinadas cores destino e vice-versa.

No processo de mapeamento entre espaços de cores ($f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$), utiliza-se a interpolação tetraedral quando o espaço de cor do dispositivo é irregular. Em geral o Lookup Table LUT dos dispositivos não possui todas as opções de cores possíveis, pois é inviável gerar mais de 16 milhões de cores. Normalmente cria-se um LUT com algumas centenas de cores. Quando é necessário mapear uma cor, não existente no LUT, de um *gamut* para outro, realiza-se uma interpolação tetraedral.

Deseja-se mapear um ponto P estimado, localizado em um espaço de cor tri-dimensional para outro espaço de cor tri-dimensional. Ao redor de P existem diversos vértices. Os vértices mais próximos de P serão utilizados para formar um tetraedro sendo estes, $P_0P_1P_2P_3$. O tetraedro formado pelos vértices é dividido em quatro sub-tetraedros [6], como pode ser visto na Figura 31.

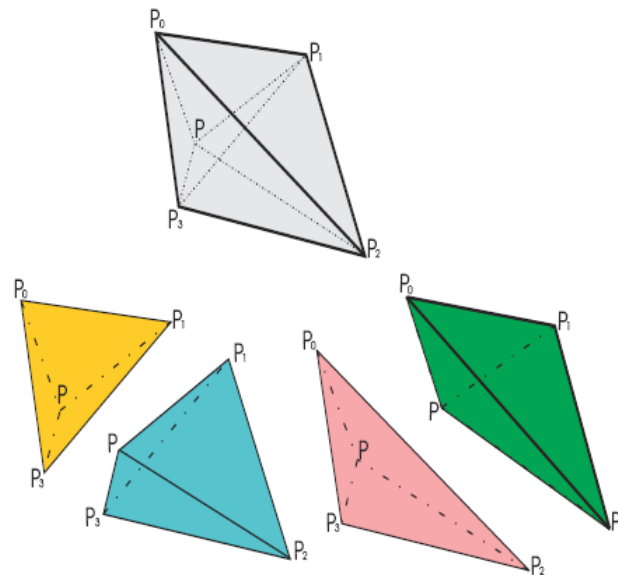


Figura 31 - A divisão de um tetraedro $P_0P_1P_2P_3$ em quatro sub-tetraedros $PP_1P_2P_3$, $P_0PP_2P_3$, $P_0P_1PP_3$ e $P_0P_1P_2P$, definido pela entrada do ponto P , [21] pág. 89.

O valor do ponto arbitrário P é dado por t , que pertence a um tetraedro de vértices P_0 , P_1 , P_2 e P_3 . O valor t pode ser interpolado a partir de uma média ponderada expressa pela equação a seguir:

(5)

$$t = a_0 t_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3,$$

onde, t_0, t_1, t_2 e t_3 são os valores previamente conhecidos dos respectivos vértices P_0, P_1, P_2 e P_3 . As coordenadas baricentricas dos sub-tetraedros formados pelo ponto P são a_0, a_1, a_2 e a_3 , sendo que:

(6)

$$a_0 + a_1 + a_2 + a_3 = 1.$$

Estas coordenadas podem ser calculadas mediante a seguinte equação:

(7)

$$a_0 = D_0 / D, a_1 = D_1 / D, a_2 = D_2 / D, a_3 = D_3 / D.$$

onde D é o volume do tetraedro $P_0P_1P_2P_3$ e D_i é o volume do sub-tetraedro obtido quando o ponto interpolado P_i é substituído pelo vértice P , ou seja,

(8)

$$D = \text{volume} (P_0P_1P_2P_3),$$

$$D_0 = \text{volume} (PP_1P_2P_3),$$

$$D_1 = \text{volume} (P_0PP_2P_3),$$

$$D_2 = \text{volume} (P_0P_1PP_3),$$

$$D_3 = \text{volume} (P_0P_1P_2P).$$

CAPÍTULO 4 CALIBRAÇÃO POR REFERÊNCIA UTILIZANDO CAMERAS DIGITAIS

Propõem-se um método barato para realizar a calibração de cores, utilizando uma simples câmera digital ao invés de um colorímetro ou um espectrofotômetro. Aqui, o passo de caracterização do dispositivo é substituído por uma caracterização via mapeamento de cores [4,26] entre a câmera e o dispositivo, nos dois sentidos, e uma estimativa metamérica [5]. Apresenta-se a técnica geral de aproximação e posteriormente, são discutidos os desafios específicos de utilizar uma câmera digital comum para adquirir informações colorimétricas.

4.1 CALIBRAÇÃO POR REFERÊNCIA

Equipamentos especializados como colorímetros e espectrofotômetro custam caro e requerem compreensivos conhecimentos de colorimetria para se realizar a calibração de dispositivos. Conseqüentemente, a calibração é inadequada para pessoas não especializadas.

O método proposto sugere a aplicação de uma câmera digital ao invés de um colorímetro. Neste sentido, o método evita mapear as cores para um dispositivo de espaço independente. A câmera digital é completamente automatizada, conseqüentemente, mais simples de ser usada, além disso, mais barato que os equipamentos especializados. O método de calibração proposto foi usado para calibrar uma impressora e realizar calibração entre monitores.

Embora as câmeras digitais não tenham sido projetadas para medir cores objetivamente, como um colorímetro, ainda assim, pode-se explorar sua reprodução de cores. No processo proposto de calibração da impressora, é gerado um grupo de amostras de cores em um monitor e capturam-se estas amostras com a câmera digital. Então, imprime-se o mesmo grupo de amostras de cores e capturam-se essas amostras impressas com a mesma câmera, conforme ilustrado na Figura 32. Há, assim, dois espaços de cores de interesse: o espaço de

cor do monitor e o da impressora. O próximo passo é mapear estes espaços de cores de um para o outro, e vice versa.

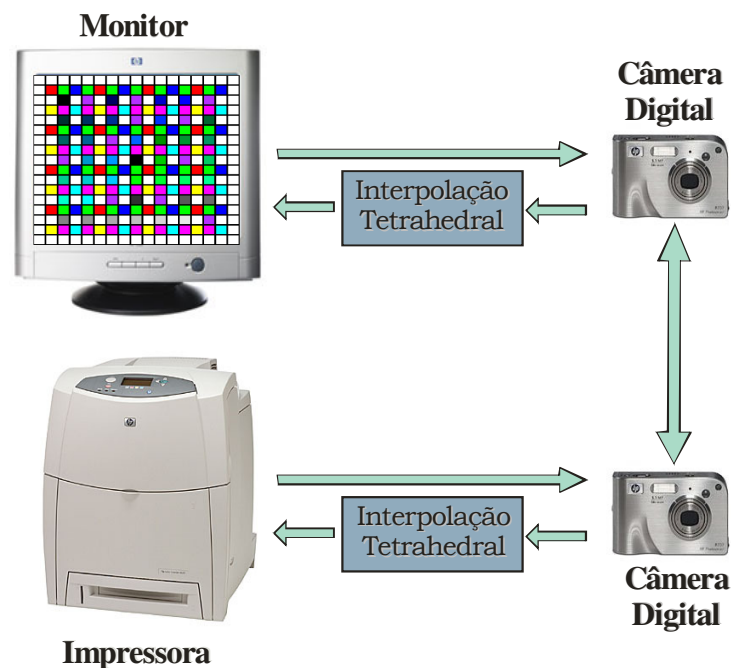


Figura 32 - No método proposto de correção, usa-se uma câmera digital no lugar de um colorímetro ou um espectrofotômetro. As cores mostradas pelo monitor CRT e impressas são transferidas para o espaço de cor RGB da câmera digital e para realizar o mapeamento entre os dispositivos utilizamos a interpolação tetraedral.

O método proposto de calibração trabalha da seguinte maneira:

- Um conjunto de amostras de cores é mostrado pelo dispositivo de referência (por exemplo, um monitor).
- A câmera captura as cores mostradas no dispositivo de referência.
- O mesmo conjunto de amostras de cores é mostrado pelo dispositivo alvo (por exemplo, uma impressora).
- A câmera digital captura as cores mostradas pelo dispositivo alvo.
- Ambos conjuntos de cores capturadas pela câmera digital são comparados.
- Baseado no mapeamento entre os espaços de cores (cores capturadas da referência e alvo) a tabela de cores do dispositivo de referência é alterado de forma que a cor gerada pelo dispositivo alvo seja a mesma cor do dispositivo de referência.

4.2 USANDO A CÂMERA DIGITAL PARA MEDIR CORES

Na técnica proposta de calibração utiliza-se uma câmera digital comum. Problemas da utilização de uma câmera para calibração incluem o fato de que a câmera digital se adapta a todo instante; cores vizinhas influenciam uma a outra e o metamerismo pode fazer com que diferentes cores sejam capturas pela câmera digital como uma mesma cor.

4.2.1 Invariância da Câmera Digital

A automatização de uma câmera digital comum pode facilitar a tarefa do usuário, mas para a calibração de dispositivos, isto poderá acarretar distúrbios, o que é realmente prejudicial para as medidas colorimétricas. Portanto, se propõe alguns procedimentos que permitem o controle sobre essas adaptações. Por exemplo, esperar o monitor aquecer; manter o brilho do monitor baixo e um alto contraste para um monitor CRT. A imagem impressa deverá ser iluminada de forma homogênea. O ângulo entre o eixo da câmera e a imagem deverá ser de 90°.

Muitas funções da câmera são automatizadas como a abertura, foco, velocidade de captura, balanço do ponto branco, equilíbrio de contraste, etc. Portanto, para evitar a adaptação da câmera, todas estas funções devem ser controladas. O *flash* deve ser desligado e a câmera deve trabalhar com a melhor resolução possível, aumentando assim a qualidade da imagem capturada. O controle da abertura e velocidade da câmera pode ajudar a sincronia da captura com a varredura do monitor.

Outro problema a ser tratado é o fato de que amostras de cores sofrem influência das cores vizinhas quando uma imagem é capturada por uma câmera digital. Isto pode ser verificado gerando um conjunto de amostras no monitor, cada amostra de cor possui 86 x 86 pixels, onde uma amostra única de cor, escolhida aleatoriamente, é repetida em diferentes posições, conforme a Figura 33. Depois de capturada a imagem com a câmera digital, mede-se a diferença da amostra única de cor em suas diferentes posições com relação à posição da amostra mais central.

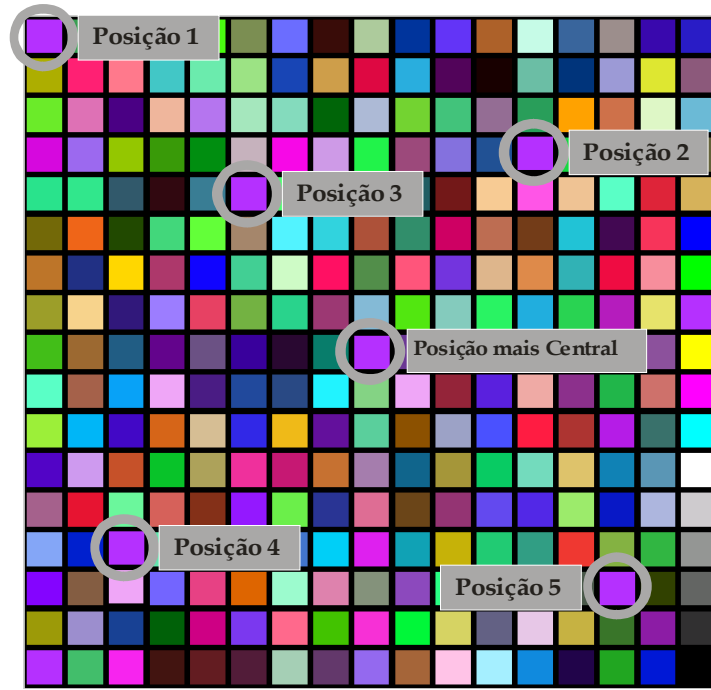


Figura 33 - Uma amostra de cor replicada em diferentes posições pode, eventualmente, ser vista como cores diferentes por uma câmera.

A cor medida muda dependendo da sua posição na imagem. O erro entre a amostra de cor distribuída em diferentes posições, comparada com a amostra mais central pode ser visto na Tabela 4.1 onde os dados da tabela foram obtidos pelas cameras *HP Photosmart R817*, *HP Photosmart R707* e *Nikon Coolpix 5900*. O erro é dado pela distância Euclidiana no espaço de cor CIELAB [5][27] ΔE_{ab} .

(9)

$$\Delta E_{ab}^2 = (L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2$$

A primeira coluna da Tabela 4.1 indica a posição da amostra de cor na Figura 323 e a segunda coluna mostra o erro ΔE_{ab} entre a amostra de cor distribuída nas suas diferentes posições comparadas com a amostra de cor mais central. A média do erro ΔE_{ab} da Tabela 4.1 é superior a 4,7.

Para reproduzir a interdependência entre as amostras de cores vizinhas, cada cor medida deve ser cercada pela mesma vizinhança. Chamou-se esta vizinhança de “*cluster*”, sendo esta formada por cores extremas: puro vermelho, verde, azul, branco e preto. O objetivo é

fazer com que a referencia de cor central seja espacialmente invariante. Foram feitos alguns testes para reduzir esta interdependência, entre estes, dividiu-se um conjunto de cores ao meio, onde na parte superior, cada amostra de cor a ser medida possui a mesma vizinhança (*cluster*) e a outra metade sem *clusters*, conforme a Figura 34.

Tabela 4.1 - Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central da imagem, conforme a Figura 33.

	Diferença com relação à posição mais central (ΔE_{ab})		
Posição	HP R817	HP R707	Coolpix 5900
1	6.8746	6.7245	6.9135
2	2.3941	2.5817	2.8423
3	6.8000	6.5514	6.9354
4	2.9024	3.2175	3.1462
5	4.6047	4.9374	4.8468

Tabela 4.2- Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central de uma imagem *raw*, conforme a Figura 33.

Diferença com relação à posição mais central (ΔE_{ab})	
Posição	HP R817
1	0.6976
2	2.9248
3	1.9609
4	2.4408
5	1.8563

Para comprovar que amostras de cores sofrem influência de cores vizinhas, devido aos processamentos realizados pela câmera digital, um experimento similar ao teste anterior foi realizado, porém a imagem gerada pela câmera digital é pura, desprovida de processamento interno e compressão, ou seja, a imagem é *raw*. O erro médio ΔE_{ab} visto na

tabela 4.2 é inferior a 2,1. Porém não são todas as câmeras digitais que oferecem a aquisição de imagens *raw*, portanto resolveu-se utilizar os *clusters*.

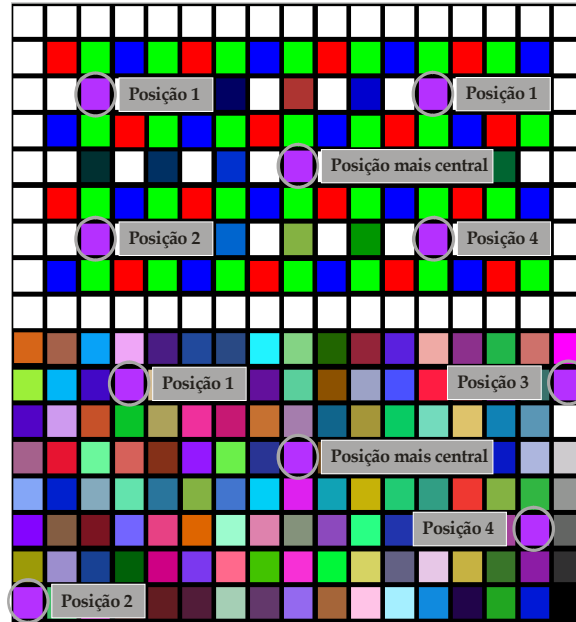


Figura 34 - Imagem dividida em duas partes: metade com *clusters* e a outra metade sem *clusters*. Uma única amostra de cor repetida em diferentes posições é medida com relação a amostra mais central.

Para realizar testes, utilizou-se três câmeras digitais: *HP Photosmart R817*, *HP Photosmart R707* e uma *Nikon Coolpix 5900*. Mediu-se a amostra de cor nas suas diferentes posições e comparou-se com a amostra mais central de cada região. Na região *com clusters* obteve-se um erro maior com relação à região sem *clusters*, estes resultados podem ser vistos nas Tabela 4.3.

Na Tabela 4.3 (a) nota-se que a amostra de cor distribuída em diferentes posições comparada com a amostra de cor mais central da região com *clusters* obteve um erro ΔE_{ab} médio menor que 1.8. Na Tabela 4.3 (b) a amostra de cor distribuída nas diferentes posições comparadas com a posição mais central da região sem *clusters* obteve um erro ΔE_{ab} médio superior a 3.8. A média do erro ΔE_{ab} da Tabela 4.3 (a) é relativamente menor que a média do erro ΔE_{ab} da Tabela 4.3 (b).

Tabela 4.3 - Resultado do erro ΔE_{ab} das amostras de cor distribuídas em suas diferentes posições com relação ao ponto mais central de cada região, conforme Figura 34. A Tabela (a) indica o erro ΔE_{ab} da região com *clusters* e (b) o erro ΔE_{ab} da região sem *clusters*.

(a)

	Diferença com relação à posição mais central (ΔE_{ab})		
Posição	HP R817	HP R707	Coolpix 5900
1	1.4286	1.3215	1.5273
2	1.9871	1.8810	2.1420
3	2.0156	1.9984	1.9852
4	1.6821	1.7591	1.5248

(b)

	Diferença com relação à posição mais central (ΔE_{ab})		
Posição	HP R817	HP R707	Coolpix 5900
1	5.4235	5.6425	5.8542
2	3.1254	2.9578	3.5761
3	4.5027	5.0012	4.7327
4	2.0152	2.6841	2.1164

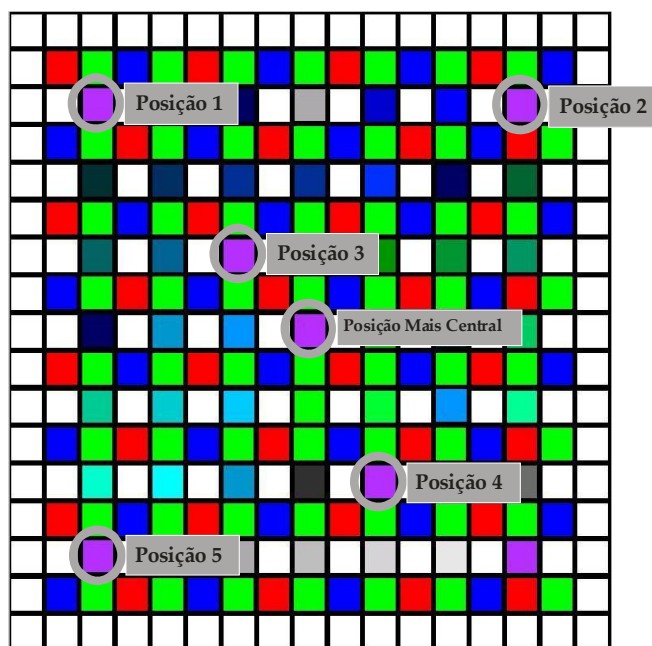


Figura 35 - Uma única amostra de cor replicada em diferentes posições cercada por *clusters*.

Semelhantemente ao teste realizado anteriormente, uma amostra de cor foi distribuída em diferentes posições e comparadas com a cor mais central da imagem, cada amostra de cor possui a mesma vizinhança, conforme Figura 35. O resultado do erro ΔE_{ab} pode ser visto na Tabela . Neste teste foram utilizadas as câmeras digitais *HP Photosmart R817*, *HP Photosmart R707* e uma *Nikon Coolpix 5900*.

Tabela 4.4 - Resultado do erro ΔE_{ab} da amostra de cor distribuídas em diferentes posições com relação ao ponto mais central, conforme Figura 35.

Posição	Diferença com relação à posição mais central (ΔE_{ab})		
	HP R817	HP R707	Coolpix 5900
1	1.6153	1.6852	1.7532
2	1.8336	1.9351	2.1548
3	1.0936	1.2584	1.0746
4	2.1303	1.9242	2.1152
5	1.9325	2.0159	1.8634

Na Tabela 4.4 o erro ΔE_{ab} médio é inferior a 1,8. Com isso, nota-se que o erro continua invariante. O mesmo não acontece na Tabela 4.1 referente à Figura 33. Conseguiu-se garantir a invariância espacial. É preciso também assegurar a invariância temporal, isto é, a invariância da câmera digital não deve depender do tempo. Então foi feito o mesmo experimento realizado na Figura 35 em diferentes instantes de tempo, utilizando imagens com *clusters*. Na Tabela 4.5 estão associados respectivamente o erro ΔE_{ab} obtidos pelas câmera *HP Photosmart R817* , *HP Photosmart R707*.

Este teste foi realizado em diferentes instantes de tempo. Primeiramente em um instante inicial, uma hora depois, um dia depois e finalmente uma semana depois. O erro médio ΔE_{ab} visualizados na Tabela 4.5 (a)(b) continua inferior a 1.8.

Tabela 4.5 - Resultados da invariância temporal

(a)

	Diferença com relação à posição mais central em diferente intervalo de tempo (ΔE_{ab})				
	<i>HP Photosmart R817</i>				
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tempo inicial	1.7264	2.1152	1.4568	1.3576	1.9942
Uma hora depois	1.8243	1.4856	1.2731	1.7253	2.0012
Um dia depois	1.9146	1.3485	1.2135	1.9542	1.5512
Uma semana depois	2.0134	1.0234	1.1455	1.8542	1.8842

(b)

	Diferença com relação à posição mais central em diferente intervalo de tempo (ΔE_{ab})				
	<i>HP Photosmart R707</i>				
	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Posição 4	Posição 5
Tempo inicial	1.8316	1.9547	1.5030	1.4182	1.3473
Uma hora depois	1.7864	1.7657	1.2952	1.6371	1.9901
Um dia depois	2.0158	1.4899	1.3861	1.8843	1.6810
Uma semana depois	1.8025	1.3974	1.2649	1.7524	1.9102

4.3 METAMERISMO

Metamerismo acontece quando cores que tem diferentes distribuições de potência espectral radiante são vistas como a mesma cor por um certo observador. O espaço de cores que um monitor CRT pode reproduzir é comumente significativamente maior que o espaço de cores que uma câmera digital consegue capturar. Na Figura 36 ilustra-se o mapeamento entre diferentes espaços de cores. Seja RGB A o espaço de cor linear que o monitor pode reproduzir. Seja o cubo RGB B, um espaço de cor não-linear, que a câmera digital consegue reproduzir. Por causa do metamerismo, há algumas cores que não podem ser capturadas pela câmera digital, criando assim buracos em seu espaço de cor. Estes buracos dificultam o processo de mapeamento inverso.

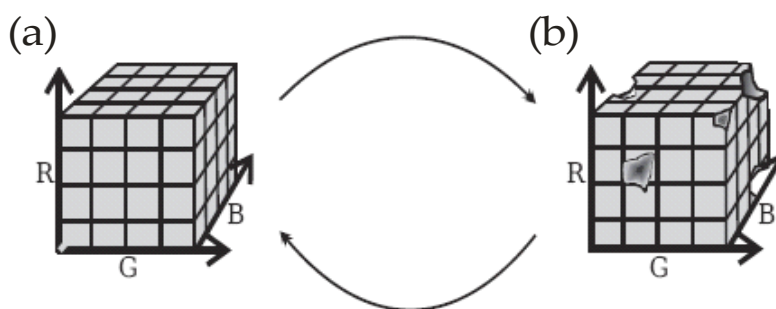


Figura 36 - Mapeamento entre espaço de cores. (a) representa o espaço de cor RGB do monitor, e (b) representa o espaço de cor RGB da câmera digital. Os buracos no espaço de cor da câmera digital indicam uma região de cores que a câmera não consegue reproduzir, devido ao metamerismo.

No processo de calibração da impressora, um processo similar foi feito, e usamos a interpolação tetraedral para mapear o espaço de cor [6]. Porém, neste caso, a câmera digital usualmente reproduz o espaço de cor da impressora e monitor com problemas. Para resolver o problema de metamerismo, pontos metaméricos foram ignorados. Marcaram-se as regiões onde duas cores visualizadas no monitor ou impressas são reproduzidas como a mesma cor no espaço de cor da câmera, a tolerância para a escolha dos pontos que sofrem metamerismo é de $\Delta E_{ab} 5$.

Na Figura 38 (a) ilustra-se o espaço de cor RGB linear e na Figura 38 (b) o espaço de cor RGB não-linear, onde as regiões em que ocorre metamerismo estão marcadas de azul.

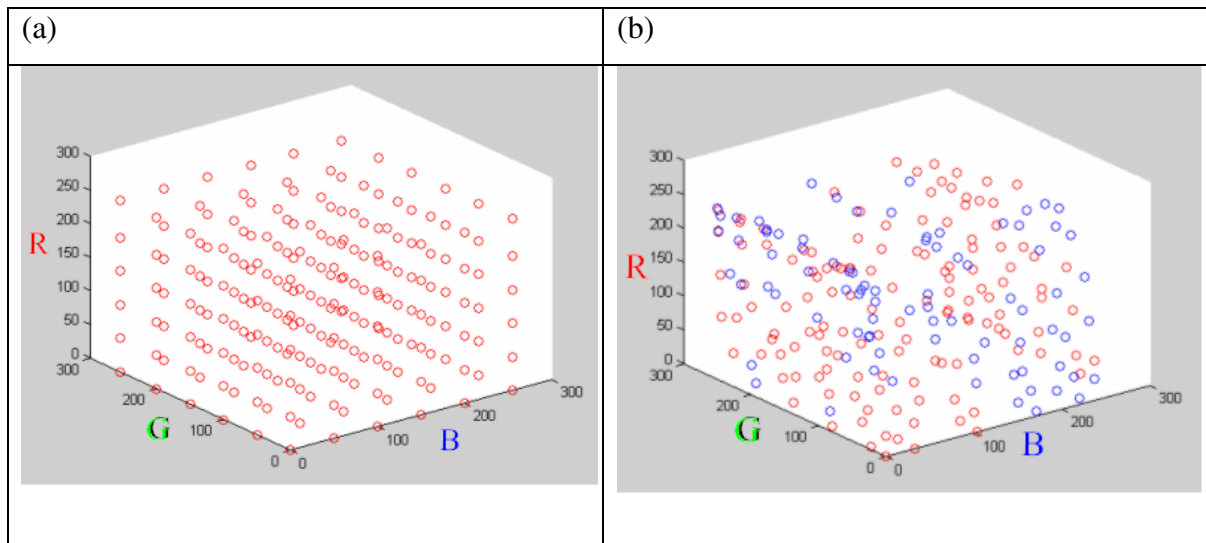


Figura 37 - Espaço de cor linear e não linear. No espaço de cor RGB (a), está sendo representado o espaço de cor linear e o RGB (b) esta sendo representado o espaço de cor não-linear e os pontos azuis são as regiões metaméricas.

4.4 RESULTADOS

Dois testes de validação foram feitos: um objetivo e outro subjetivo. No teste objetivo calibraram-se dois monitores usando os passos descritos na seção 4.2. Foi usado um colorímetro para medir as cores no monitor, antes e depois da calibração, para validar os resultados. Para a calibração da impressora, foram seguidos passos similares. Por não haver um espectrofotômetro para comparar a cor entre o monitor e a impressora, foi realizada uma avaliação subjetiva. Pediu-se a um grupo de voluntários para comparar as cores antes e depois da calibração.

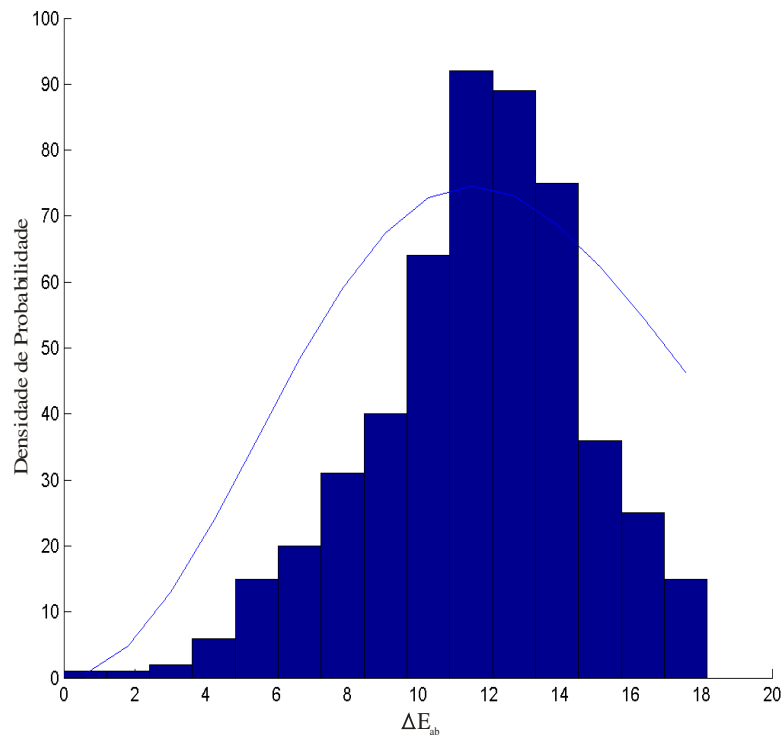


Figura 38 - Histograma do erro ΔE_{ab} entre monitores antes do processo de calibração.

Na calibração objetiva, utilizou-se um monitor *HP 9500*, um monitor *LG Studioworks 995SE* e câmeras digitais *HP Photosmart R817* e *R707*. Foi gerado um conjunto de amostras de cores em ambos os monitores e capturaram-se estas cores com um colorímetro *Eye One Display2* da *Gretag Macbeth*. Calculou-se o erro ΔE_{ab} entre os monitores, sem o processo de calibração. Na Figura 38 pode-se observar o histograma do erro ΔE_{ab} entre monitores cuja média é de 11,67.

Depois de medir as cores do monitor, o processo de calibração é aplicado utilizando uma câmera digital. As cores visualizadas no dispositivo de saída se diferenciam das cores do dispositivo de entrada por uma pequena divergência. Depois da calibração, mediu-se novamente o conjunto de cores e o histograma do erro ΔE_{ab} é mostrado na Figura 39 para a câmera R817 e na Figura 40 para a câmera R707. Na Figura 39 e Figura 40 nota-se que o monitor calibrado levou a erros significativamente menores comparado com o monitor não calibrado. A média ΔE_{ab} é de 5,83 na Figura 39 e 5,91 na Figura 40.

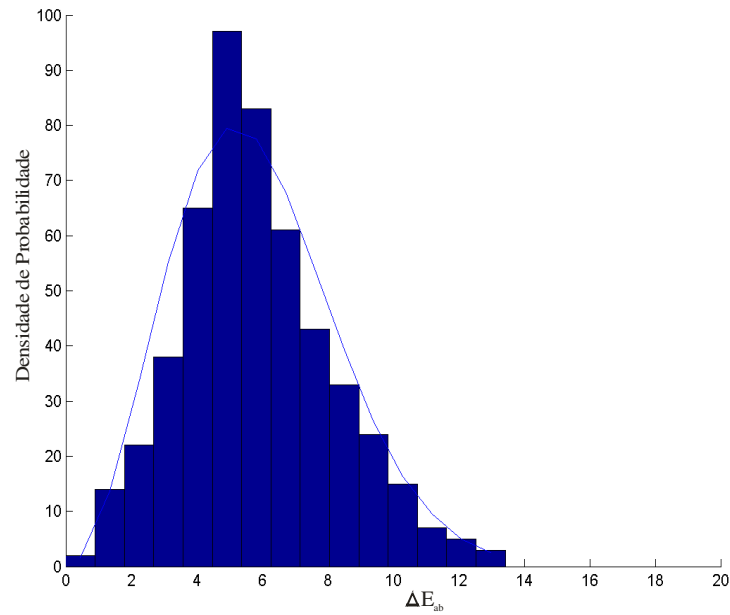


Figura 39 - Histograma do erro ΔE_{ab} entre monitores depois do processo de calibração utilizando a câmera *R817*.

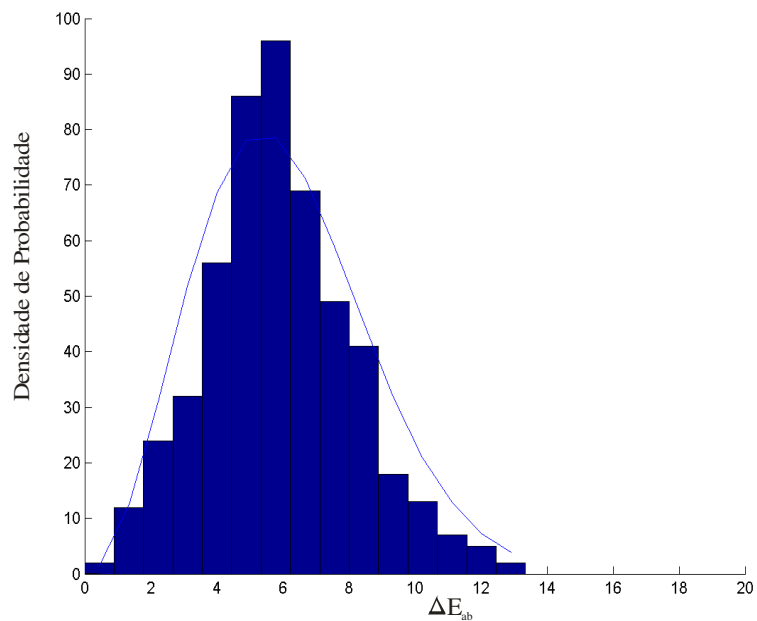


Figura 40 - Histograma do erro ΔE_{ab} entre monitores depois do processo de calibração utilizando a câmera *R707*.

Depois da correção de cor, encontrou-se um erro ΔE_{ab} . Espera-se que a probabilidade de tal erro diminua com a sua magnitude. Assim, assume-se que a probabilidade do erro cai conforme uma curva Gaussiana, isto é, com $e^{-\Delta^2}$. Porém, um erro de magnitude Δ significa

que a cor alvo fica sobre a superfície de uma esfera de raio Δ ao seu redor correspondendo o ponto de cor do dispositivo referência. Se a cor do dispositivo alvo foi distribuída uniformemente no seu espaço de cor, é claro que haveria mais cores sobre a superfície de uma esfera de raio Δ_1 do que sobre uma de raio Δ_2 se $\Delta_1 > \Delta_2$. Em outras palavras, também espera-se que o erro irá crescer com Δ^2 . Como resultado, espera-se que a função de densidade de probabilidade (PDF) do erro da cor $p(\Delta)$ seja algo proporcional a $\Delta^2 e^{-\Delta^2}$. Conseqüentemente, o ΔE_{ab} PDF deve se aproximar da distribuição de Maxwell-Boltzmann (MB) [27]:

(9)

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{1}{a^3} x^2 e^{-\frac{x^2}{2a^2}} \right),$$

Onde a é um controle de parâmetros. Desta forma foi feito um teste de casamento das curvas do histograma de ΔE_{ab} com a distribuição MB. Para tal, foi usado o teste qui-quadrado [28]:

(10)

$$t_{x^2} = \sum_{i=1}^M \frac{|f_{MB}(x_i) - f_{\Delta E}(x_i)|^2}{f_{MB}(x_i)},$$

onde x_i são os pontos de teste.

Foi criado o parâmetro a e repetido os testes, procurando pelo mínimo t_{x^2} . Antes da calibração encontrou-se $t_{x^2} = 114.8$, conforme Figura 41, enquanto depois da calibração encontraram-se $t_{x^2} = 29.2$ para a câmera *R817* e $t_{x^2} = 34.8$ para a câmera *R707*, conforme Figura 42 e Figura 43, respectivamente. Isto é, há um ajuste (*fit*) muito melhor dos dados calibrados. Isto confirma que realmente o erro depois do processo de calibração decai como uma distribuição Gaussiana. Para os dados não calibrados, espera-se que o erro seja menos concentrado. Isto é, mais uniforme sem decair rapidamente como uma Gaussiana.

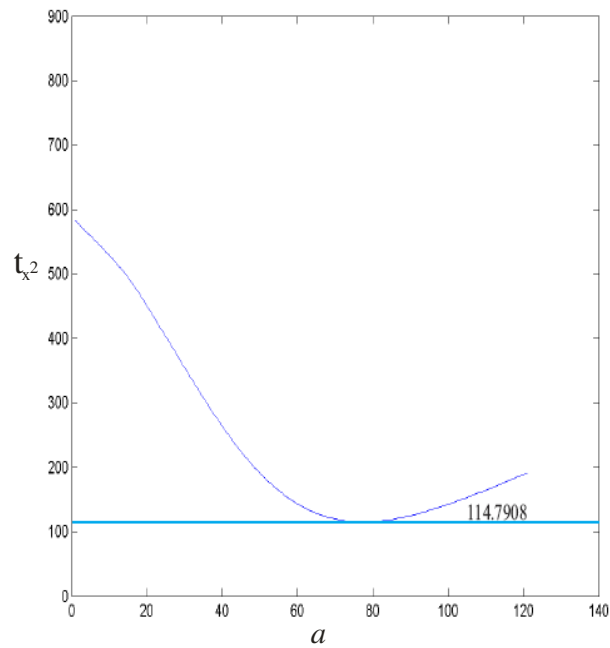


Figura 41 - Teste *qui-quadrado* t_{x2} para vários valores de “ a ” (na distribuição MB) antes do processo de calibração R817.

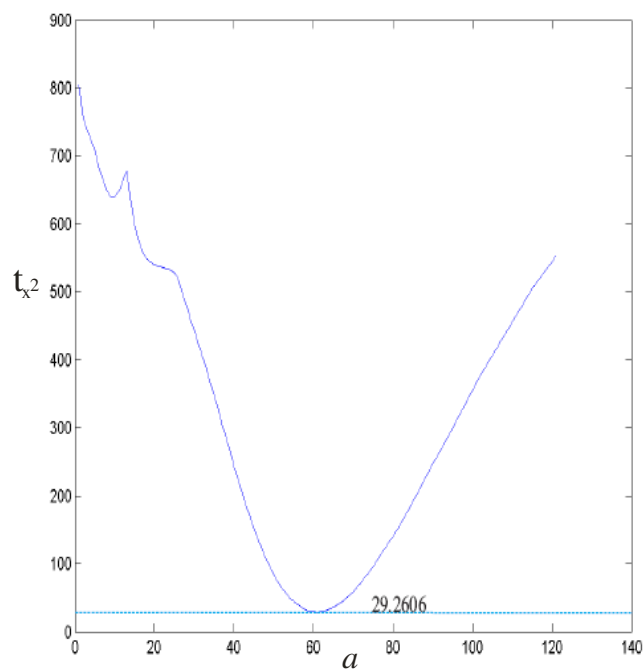


Figura 42 - Teste *qui-quadrado* t_{x2} para vários valores de “ a ” (na distribuição MB) depois do processo de calibração, utilizando a câmera R817.

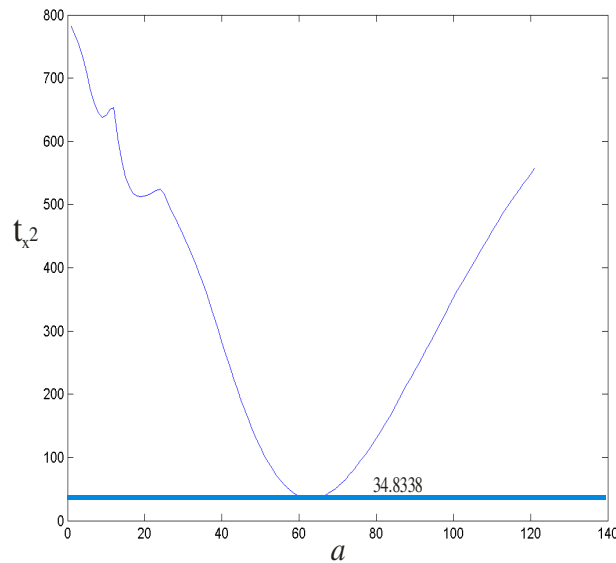


Figura 43 - Teste *qui-quadrado* t_{x2} para vários valores de “ a ” (na distribuição MB)depois do processo de calibração utilizando a câmera *R707*

No teste de calibração da impressora, utilizou-se um monitor *HP9500*, uma impressora *HP 4650* e uma câmera digital *HP photosmart R707*. Gerou-se um conjunto de amostras de cores no monitor que foi posteriormente impresso com e sem o processo de calibração. Foi pedido para que alguns voluntários associassem as cores vistas no monitor com uma das duas versões de cores impressas: calibradas ou não calibradas. O conjunto de cores, selecionadas aleatoriamente, a serem avaliadas pelos voluntários são mostradas na Figura 44.

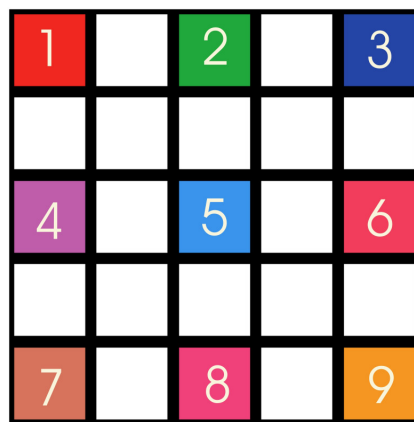


Figura 44 - Cores geradas no monitor, utilizadas para o teste subjetivo

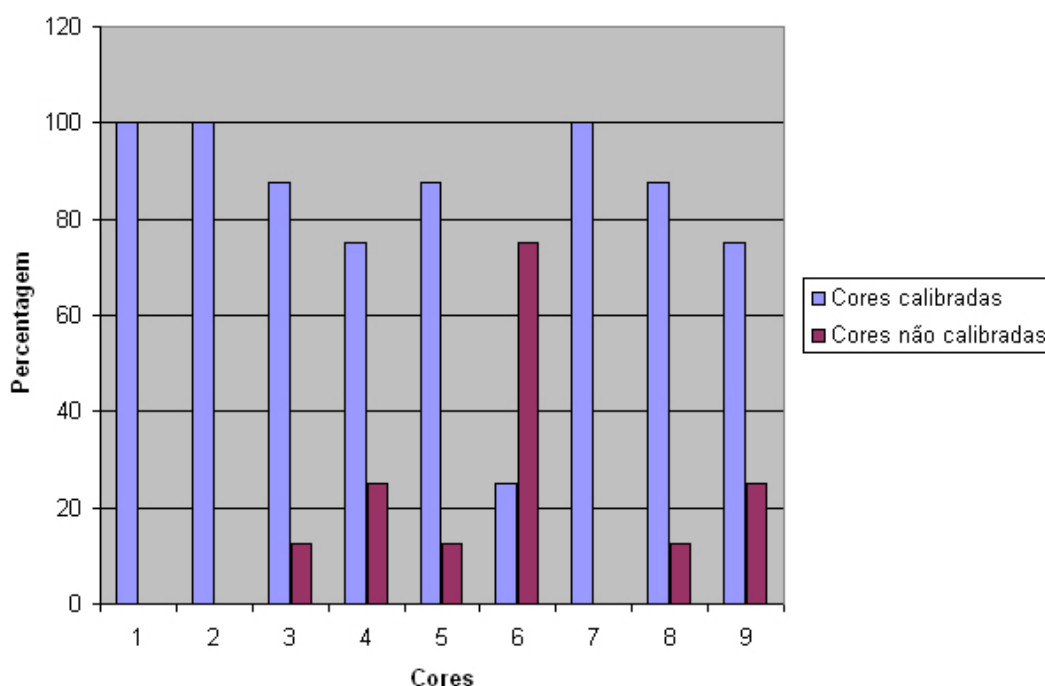


Figura 45 – Resultado do teste de validação da calibração da impressora. O eixo x indica o numero de cada cor na Figura 44, e o eixo y indica a freqüência de seleção de cada cor como sendo mais similar à cor original mostrada no monitor.

No processo de calibração da impressora, o conjunto de cores utilizado continha 512 amostras, mas para viabilizar os testes subjetivos utilizamos 9 amostras de cores entre as 512 iniciais, já que seria inviável que cada individuo avaliasse uma grande amostra de cores. Fixando as cores escolhidas para que todos os indivíduos avaliassem, consegue-se mostrar graficamente os resultados por cor, como mostrado na Figura 45. As cores no eixo x estão respectivamente enumeradas e relacionadas com as cores da Figura 44. Pode-se verificar claramente que as cores calibradas obtiveram uma preferência visual maior, com apenas uma exceção, sendo esta a cor 6. Esta cor não pode ser reproduzida pela câmera digital, causando metamerismo, isto é, a cor esta localizada em um buraco do espaço de cor da câmera, como ilustrado na Figura 36.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

5.1 SUMÁRIO DO TRABALHO

O trabalho foi iniciado com o intuito de desenvolver uma técnica de calibração de cores barata e eficiente. A utilização de uma câmera digital como substituta de um colorímetro ou um espectrofotômetro seria uma boa opção, pois este é um equipamento que muitas pessoas possuem em casa.

O primeiro passo do projeto foi desenvolver uma técnica que mantivesse os dados capturados pela câmera digital invariantes. Vários testes foram realizados e percebeu-se que as cores influenciavam uma às outras. Portanto surgiu a idéia de influenciar cada amostra de cor com a mesma vizinhança. Os resultados obtidos com os *clusters* foram relativamente melhores do que as imagens sem *clusters*.

Ao capturar a imagem gerada por um monitor pode-se perceber claramente que a varredura do mesmo estava influenciando na captura dos dados. Houve então, a necessidade de controlar a abertura da câmera, de tal modo que a varredura não influenciasse mais a medida.

O espaço de cor produzido pelo monitor é relativamente maior que o espaço de cor que a câmera digital consegue reproduzir. Devido a este fato, a câmera digital reproduzirá distintas cores geradas pelo monitor como uma mesma cor, este fenômeno é conhecido por metamerismo. Uma maneira de controlar o metamerismo foi ignorar as cores metaméricas e realizar o mapeamento entre *gamuts* com as cores não metaméricas.

Com a câmera estável e o metamerismo controlado, pode-se realizar a calibração entre dois monitores, onde o resultado da calibração pode ser medida por um colorímetro. A calibração de uma impressora também foi realizada, mas por não possuir um espectrofotômetro para medir as cores calibradas, um teste subjetivo foi realizado.

Os resultados no teste objetivo e subjetivo comprovam a eficiência do método proposto de calibração. Portanto uma câmera digital pode ser utilizada para medir cores, bastando saber controlar o dispositivo e como os dados capturados podem ser invariantes.

5.2 APRESENTAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DO MESTRADO

O trabalho apresentado consiste em um novo método de calibração barato e acessível ao usuário comum. A medição de cores a partir de uma câmera digital dá liberdade ao usuário para calibrar uma quantidade variada de dispositivos, por exemplo, dois monitores, uma impressora ou mesmo um *datashow*.

A invariância da câmera digital a partir da referência de cores (*clusters*), garante a integridade da imagem capturada. Graças a esta técnica, a calibração de dispositivos utilizando uma câmera digital se tornou possível, pois é ela que garante a consistência dos dados obtidos.

5.3 PERSPECTIVAS PARA A CONTINUIDADE DA PESQUISA

Estudos futuros podem melhorar o processo de calibração proposto, podendo:

- Testar novas técnicas de invariância da câmera digital, uma sugestão seria utilizar diferentes *clusters*, no intuito de minimizar o erro gerado pela influência das cores vizinhas em cada amostra de cor.
- Realizar os testes descritos no capítulo 4 com uma câmera digital de alta resolução. Provavelmente as cores medidas por esta câmera serão mais precisas, portanto espera-se que o erro da calibração seja menor.
- Automatizar o processo de captura das amostras de cores.

- Utilizar uma quantidade maior de amostras de cores para realizar a calibração do dispositivo, podendo assim diminuir a distância entre os pontos minimizando o erro da interpolação.
- Validar a calibração da impressora a partir de um teste objetivo utilizando um espectrofotômetro, podendo assim garantir de forma objetiva a sua eficiência.
- Realizar a calibração de novos dispositivos, como por exemplo, um *data-show*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ostromoukhov, V. Hersch, R., D., Péraire, C., Emmel, P., e Amidror, I. “Two Approaches in Scanner-Printer Calibration: Colorimetric Space-Based VS. ”Closed-Loop””, International Symposium on Electronic Imaging: Science & Technology, pp. 133-142, 1994.
- [2] Hung, P, C. “Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations”, Jornal Electronic Imaging, vol.2, pp. 53-61, 1993.
- [3] Sharma, G., “Target-less scanner color calibration”, The Seventh Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, The Society for Imaging Science and Technology, Springfield, VA., Vol.6, pp. 69-79, 1999.
- [4] Schmitt, F. e Hardeberg, J. Y. “Color printer characterization using a computational geometry approach”, Proceedings of IST SID 5th Color Imaging Conference, Vol.2, pp. 96-99, 1997.
- [5] Sharma, G. “Digital Color Imaging Handbook”. CRC PRESS, New York, 2002.
- [6] Amidror, I. “Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey”, Journal of Electronic Imaging, Vol.2, pp. 157-176, 2002.
- [7] DiCarlo J. M., Montgomery, G. E. e Trovinger S. W. “Emissive chart for imager calibration”, Twelfth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications, Vol.9, pp. 295-301, 2004.
- [8] Hunt, R.W.G. “The Reproduction of Colour”. Vol. 6, Wiley, England, , 2004
- [9] Gonzalez, R.C., e Woods R.E. “Processamento de Imagens”. Edgard Blucher, 509p., 2000.

- [10] KING, J. C. “Why Color Management?”. Artigo sobre gerenciamento de cores. Disponível em: <<http://www.color.org>>. Acesso em: 31 de outubro 2006.
- [11] Trussell J. H., Eli, S., Vrhel, M. “Color Image Processing”. Ieee Signal Processing Magazine. Vol. 14, pp. 14-22, 2005.
- [12] Grandis, L. D. “Theory and Use of Color”. New York: Harry N. Abrams, Inc., 1986.
- [13] Gonzáles, R.C. e Woods, R.E. “Digital Image Processing”, Vol. 2, Prentice Hall, New Jersey. 2002.
- [14] TASI – Technical Advisory Service for Images. An Overview of Color Management. Disponível em: <<http://www.tasi.ac.uk/>>. Acesso em: 20 setembro 2006.
- [15] Hata, S., Miyashita, Y. e Hanafusa, H. *Human sensitivity of color defects inspection*. Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 713–718, 1996.
- [16] Zelanski P. J. e Fisher M. P. “Color”. Vol. 4. Prentice Hall, New Jersey. 184p., 2002.
- [17] Leão, A.C., Araújo, A. de A. e Souza, L.A.C. “Implementação de Sistema de Gerenciamento de Cores para Imagens Digitais”. Editora PUC-Minas, Poços de Caldas, MG, Brazil, cap. 3, 2005, pp. 61-96.
- [18] Jan C.A. B., Spyros D.T. “Color Vision”. Journal of Chemical Crystallography, Springer Netherlands, pp. 433-439, 2005.
- [19] Kuehni R.G. “Color: An Introduction to Practice and Principles”. Vol 2, Wiley, 216p., 2004.
- [20] Wyszecki, G. e Stiles, W. S. “Color Science Concepts and methods, Quantitative Data and Formulae”, Wiley Classics Library Edition, 2000.

- [21] Bruce, F., Murphy, C. e Bunting, F. “Real World Color Management”. Second Edition. Estados Unidos: Peachpit Press, 582 p. 2005.
- [22] Giorgianni E.J. e Madden T.E. “Digital Color Management: Encoding Solutions”, Prentice Hall PTR, 576p. 1998.
- [23] Sharma A. “Understanding Color Management” Thomson Delmar Learning, 384p., 2003.
- [24] Vrhel M.J. “Color Device Calibration: A Mathematical Formulation” IEEE Transactions on Image Processing, Vol 8, pp. 796-1806, 1999.
- [25] Adams, J., Parulski, K. e Spaulding, K. “Color processing in digital cameras”, IEEE Micro, Vol.6, pp. 20-30, 1998.
- [27] Papoulis, A. “Probability Random Variables, and Stochastic Processes”, McGraw-Hill, 1986.
- [28] Conover, W. J. “Practical Nonparametric Statistics”, John Wiley and Sons, 1971.