

Metodologia para Correção de Cores de Imagens Digitais de Íris Humanas

por

Vera Machado de Codes

**Universidade Federal de Santa Catarina
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Metrologia e Automação - LABMETRO**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Metrologia na Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

Florianópolis, 14 de outubro de 2003

APROVAÇÃO

Metodologia para Correção de Cores de Imagens Digitais de Íris Humanas

Vera Machado de Codes

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

“Mestre em Metrologia”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.
Professor Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavado, PhD.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Banca Examinadora:

Marco Antonio Martins Cavado, PhD.
Departamento Eng. Mecânica - UFSC

Analucia Vieira Fantin, Dr. Eng.
Departamento Eng. Mecânica - UFSC

Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng
Departamento Eng. Mecânica - UFSC

Resumo

Os sistemas de Visão Artificial (SVAs) são sistemas capazes de adquirir, processar e analisar imagens digitais. Cada vez mais utilizados em atividades de pesquisa, reconhecimento de padrões, diagnósticos médicos, entre outros, os SVAs têm como uma das suas principais atribuições a medição das cores de um objeto.

Este trabalho contribui para o aperfeiçoamento de um SVA denominado GlucoIris, em desenvolvimento no LABMETRO/UFSC. Formado por um módulo de aquisição de imagens coloridas, acoplado a um programa de computador para processamento dos dados, o GlucoIris tem como objetivo determinar o valor da glicemia em seres humanos, em função da coloração da íris do usuário.

Este trabalho propõe uma metodologia para compensação das distorções de cores provocadas pelo sistema ou por influências externas ao mesmo. Foram propostos, implementados e testados cinco modelos de correção das cores, três dos quais baseados em transformações lineares entre coordenadas de cor, e dois outros baseados nos modelos de operação das câmeras digitais atuais.

São utilizadas bordas coloridas, a serem sempre fotografadas juntamente com o objeto cuja cor se quer medir, e que serão usadas como referências de cores. As variações detectadas nas referências serão utilizadas para se corrigir as distorções de cores provocadas pelo sistema. Neste trabalho, os diversos algoritmos são avaliados para este fim.

A avaliação é feita com base em experimentos em condições controladas, que envolvem uma avaliação da câmera digital utilizada no sistema, sua estabilidade na medição das cores ao longo do tempo, variações nas condições de iluminação e no posicionamento relativo entre a câmera e o objeto, bem como uma avaliação de influências externas ao sistema.

Os resultados mostram que é possível reduzir as incertezas presentes na medição, com a utilização dos algoritmos propostos. Apontam, também, para as condições mais adequadas para aquisição das imagens, além dos requisitos necessários às referências de cores a serem utilizadas na correção.

Desta forma, este trabalho contribui para desenvolver e avaliar meios que permitam minimizar as variações na medição das cores a partir de imagens obtidas de câmeras fotográficas digitais, uma vez que a utilização desta metodologia não se restringe ao sistema GlucoIris.

Palavras chave: colorimetria, imagens digitais, metrologia óptica.

Abstract

Artificial Vision Systems (AVS) are devices capable of acquiring, processing and analyzing digital images. AVS devices are mainly used for measuring the color attributes of any given object; as such, they have been increasingly applied to research activities, pattern recognition, medical diagnoses and other ends.

This dissertation has aimed at contributing to the improvement of a particular AVS called GlucoIris, currently being developed at LABMETRO, Federal University of Santa Catarina, Brazil. Consisting of a color image acquisition module controlled by software for data processing, GlucoIris seeks to determine the level of glucose in the bloodstream of human beings, based on the color patterns of the user's iris.

We propose a methodology for compensating distortions yielded either by the system itself or external influences. We have presented, implemented and tested five models for correcting color measurement results, three of which based on the linear transformation of color coordinates, the other two based on the operating models of modern digital cameras.

According to the adopted procedures, colored borders are always photographed with every object whose color pattern is being measured, in order to keep track of the color variations of the objects as compared to the reference of the borders, thus facilitating the correction of any distortions inherent to the system. In this dissertation, we have evaluated the algorithms used for that purpose.

Such evaluation is conducted based on the controlled conditions of the experiments, involving an assessment of the accuracy of the digital camera used by the system, its stability as a means of measuring color objects over time, variations in the conditions of lighting and in the relative positioning of the camera as compared to the object. External influences were also taken into account.

Results show that it is possible to reduce the uncertainties inherent in the measurement procedures with the application of the presented algorithms. We also indicate image acquiring conditions which are most appropriate for the experiments, as well as the necessary requirements of the color reference system used for correction purposes.

Considering the fact that this methodology is not restricted to the GlucoIris system, it may contribute to the development and evaluation of other means of minimizing color measurement variations of images acquired with digital photography cameras.

Keywords : color measurement, digital images, optical metrology

A meus pais, Antonio e Lúgia,
e irmãs, Liana e Ana Luiza

Agradecimentos

A meus pais e irmãs, a Marcos Lima e às tias Ieda (*in memoriam*) e Maria Machado, pelo carinho de toda a vida e pelo total apoio que me deram durante a realização deste trabalho;

Ao Prof. Armando Albertazzi, meu orientador de mestrado;

Aos professores e colegas do LABMETRO, em especial à Equipe do GlucoIris e a Sandro Waltrich, Rodrigo Coral e Daniel Provin, pelo apoio que me foi dado;

Aos amigos Janaína Silva, Cesare Pica, Frederico Miglio, Luciana Velloso, Tiago Rolim, Alexandre Montenegro, Laura Carrijo, Carlos Henrique Tolentino e Anna Margaret Kennedy, por terem compartilhado comigo as alegrias e desafios desta jornada;

Às Turmas 2000, 2001 e 2002, pelo espírito de grupo que me ajudou a seguir em frente;

A Rosana Vieira, secretária do LABMETRO e do PósMCI, pelo seu profissionalismo;

A Rafael Lucchesi e Armando Neto, pela confiança e pelo incentivo desde o início;

À CAPES, pelo auxílio financeiro;

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a viabilização deste trabalho, meu reconhecimento e gratidão.

Sumário

Aprovação	i
Resumo	ii
Abstract	iv
Sumário	viii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvi
Capítulo 1	
Considerações Iniciais	1
1.1 Motivação: O Sistema GlucoIris	2
1.2 Objetivos do Trabalho	3
1.3 Estrutura do Documento	4
Capítulo 2	
Fundamentos de Colorimetria	5
2.1 Representação da Cor	6
2.1.1 Sistema Padrão CIE-RGB	6
2.1.2 Sistema Padrão CIE – XYZ	8
2.1.3 Sistema HSI	9
2.2 Equipamentos e Métodos de Medição	11
2.3 Medição de cor utilizando câmera digital	13
2.3.1 Formação de Imagem Digital	13
2.3.2 Características importantes das câmeras digitais	15
2.4 Processamento digital de imagens	16

2.4.1	Compressão	16
2.4.2	Formatos de arquivos	17
2.5	Padrões e referências de cor.....	18
2.5.1	Padrões Brancos	19
2.5.2	Padrões Coloridos	19
Capítulo 3		
Aprimoramento do Sistema de Medição de Cores		21
3.1	Sistema utilizado para processamento das imagens.....	24
3.1.1	Imagens a fotografar.....	24
3.2	Técnicas e Algoritmos utilizados para Correção das cores	24
3.2.1	Transformações lineares.....	25
3.2.2	Conversão entre Sistemas de Cores.....	30
3.2.3	Correção pelo Branco	31
3.2.4	Programa de computador para processamento das imagens.....	33
3.3	Verificação do Programa de Computador	34
Capítulo 4		
Avaliação da Metodologia Proposta		37
4.1	Bancada para aquisição das imagens	38
4.2	Programa de Computador utilizado no processamento das imagens	39
4.3	Levantamento das Componentes de Incerteza	40
4.4	Avaliação da câmera digital.....	42
4.4.1	Compressão da Imagem.....	43
4.4.2	Balanço de Branco.....	45
4.4.3	Modo de Cor	48
4.4.4	Tempo de exposição da câmera	51
4.5	Avaliação do sistema de iluminação.....	54
4.6	Posicionamento da Imagem em relação à câmera.....	56
4.7	Influências Externas.....	59
4.7.1	Iluminação externa	59
4.7.2	Influência de cores de regiões vizinhas.....	62
4.7.3	Influência de reflexos de cores próximas	63
4.8	Estabilidade da medição de cores ao longo do tempo.....	64
4.9	Avaliação dos Resultados das Incertezas	65
4.10	Comentários Gerais	67
Capítulo 5		
Estudo de Casos		69
5.1	Programa de Computador para Análise de Íris Humanas.....	69

5.2	Imagens Analisadas	71
5.3	Resultados Obtidos	73
5.3.1	Referência de Cor Multicolorida	73
5.3.2	Referência de cor contendo diversos tons de azul	75
5.3.3	Referência de cor contendo tons de azul próximos da imagem a ser corrigida	77
5.4	Análise de Resultados	78
Capítulo 6		
Considerações Finais		80
6.1	Conclusões	81
6.1.1	Quanto ao Modelo de Correção	81
6.1.2	Quanto ao Sistema de Representação de Cores HSI	82
6.1.3	Quanto às Referências de Cores utilizadas	82
6.1.4	Quanto às Condições de aquisição das imagens	83
6.1.5	Aplicação da Metodologia para o caso de um objeto inanimado	84
6.1.6	Aplicação da Metodologia para o caso de íris humanas	84
6.2	Recomendações de melhorias	85
Referências Bibliográficas		87

Lista de Figuras

Figura 2.1	Cubo RGB	7
Figura 2.2	Diagrama de cromaticidade do CIE [14]	8
Figura 2.3	Sólido de cor HSI.....	9
Figura 2.4	Corte horizontal no sólido HSI.....	10
Figura 2.5	Exemplo de agrupamento de filtros coloridos para câmeras digitais com um sensor do tipo CCD.....	14
Figura 3.1	Varição da Potência Luminosa em função do tempo.....	22
Figura 3.2	Imagem utilizada na avaliação da repetitividade da quantificação de cores pelo Sistema GlucoIris	23
Figura 3.3	Avaliação da repetitividade da quantificação de cores pelo Sistema GlucoIris Resultados apresentados pela componente R da região vermelha da imagem.....	23
Figura 3.4	Tipos de mosaicos de cores elaborados para avaliação da metodologia	24
Figura 3.5	Caminhos para comparação entre resultados obtidos pela correção em um determinado sistema ou conversão entre sistemas de cor.....	31
Figura 3.6	Mosaicos de cores original e manipulado artificialmente, utilizado na verificação do programa de computador	35
Figura 3.7	Resultados obtidos com a correção de imagens modificadas artificialmente (componente R, Modelo de 12 Constantes).....	35
Figura 3.8	Imagem modificada artificialmente e corrigida pelo Modelos de 3 Constantes.....	36
Figura 4.1	Bancada utilizada nos experimentos.....	38
Figura 4.2	Mosaicos de Cores utilizados na avaliação dos modelos de correção propostos.....	39
Figura 4.3	Fontes de incerteza da medição	41
Figura 4.4	Valores de repetitividade para as componentes R, G e B. Avaliação da Qualidade da Imagem.....	44

Figura 4.5	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação da Qualidade da Imagem.....	44
Figura 4.6	Valores de repetitividade para a componente R Avaliação do Balanço de Branco.....	46
Figura 4.7	Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Balanço de Branco.....	46
Figura 4.8	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Balanço de Branco.....	47
Figura 4.9	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Balanço de Branco.....	47
Figura 4.10	Valores de repetitividade para a componente R Avaliação do Modo de Cor da Câmera.....	49
Figura 4.11	Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Modo de Cor da Câmera.....	49
Figura 4.12	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Modo de Cor da Câmera.....	50
Figura 4.13	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Modo de Cor da Câmera.....	50
Figura 4.14	Valores de repetitividade para a componente R Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera.....	51
Figura 4.15	Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera.....	52
Figura 4.16	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera.....	52
Figura 4.17	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera.....	53
Figura 4.18	Valores de repetitividade para as componentes R, G e B Avaliação do Sistema de Iluminação.....	54
Figura 4.19	Repetitividade para as componentes R, G e B (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Sistema de Iluminação.....	55
Figura 4.20	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Sistema de Iluminação.....	55
Figura 4.21	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Sistema de Iluminação.....	56

Figura 4.22	Valores de repetitividade para a componente R Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto.....	57
Figura 4.23	Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto.....	57
Figura 4.24	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto.....	58
Figura 4.25	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto.....	58
Figura 4.26	Valores de repetitividade para as componentes R, G e B Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema	60
Figura 4.27	Repetitividade para as componentes R, G e B (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema.....	60
Figura 4.28	Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema.....	61
Figura 4.29	Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema	61
Figura 4.30	Mosaico de cores com moldura colorida	62
Figura 4.31	Valores de repetitividade para as componentes R, G e B Avaliação da Influência de Cores de Regiões Vizinhas	62
Figura 4.32	Valores de repetitividade para as componentes R, G, B, H, S e I Avaliação da Influência de Reflexos de Cores Próximas	63
Figura 4.33	Avaliação da Estabilidade da Medição de Cores ao longo do Tempo Valores medidos e corrigidos pelo Modelo de 12 Constantes (componente R).....	64
Figura 4.34	Repetitividade das componentes H, S e I Avaliação da Estabilidade da Medição de Cores ao longo do Tempo.....	65
Figura 4.35	Valores de Repetitividade para a componente R Avaliação Geral das Incertezas	66
Figura 5.1	Região anelar da íris, cujo centro coincide com o centro do círculo íris/esclera. O raio externo corresponde a 85% do raio da íris e o raio interno a 65% do raio da íris	70
Figura 5.2	Referência Multicolorida (Conjunto de 24 elementos de 16 x 16 <i>pixels</i> com cores variadas).....	72
Figura 5.3	Referência contendo diversos tons de azul (conjunto de 8 elementos de 16 x 16 <i>pixels</i>).....	72

Figura 5.4	Referência contendo apenas tons de azul próximos da íris a ser corrigida (conjunto de 11 elementos de 16 x 16 <i>pixels</i>)	73
Figura 5.5	Resultados obtidos com a correção utilizando uma referência multicolorida – Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição.....	74
Figura 5.6	Resultados obtidos com a correção utilizando uma referência multicolorida – Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição.....	75
Figura 5.7	Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons variados de azul Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição.....	76
Figura 5.8	Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons variados de azul Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição.....	76
Figura 5.9	Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons de azul claro Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição.....	77
Figura 5.10	Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons de azul claro Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição.....	77

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Formatos de arquivos e seus respectivos métodos de compressão.....	17
Tabela 4.1	Legenda utilizada para os Modelos de Correção Propostos	45

Lista de Símbolos

- R – Componente vermelha (*Red*) da cor
G – Componente verde (*Green*) da cor
B – Componente azul (*Blue*) da cor
H – Componente matiz (*Hue*) da cor
S – Componente saturação (*Saturation*) da cor
I – Componente intensidade (*Intensity*) da cor
r – Valor da componente vermelha (R)
g – Valor da componente verde (G)
b – Valor da componente azul (B)
 r_c – Componente vermelha corrigida
 g_c – Componente verde corrigida
 b_c – Componente azul corrigida
s – Desvio padrão experimental
n – número de elementos da amostra
t – Coeficiente de *student*
Re - Repetitividade

Capítulo 1

Considerações Iniciais

Os sistemas de visão artificial (SVAs) vêm sendo cada vez mais utilizados, substituindo o papel do homem em diversas aplicações. São sistemas capazes de adquirir, processar e analisar imagens digitais, e, portanto, muito aplicados em atividades de pesquisa, automação de processos industriais, diagnósticos médicos, segurança, sensoriamento remoto, entre outras.

Os SVAs apresentam alguns aspectos positivos: podem operar em uma faixa ampla do espectro de radiações eletromagnéticas, não se limitando à faixa de luz visível ao olho humano. Outro aspecto relevante é que são capazes de adquirir imagens com alta resolução espacial e, dessa forma, com grande nível de detalhes. Além disso, possibilitam a descrição quantitativa das cores, bem como a distinção de centenas ou até mesmo milhares de tons de cinza.

Dentre as aplicações dos sistemas de visão artificial, pode-se destacar o reconhecimento de padrões, realizado através da medição de cores, formas e dimensões de objetos. Particularmente relevante para esse trabalho é a questão da medição de cores, que pode ser utilizada com diversas finalidades – tais como em análises químicas, alimentos, têxtil, plásticos, tintas, controle da qualidade de produtos, etc –, constituindo-se numa das principais atribuições dos SVAs.

1.1 **Motivação: O Sistema GlucoIris**

O GlucoIris é um sistema de visão artificial, em desenvolvimento na UFSC [9] [10], que se propõe a monitorar o nível de glicemia no sangue a partir da análise de imagens coloridas de íris humanas. O desenvolvimento deste sistema é motivado pelos cerca de 177 milhões de diabéticos existentes no mundo¹, que necessitam fazer o monitoramento dos níveis de glicemia três a quatro vezes ao dia. Os métodos usuais pelos quais se obtêm esses valores apresentam bons resultados, mas possuem as desvantagens de serem invasivos, pois requerem a extração de uma gota de sangue do usuário, além de possuírem alto custo de manutenção (cada medição custa em média R\$ 1,50). Por isso, muitos diabéticos não monitoram seus níveis de glicemia como deveriam, o que pode acarretar sérios danos à sua saúde.

Composto por um sistema de aquisição de imagens coloridas acoplado a um programa de computador para processamento dos dados, o GlucoIris se propõe a ser um método não-invasivo para medir o nível de glicemia no sangue a partir de variações da coloração da íris do usuário.

O sistema de aquisição é formado por um sistema de iluminação que utiliza luz branca (halógena), que, com o auxílio de um arranjo óptico, ilumina a região do olho a ser fotografada. Uma câmera fotográfica digital faz, então, a aquisição da imagem da íris do usuário. Essa imagem é analisada pelo programa, que analisa parâmetros de cor e fornece valores de glicemia.

Experiências com o sistema demonstram que há muitas variáveis que influenciam o processo de medição de cores pelo sistema [9]. Fatores ópticos inerentes ao processo de fotografia da íris, como as variações na estabilidade do sistema de iluminação, do posicionamento do olho em relação à câmera, e a influência de iluminação externa ao sistema, levam a erros consideráveis na quantificação das cores pelo GlucoIris.

¹ Dados referentes à população adulta, em 2001, de acordo com a *International Diabetes Federation*

Adicionalmente, os experimentos mostram que a câmera digital é uma fonte considerável de erros, cujo controle é mais difícil devido ao grande automatismo hoje presente nas modernas câmeras fotográficas digitais.

1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é encontrar uma solução de baixo custo para reduzir a incerteza da medição de cores do sistema GlucoIris.

Mais especificamente, este trabalho se propõe a desenvolver e avaliar meios que permitam minimizar as variações na medição das cores a partir de imagens obtidas de câmeras fotográficas digitais.

Serão desenvolvidas e avaliadas várias alternativas que usam bordas coloridas, a serem sempre fotografadas juntamente com a imagem da íris, e que serão usadas como referências de cores. As variações detectadas nas referências serão utilizadas para se corrigir as distorções de cores da íris provocadas pelo sistema. Vários algoritmos serão avaliados para este fim.

Feita esta correção, a incerteza devida a imperfeições do sistema é reduzida, de maneira que as variações de cor da íris detectadas pelo GlucoIris e provocadas por fatores fisiológicos (níveis de glicemia, enfermidades dos olhos, uso de medicamentos, entre outros) sejam realçadas. Neste trabalho, serão testados diferentes referências e diferentes algoritmos de correção de cores.

1.3 Estrutura do Documento

Este documento está estruturado em seis capítulos, distribuídos da seguinte forma:

Além do presente capítulo, que contém algumas considerações iniciais, o capítulo 2 apresenta conceitos básicos sobre Colorimetria, necessários para um bom entendimento do trabalho. São abordados alguns sistemas de representação de cor, equipamentos utilizados na colorimetria, com ênfase na medição com câmeras digitais, noções de processamento de imagens coloridas, bem como utilização de padrões e referências de cores.

O Capítulo 3 discute e apresenta as alternativas implementadas para melhorar o desempenho de câmeras digitais para quantificação de cores: as referências utilizadas para aquisição e processamento de imagens coloridas, os diversos algoritmos de correção de cor implementados no programa de computador, bem como o método utilizado para a validação do programa.

Em seguida, no capítulo 4, é feita uma avaliação dos diversos modelos de correção propostos, sempre considerando os fatores de maior influência no sistema. Este capítulo tem como objetivo avaliar comparativamente a efetividade de cada alternativa testada, bem como selecionar a mais indicada para o sistema.

O capítulo 5 destina-se à aplicação de algumas das alternativas propostas em estudos de casos envolvendo a correção de cores de imagens de íris humanas.

Por fim, o capítulo 6 é destinado às conclusões do trabalho, avaliação dos aspectos positivos e negativos da metodologia proposta, análise dos resultados alcançados, bem como recomendações de melhorias a serem implementadas no sistema.

Capítulo 2

Fundamentos de Colorimetria

A Colorimetria é uma área do conhecimento que consiste na utilização de modelos matemáticos para especificar numericamente a informação de uma cor. Faz parte da Ciência da Cor e lida com aspectos relacionados tanto à medição de uma cor, como a funções de ajuste de cor (*color matches functions*), segundo as quais “estímulos visuais com as mesmas especificações, sob as mesmas condições, vistos por um observador normal, são semelhantes e estímulos semelhantes possuem as mesmas especificações” [11].

O fenômeno de cor é o resultado da interação entre uma fonte de iluminação, um objeto e um observador. A natureza da radiação que atinge o observador (cor) é determinada pelas características físicas da fonte de iluminação e do objeto. Estes três elementos podem ser combinados através dos dados espectrais do objeto, funções de observação¹ e pelos iluminantes², de maneira que sejam definidos valores numéricos que traduzam a maneira como o sistema visual humano responde a uma determinada cor [13].

¹ Diversos experimentos do CIE avaliaram a resposta de um olho humano médio normal a cada comprimento de onda de luz. Uma vez que existem três tipos de sensores de cores no olho, existem também três tipos de funções de observação que compõem o que é conhecido pelo observador padrão [33].

Neste capítulo, será analisada a combinação destes três elementos para a formação de uma cor.

2.1 Representação da Cor

A representação de uma cor pode ser feita de acordo com diversos sistemas, que são escolhidos de maneira a atender às peculiaridades de cada aplicação. Representar cores em um determinado sistema significa reduzir o espaço espectral de cor para um sistema de coordenadas de dimensão finita [11].

A seguir, serão apresentados alguns sistemas de cores importantes para o entendimento deste trabalho.

2.1.1 Sistema Padrão CIE-RGB

Em 1931, a CIE - *Commission Internationale de L'eclairage* - organização internacional responsável pela padronização nas áreas relacionadas à iluminação - criou o sistema padrão CIE-RGB [11]. Baseado nas propriedades dos foto-receptores existentes no olho humano, sensíveis a radiações eletro-magnéticas nas frequências baixa, média e alta, o CIE-RGB define uma cor em função de três componentes primárias: vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*). A Figura 2.1 representa o sólido de cores do CIE-RGB.

² Iluminante: simulação de uma fonte de luz. Tecnicamente, é uma representação matemática de uma fonte de luz real. [33]

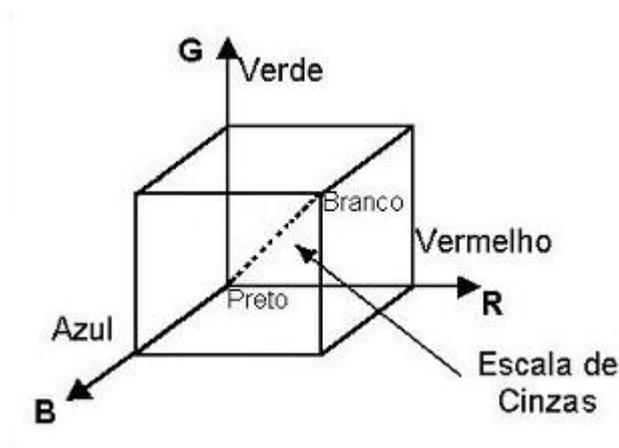


Figura 2.1 Cubo RGB

Neste sólido, valores de R (*Red*), G (*Green*) e B (*Blue*) iguais a zero compõem a cor preta, e valores máximos de R, G e B representam a cor branca. A diagonal principal do cubo corresponde à escala de cinzas (iguais quantidades de R, G e B) e as demais cores são formadas por combinações destas componentes.

Este sistema é bastante utilizado por câmeras digitais e monitores de vídeo, bem como na computação gráfica, pela sua simplicidade, facilidade de implementação e por requerer uma computação mínima. No entanto, possui algumas desvantagens e limitações, entre elas [2] [11]:

- Suas coordenadas não são transferíveis entre diferentes dispositivos, ou seja, os mesmos valores de R, G e B não reproduzem exatamente a mesma cor em diferentes dispositivos;
- Não é um sistema perceptivelmente linear, ou seja, a variação de uma unidade em uma coordenada corresponde a diferentes variações perceptíveis da cor, dependendo da região do cubo;
- Não é um sistema facilmente relacionado com a aparência da cor, uma vez que não se baseia em estímulos visuais;
- Nem todas as cores do espectro podem ser representadas de acordo com este sistema.

2.1.2 Sistema Padrão CIE – XYZ

Criado pela CIE com o objetivo de superar algumas limitações do CIE-RGB, o sistema padrão CIE-XYZ define uma cor em função de três componentes primárias virtuais: X, Y e Z, de acordo com a equação [14]:

$$CI = xX + yY + zZ$$

Sendo:

CI - a cor que se quer definir

x , y e z - as quantidades das primárias padrão necessárias para descrever uma cor espectral.

X, Y e Z – componentes primárias virtuais

Composto a partir de cores imaginárias definidas matematicamente, este sistema possui componentes sempre positivas e permite a caracterização de qualquer cor. No entanto, deve-se observar que as cores do sistema CIE-XYZ não são fisicamente realizáveis. Elas podem ser obtidas a partir das grandezas colorimétricas do CIE-RGB, através de uma mudança de base em um espaço vetorial. A Figura 2.2 apresenta um Diagrama de Cromaticidade do CIE. Como a utilização deste sistema padrão não constitui o foco deste trabalho, considera-se dispensável uma abordagem mais profunda desse tema.

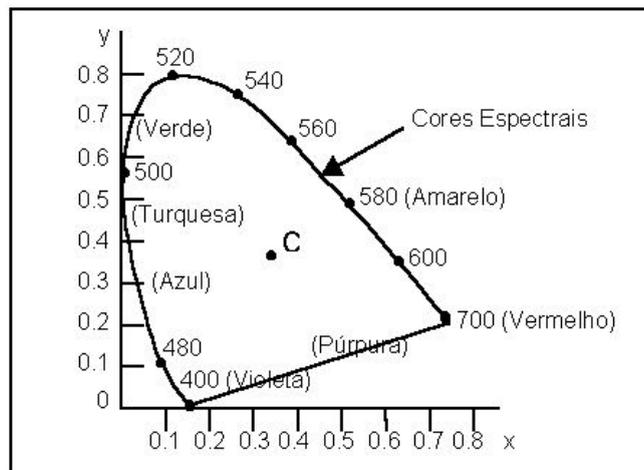


Figura 2.2 Diagrama de cromaticidade do CIE [14]

2.1.3 Sistema HSI

Outro sistema de cores que será utilizado neste trabalho é o HSI. Baseado na percepção visual da cor pelo olho humano, o sistema HSI define uma cor pelas características de Matiz (do inglês, *Hue*), Saturação e Intensidade. A matiz corresponde ao comprimento de onda dominante de uma cor, a saturação está relacionada à pureza da cor (ou seja, o quanto de branco esta cor possui) e a intensidade representa a quantidade de luz presente em uma cor (ou seja, quanto mais luz, maior a intensidade). Pode ser representado graficamente de acordo com a Figura 2.3. No sólido de cores HSI, cortes horizontais resultam em triângulos, cujos vértices representam as cores primárias R, G e B. No centro, tem-se a combinação destas três cores em iguais proporções. De acordo com a altura em que foi feito o corte, esta combinação estará mais próxima do preto ou do branco [2].

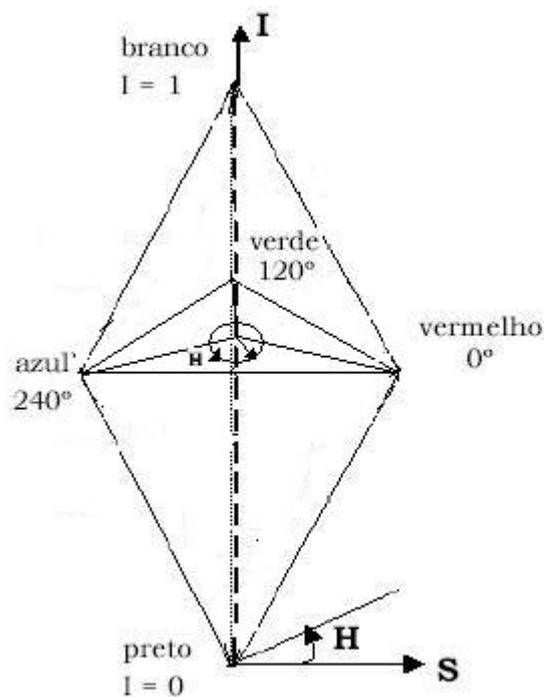


Figura 2.3 Sólido de cor HSI

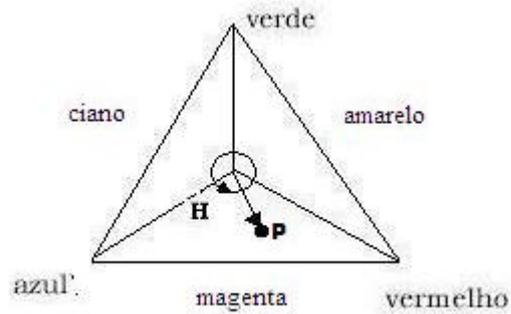


Figura 2.4 Corte horizontal no sólido HSI

O sistema HSI é formado a partir do RGB, sendo apenas uma transformação matemática do mesmo, e pode ser plenamente reversível de acordo com as equações:

$$H = \begin{cases} \mathbf{d} & \text{se } B \leq G \\ 360^\circ - \mathbf{d} & \text{se } B > G \end{cases}$$

$$\mathbf{d} = \arccos \frac{(R-G) + (R-B)}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-B) \cdot (G-B)}}$$

$$S = 1 - \frac{3 \cdot \min \{R, G, B\}}{R + G + B}$$

$$I = \frac{R + G + B}{3}$$

Isto significa dizer que as cores são as mesmas nestes dois sistemas, não havendo perdas no processo de conversão. Este é, portanto, um sistema ideal para processamento de imagens científicas coloridas usando informações de matiz, saturação e brilho da imagem.

A sua utilização é bastante comum em sistemas de visão artificial que se baseiam

no modelo de percepção de cor pelo olho humano, nos quais a discriminação de uma cor é feita de acordo com os aspectos visuais que ela apresenta, como para controle da qualidade de frutas ou tintas [2].

2.2 Equipamentos e Métodos de Medição

Existem diversos equipamentos e métodos de medição utilizados na colorimetria, que são escolhidos em função de sua aplicação. Estes equipamentos permitem que sejam medidas as informações de cor de um objeto ou fonte de iluminação, sem que seja necessária a presença de um observador humano. Dentre os mais utilizados, temos:

- Espectrofotômetros: utilizados para se medirem os valores da radiação refletida por um objeto colorido por faixas de comprimento de onda ao longo do espectro visível da luz. Para cada faixa selecionada, os valores da radiação da luz refletida são divididos pelos valores da radiação da iluminação utilizada, que possui características conhecidas. Em seguida, os valores de tristimulus (X, Y e Z) e as coordenadas de cromaticidade³ são calculados através de funções de ajuste de cor [15].

Os valores medidos por um espectrofotômetro podem ser analisados graficamente, através da curva espectral do objeto.

- Espectroradiômetros: assim como os espectrofotômetros, medem o espectro emitido por uma fonte. A diferença entre os dois sistemas é que o último inclui todo o espectro de radiação óptica, e não apenas a faixa visível de luz. Um sistema espectroradiométrico pode fornecer as seguintes informações a respeito de uma fonte de luz [15]:

³ Avaliação de cromaticidade é feita para identificar a cor de uma fonte de luz, tipicamente expressada pelas coordenadas (x,y) sobre um gráfico de Cromaticidade Padrão CIE.

- valores de tristimulus e cromaticidade.
- índice de representação da cor (CRI)⁴.
- temperatura de cor⁵.

- Colorímetros visuais: são dispositivos que se baseiam no ajuste de cor. Nestes sistemas, parte do campo é ocupada pelo objeto a ser medido e parte é formada por uma superfície branca. O objeto a ser medido é iluminado por uma fonte de luz branca com características bem conhecidas e a superfície branca, por três fontes de iluminação (tipicamente R, G e B – vermelho, verde e azul). A luminância⁶ destas três fontes é regulada, até que se obtenha um bom ajuste entre a referência e o objeto a ser medido. A utilização deste tipo de dispositivo não é simples e exige bastante habilidade e experiência por parte do operador [15].

- “Fotocolorímetros de Tristimulus”: os sistemas baseados neste princípio utilizam três diferentes filtros de cor e funcionam de maneira similar ao modelo de percepção de cor pelo olho humano. Este tipo de sistema apresenta algumas limitações, tais como o fato de que nem todas as cores podem ser medidas por este princípio, além de sua incapacidade de detectar a ocorrência de metamerismo⁷ entre duas amostras. São exemplos de “Fotocolorímetros de Tristimulus” os scanners e as câmeras digitais [15].

Neste trabalho, serão utilizadas câmeras fotográficas digitais para medir a cor de um objeto.

⁴ sistema internacional utilizado para avaliar a capacidade da lâmpada na representação das cores dos objetos. Quanto mais alto o CRI (numa escala de 0 a 100), melhor aparecem as cores.

⁵ “A temperatura da cor está diretamente relacionada à temperatura física do filamento nas lâmpadas incandescentes, de forma que a escala de temperatura Kelvin (absoluta) é utilizada para descrever a temperatura da cor”.

⁶ Luminância – Intensidade luminosa de uma superfície em uma dada direção por unidade de área projetada.

⁷ Fenômeno segundo o qual duas cores aparentam ser iguais em uma ou mais condições, mas aparentam diferentes quando estas condições são modificadas. [33]

2.3 Medição de cor utilizando câmera digital

As câmeras digitais podem ser fotográficas ou de vídeo e possuem a vantagem de fornecer informações a respeito da textura do objeto, além da cor. São indicadas, portanto, quando esta característica é importante, como na área têxtil e em algumas aplicações biomédicas.

2.3.1 Formação de Imagem Digital

Em uma câmera digital, a captura da imagem é feita por um sensor (que pode ser do tipo CCD – *Charge-Coupled-Device* ou CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [17] [20]. Os sensores são feitos de material semicondutor, fotossensível, subdivididos em pequenas regiões chamadas *pixels* (*picture element*). Quando a luz refletida pela imagem incide no sensor, cada *pixel* é carregado eletricamente e emite um sinal elétrico proporcional à intensidade da iluminação.

Os sensores do tipo CMOS são mais recentes no mercado e possuem as seguintes vantagens em relação aos CCDs [20]:

- Maior sensibilidade à iluminação.
- Redução de ruído eletrônico.
- Aquisição de imagens mais rapidamente.
- Menor consumo de energia.

Permitem a inclusão de circuitos de controle, conversores analógico/digital, memórias digitais e circuitos com funções específicas para processamento de imagens na pastilha semicondutora do sensor.

Os sensores das câmeras não distinguem cores. Para capturar imagens coloridas, o sensor (CCD ou CMOS) utiliza filtros de cores dispostos na frente dos *pixels* do sensor,

distinguindo o vermelho, o verde e o azul. Um exemplo deste tipo de filtro é o chamado Mosaico de Bayer (Figura 2.5), que se baseia no sistema visual humano e possui 25% de *pixels* que respondem ao vermelho, 25% ao azul e 50% ao verde. Desta forma, um *pixel* captura apenas a informação de cor referente a uma das componentes (R, G ou B). As informações das outras componentes são adquiridas por interpolação com os *pixels* vizinhos. Isto gera um erro considerável na quantificação das cores pelas câmeras com um sensor. Há ainda outras perdas de resolução de cor nos sensores, uma vez que objetos pretos irão refletir pouca luz. Para que haja uma referência de preto para a imagem, as margens do Mosaico são pretas. A câmera utilizada neste trabalho possui apenas um sensor, do tipo CCD.

Existem também as câmeras que possuem três sensores (CCDs ou CMOS), um para a captura de cada componente R, G e B. Nesta configuração, a luz que entra na câmera é dividida em três feixes e é, então, direcionada para cada sensor, cada qual com um filtro de cor (vermelho, verde ou azul) disposto em sua frente. Este método tem sido bastante utilizado, uma vez que podem ser selecionados filtros que simulem bem a característica de resposta do olho humano à luz. Entre as vantagens deste tipo de arranjo podem ser citadas: simplicidade de processamento de sinal, reprodução de cor com alta fidelidade, alta resolução de cor, além de dispensarem os algoritmos de interpolação requeridos pelas câmeras de apenas um sensor. No entanto, quando contrastadas com as câmeras de apenas um sensor, as câmeras de três sensores são mais caras, maiores e possuem sensibilidade mais baixa, uma vez que o sinal de luz necessita ser dividido entre os sensores [20].

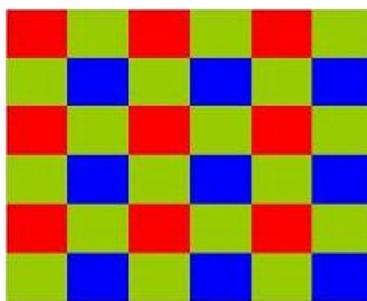


Figura 2.5 Exemplo de agrupamento de filtros coloridos para câmeras digitais com um sensor do tipo CCD

2.3.2 Características importantes das câmeras digitais

Sensibilidade: os fabricantes de câmeras digitais relacionam este parâmetro como a mínima intensidade de iluminação necessária para se obter uma imagem com qualidade satisfatória. Quanto maior a sensibilidade da câmera, menor a intensidade de luz requerida. Esta característica é importante para o sistema GlucoIris, uma vez que está diretamente relacionada ao conforto da pessoa cuja coloração da íris será medida.

Resolução de cor e resolução espacial: A qualidade de uma imagem é descrita pela resolução espacial e pela resolução de cor da imagem.

A resolução espacial de uma imagem indica o número de *pixels* usados para representar uma certa dimensão da imagem; quanto mais *pixels*, melhor a resolução espacial da imagem. Assim, a resolução espacial está mais diretamente ligada ao tamanho do *pixel* do que ao número de *pixels* do CCD. Uma imagem composta por n linhas e m colunas possui resolução espacial de $m \times n$.

A resolução de cor diz respeito ao número de bits utilizados para codificar a intensidade de cada componente de cor da imagem. Para uma resolução de cor de n bits, cada componente de cor pode assumir 2^n valores diferentes. Existem câmeras com resolução de cor de 8, 10, 12 ou 16 bits por cor. A câmera utilizada neste trabalho possui resolução de 8 bits por cor. Isto significa dizer que cada componente de cor, associada a cada *pixel*, pode assumir 256 diferentes valores, que variam de 0 a 255.

Ajustes manuais: para que se possa minimizar as distorções de cores pelo sistema, é necessário que a câmera possibilite ao usuário fazer ajustes manuais de funções como: balanço de branco, foco, zoom, tempo de exposição, velocidade de abertura do obturador. Muitas câmeras digitais automáticas são dotadas de algoritmos que medem indiretamente a temperatura de cor da iluminação, e das condições da cena, e fazem ajustes que tentam “corrigir” as cores da imagem, tentando evitar que imagens com cores distorcidas sejam obtidas. Os ajustes automáticos das câmeras não são

benéficos quando se pretende medir cores. Além de piorarem a repetitividade das medições, geram distorções não bem determinadas de cores e que escapam ao controle do usuário.

2.4 Processamento digital de imagens

Após a aquisição, a imagem é armazenada na memória da câmera e, em seguida, transferida para o computador para que seja processada e para que seus dados sejam analisados. Uma imagem colorida é numericamente representada por uma matriz de *pixels*, cada qual com três componentes de cor. Quanto maior a resolução da imagem, maior o seu tamanho na memória. No caso de uma câmera de resolução 2160 X 1440 (em *pixels*) e 8 bits por cor, cada *pixel* pode assumir 256 valores diferentes para cada componente R, G e B, perfazendo um total de 9000 kbytes (9 Mb) na memória. De maneira a facilitar a manipulação desta grande quantidade de informações, são freqüentemente utilizados métodos de compressão de imagens.

2.4.1 Compressão

A compressão de imagens é um processo que consiste na obtenção de um código mais compacto que preserve as informações essenciais da imagem original. Tal procedimento é feito com base na remoção de informações que sejam redundantes.

Existem dois tipos de compressão de imagens: aquele que preserva toda a informação original da imagem (*técnicas de compressão sem perdas*), e aquele que acarreta uma perda de informação considerada tolerável (*técnicas de compressão com perdas*)[20].

Os métodos com perdas são caracterizados pela eliminação de alguns detalhes que poderão ou não ser visualmente notados na imagem. Eles possibilitam alcançar

maiores taxas de compressão (da ordem de até 100:1), a depender da tolerância à distorção a ser gerada. São considerados irreversíveis, pois não permitem a recuperação exata dos dados da imagem original.

As técnicas de compressão de imagem podem adotar padrões de compressão. No caso de imagens estáticas, um padrão comum é o JPEG (*Join Photographic Experts Group*). Criado em 1991 por um comitê formado pela ISO – *International Organization for Standardization*, ITU-I - *International Telecommunication Union* e IEC – *International Electrotechnical Commission*, este padrão permite comprimir imagens coloridas ou monocromáticas com até 65536 X 65536 *pixels*. Apesar de permitir a compressão sem perdas, o JPEG é amplamente utilizado na compressão com perdas.

Dentre os métodos sem perdas podem ser citados: Código de *Huffman*, RLE (*Run Length Encoding*), LZW (*Lempel-Ziv & Welch*)[20]. Foge ao interesse deste trabalho detalhar o funcionamento dos diversos métodos.

2.4.2 Formatos de arquivos

A tabela a seguir apresenta alguns formatos de arquivos e seus respectivos métodos de compressão [20] [25] .

Tabela 2.1 Formatos de arquivos e seus respectivos métodos de compressão

Formato do arquivo	Método de Compressão
TIFF	RLE, LZW, Outros ou sem compressão
JPEG ⁸	JPEG
BMP	RLE ou sem compressão
RAW	Sem compressão

⁸ Formalmente, o JPEG é um padrão de compressão, não um formato de arquivo. Na prática, no entanto, costuma-se chamar JPEG os arquivos, em formato JFIF, que utilizam este padrão.

Por não envolver perdas na sua compactação, o formato TIFF – *Tagged Image File Format* - é bastante recomendado para utilização em colorimetria [20]. No entanto, por ocupar muito espaço na memória da câmera, permite apenas a aquisição de poucas imagens, o que dificulta a sua utilização.

Os arquivos com extensão JPEG, criados a partir de um padrão de mesmo nome, permitem gravar imagens de boa qualidade, apesar das perdas envolvidas. A câmera utilizada neste trabalho armazena internamente suas imagens em arquivos neste formato. Para a manipulação das imagens, é aconselhável que sejam convertidas para um formato que contenha mais informações (como TIFF ou BMP). Deve-se ressaltar que sucessivas conversões entre formatos levam a perdas acumulativas.

Os arquivos com extensão BMP podem ser comprimidos pelo método RLE (sem perdas) ou não sofrer compressão. Neste trabalho, as imagens adquiridas pela câmera (em formato JPEG) foram convertidas para BMP e, então, analisadas.

O formato RAW (do inglês, *cru* ou *bruto*) apresenta as informações da imagem no estado em que foram capturadas pelo sensor, sem que tenha havido processamento pela câmera. Para fins de medição, portanto, este seria o formato mais indicado, por preservar os dados da imagem original. No entanto, a câmera utilizada neste estudo não trabalha com este tipo de formato. No Capítulo 4 será feita uma avaliação da utilização dos diversos tipos de arquivo.

2.5 Padrões e referências de cor

Com o objetivo de corrigir as distorções de cores provocadas pelo sistema, em função de variações nas condições de iluminação, ajustes da câmera, quantificação de cores pelo sensor, processamento de imagens, etc, bem como calibrá-los, é necessário utilizar referências de cor.

Os padrões e referências utilizados em colorimetria podem ser brancos ou coloridos, dependendo da aplicação.

2.5.1 Padrões Brancos

Em 1986, o CIE definiu teoricamente o branco ideal como sendo aquele que difunde a luz perfeitamente e tem refletância⁹ igual a um para todos os comprimentos de onda do espectro visível. Na prática, foram propostos alguns padrões de trabalho brancos, como o óxido de magnésio e o sulfato de bário.

Referências brancas são utilizadas na medição de cor por métodos visuais, conforme exposto na Seção 2.2, bem como na calibração de monitores, câmeras, scanners e impressoras. Deve-se ter em mente o fato de que a cor da iluminação utilizada tem grande influência no processo.

Neste trabalho, uma das metodologias a serem testadas corrige as distorções de cores do sistema, tomando como referência uma região branca da imagem (*white patch*).

2.5.2 Padrões Coloridos

Existem também padrões coloridos utilizados na calibração de monitores, *scanners*, impressoras e câmeras. Elaborados em forma de mosaico com cores conhecidas, esses padrões permitem a comparação e análise das diferenças de reprodução de cores pelos dispositivos. Esta comparação pode ser feita tanto visualmente, como pela utilização de instrumentos colorimétricos. Eles devem ser elaborados em material que não seja facilmente modificado pela incidência de luz com o tempo.

⁹ Fração da radiação do fluxo incidente sobre uma superfície que é refletida.

Um destes padrões existentes no mercado é o chamado *Macbeth Color Checker*[®]. Muito utilizado nas áreas de fotografia, artes gráficas, publicações eletrônicas e televisão, o *Macbeth Color Checker*[®] é um cartão que contém uma matriz de 24 cores diferentes, incluindo tons de cinza, cores primárias de diferentes sistemas (vermelho, verde, azul, magenta, amarelo e ciano), e cores naturais (que simulam a cor da pele humana, o azul do céu, folhagem, etc.).

Existem outros padrões de cores no mercado, usados em áreas específicas, como publicações eletrônicas (*RGB Hex Triplet Color Chart*), impressões (*Pantone*), etc.

Neste trabalho, serão utilizadas referências coloridas de diversas cores e referências que possuam apenas as cores predominantes na imagem a ser fotografada.

Capítulo 3

Aprimoramento do Sistema de Medição de Cores

Com o intuito de avaliar o desempenho dos módulos de aquisição e processamento de imagens do GucoIris quanto à medição de cores, foram realizados alguns testes, que apontaram variações excessivas na quantificação de cores pelo sistema. Estas variações são causadas principalmente pelas instabilidades do sistema de iluminação utilizado e pelas variações intrínsecas da própria câmera fotográfica digital.

No primeiro teste, foi avaliada a estabilidade do sistema de iluminação, usando como referência um medidor de potência óptica. O procedimento consistiu em aguardar 20 minutos, a partir do momento em que a lâmpada era acesa (tempo estimado para a estabilização do sistema), e adquirir valores de potência luminosa da lâmpada a cada 5 minutos, durante uma hora. Os resultados deste teste estão apresentados na Figura 3.1. Variações na intensidade de luz da ordem de 13% foram encontradas.

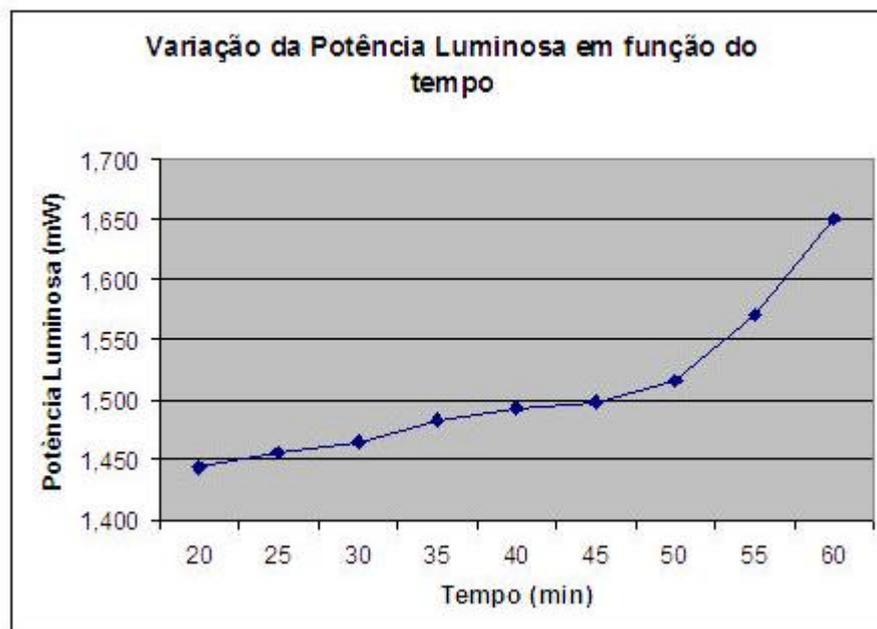


Figura 3.1 Variação da Potência Luminosa em função do tempo

Outro teste realizado teve como objetivo avaliar a repetitividade da quantificação de cores pelo sistema. O procedimento consistiu na aquisição de quatro imagens de uma figura colorida (Figura 3.2), a cada cinco minutos, durante uma hora. Em seguida, a média das componentes R, G e B de cada região (vermelha, verde e azul) de cada grupo de quatro imagens foi medida pelo sistema de aquisição e processamento de imagens do GlucoIris. A Figura 3.3 mostra o comportamento apresentado pela componente B da região azul da imagem, ao longo do tempo. O comportamento das demais regiões (verde e vermelho) e componentes de cor (R e G) se mostrou semelhante ao apresentado no gráfico. Deve-se ter em vista que as variações de cores detectadas neste ensaio podem decorrer tanto das variações do sistema de iluminação, como de instabilidades da câmera. Variações da ordem de até 6,15 pontos absolutos no nível da cor foram encontradas nas componentes.



Figura 3.2 Imagem utilizada na avaliação da repetitividade da quantificação de cores pelo Sistema GlucoIris

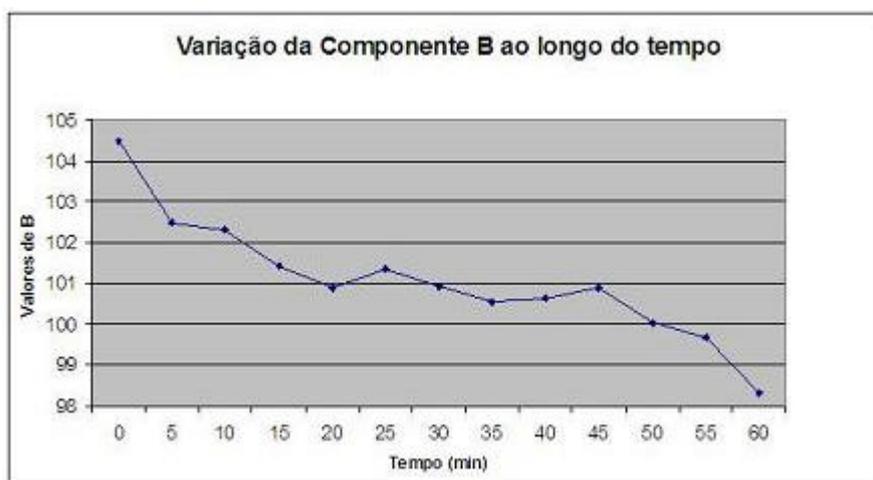


Figura 3.3 Avaliação da repetitividade da quantificação de cores pelo Sistema GlucoIris. Resultados apresentados pela componente R da região vermelha da imagem

Além disso, testes anteriores [9] demonstraram que influências de iluminação externa, variações no posicionamento relativo entre o olho do usuário e a câmera (tais como distância e posicionamento em relação ao CCD) também levam a erros na quantificação de cores da íris pelo GlucoIris.

As variações encontradas foram classificadas como muito elevadas considerando o nível típico de variação das cores da íris em função da glicemia, que é da ordem de cerca de 8 pontos absolutos no nível da componente de cor. Esta limitação motivou o desenvolvimento e a implementação de estratégias e programas de computador para corrigir as variações excessivas das cores. Desta forma, os erros provocados pelo sistema

são reduzidos, de modo que as variações de cores decorrentes de fatores fisiológicos do indivíduo (níveis de glicemia, enfermidades dos olhos, uso de medicamentos, entre outros) se sobressaíam.

3.1 Sistema utilizado para processamento das imagens

3.1.1 Imagens a fotografar

Para desenvolvimento da metodologia, foram idealizados três tipos de figuras a serem fotografadas: (a) um mosaico de diversos tons de azul com as bordas coloridas contendo escalas de vermelhos, verdes, azuis e cinzas, (b) o mesmo mosaico com uma borda multicolorida e (c) o mesmo mosaico com uma borda azul, que continha os mesmos tons e tons diferentes da figura central (Figura 3.4). Em todos os casos a borda de referência possui uma região branca.

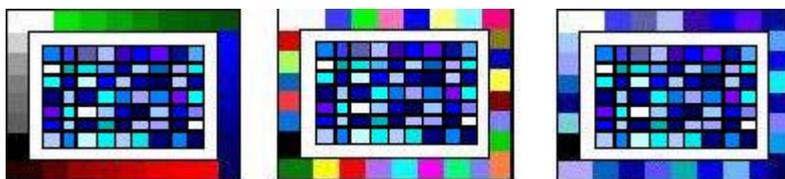


Figura 3.4 Tipos de mosaicos de cores elaborados para avaliação da metodologia

As razões para a escolha destas configurações se tornarão mais claras na próxima Seção.

3.2 Técnicas e Algoritmos utilizados para Correção das cores

Neste trabalho, foram desenvolvidas, implementadas e testadas cinco diferentes metodologias de correção das distorções de cores em imagens digitais.

São propostos três modelos de transformações lineares entre as componentes de cores adquiridas pelo sistema, e dois outros modelos que se baseiam nos algoritmos tradicionais de balanço de branco utilizados pelas câmeras digitais.

3.2.1 Transformações lineares

a) Modelo de 3 Constantes

O primeiro modelo de transformação linear propõe que a correção seja feita por meio da utilização de uma constante multiplicativa distinta para cada coordenada de cor. A correção é feita, então, de acordo com as equações:

$$\begin{aligned} r_c &= k_r \cdot r \\ g_c &= k_g \cdot g \\ b_c &= k_b \cdot b \end{aligned} \tag{3.1}$$

Sendo:

k_r, k_g, k_b = fatores de correção para as componentes r, g e b respectivamente

r, g, b = valores de R, G e B da imagem original

r_c, g_c, b_c = valores corrigidos de R, G e B

O mesmo modelo será utilizado para o caso de uma imagem representada no sistema de cores HSI. Serão calculados os fatores de correção para cada componente de cor (H, S e I), com base nas Equações 3.1.

Para determinar os valores das respectivas constantes multiplicativas, considere duas imagens de um mesmo mosaico, fotografado em seqüência. Adote uma das imagens como a “imagem de referência” e a outra como “imagem a corrigir”. Associe um número seqüencial a cada uma das “n” células do mosaico.

Se, por exemplo, a componente vermelha média de cada uma das células do mosaico for adquirida para cada uma das imagens, dois conjuntos estarão disponíveis: “ r_i ” para a imagem de referência e “ r_{ci} ” para a imagem a corrigir. Idealmente o valor de “ k_r ” deveria ser escolhido de forma a satisfazer a primeira das Equações 3.1 para todos os “ n ” pontos, isto é:

$$\begin{cases} r_{c1} = r_1 \cdot k_r \\ r_{c2} = r_2 \cdot k_r \\ \vdots \\ r_{cn} = r_n \cdot k_r \end{cases} \quad (3.2)$$

Entretanto, como “ k_r ” só pode assumir um único valor, nem todas as Equações 3.2 podem ser satisfeitas ao mesmo tempo. Assim, encontra-se uma solução aplicando o método dos mínimos quadrados.

Na forma matricial, a Equação 3.2 pode ser reescrita como:

$$\begin{Bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{Bmatrix} \{k_r\} = \begin{Bmatrix} r_{c1} \\ r_{c2} \\ \vdots \\ r_{cn} \end{Bmatrix}$$

Ou, pela notação abreviada,

$$\{r\} \{k_r\} = \{r_c\}$$

Cuja solução, pelo método dos mínimos quadrados, é:

$$\{r\}^T \{r\} \{k_r\} = \{r\}^T \{r_c\}$$

O que leva ao valor da constante “ k_r ” como:

$$\{k_r\} = \left(\{r\}^T \{r\} \right)^{-1} \{r\}^T \{r_c\} \quad (3.3)$$

Estas operações são repetidas para o cálculo dos fatores de correção das demais componentes (k_g e k_b).

A correção é feita multiplicando os fatores assim calculados pelas respectivas componentes de cor de cada *pixel* da imagem a corrigir. Os valores resultantes para cada *pixel* compõem a imagem corrigida.

b) Modelo de Seis Constantes

Um outro modelo propõe que a correção das cores seja feita pela utilização de uma constante multiplicativa e outra aditiva para cada componente de cor. A correção é feita, então, da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} r_c &= k_{0r} + k_{1r} \cdot r & (3.4) \\ g_c &= k_{0g} + k_{1g} \cdot g \\ b_c &= k_{0b} + k_{1b} \cdot b \end{aligned}$$

Sendo:

r_c, g_c, b_c = valores corrigidos de R, G e B

$k_{0r}, k_{1r}, k_{0g}, k_{1g}, k_{0b}, k_{1b}$ = fatores de correção para cada componente de cor

r, g, b = valores de R, G e B da imagem a corrigir

Considere, também aqui, a componente vermelha e a mesma numeração seqüencial para cada elemento do mosaico. O cálculo das constantes para este método é feito da seguinte maneira:

Reescrevendo a Equação 3.4 para todos os *pixels*, temos:

$$\begin{cases} r_{c1} = k_{0r} + k_{1r} \cdot r_1 \\ r_{c2} = k_{0r} + k_{1r} \cdot r_2 \\ \vdots \\ r_{cn} = k_{0r} + k_{1r} \cdot r_n \end{cases}$$

Na forma matricial, podemos escrever o sistema como sendo:

$$\begin{Bmatrix} r_{c1} \\ r_{c2} \\ \vdots \\ r_{cn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 \\ 1 & r_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & r_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} k_{0r} \\ k_{1r} \end{Bmatrix}$$

Ou, pela notação abreviada,

$$[r] \{k\} = \{r_c\}$$

Resolvendo pelo Método dos Mínimos Quadrados,

$$[r]^T [r] \{k\} = [r]^T \{r_c\}$$

Então,

$$\{k\} = ([r]^T [r])^{-1} [r]^T \{r_c\}$$

$$\text{Sendo } \{k\} = \begin{Bmatrix} k_{0r} \\ k_{1r} \end{Bmatrix}$$

Assim como para o modelo das 3 constantes, as operações descritas acima são repetidas de maneira a calcular os fatores de correção para as demais componentes (k_{0g} , k_{1g} , k_{0b} , k_{1b}). Uma vez calculados, estes fatores são aplicados às respectivas componentes de cor de todos os *pixels* da imagem a ser corrigida, ou, eventualmente, a uma região da imagem que se queira corrigir.

Também este modelo será testado para o caso da imagem representada segundo o sistema de cores HSI. Todas as considerações a respeito do cálculo dos fatores de correção no sistema RGB valem também para HSI.

c) Modelo de 12 Constantes

Um terceiro modelo de transformação linear proposto prevê que a variação de cada componente de cor é influenciada por todas as componentes de cor (R, G e B). Desta forma, utiliza as seguintes equações:

$$r_c = k_{0r} + k_{rr} \cdot r + k_{gr} \cdot g + k_{br} \cdot b \quad (3.5)$$

$$g_c = k_{0g} + k_{rg} \cdot r + k_{gg} \cdot g + k_{bg} \cdot b$$

$$b_c = k_{0b} + k_{rb} \cdot r + k_{gb} \cdot g + k_{bb} \cdot b$$

Sendo:

r_c, g_c, b_c = valores corrigidos de R, G e B

$k_{0r}, k_{rr}, k_{gr}, k_{br}$ = fatores de correção para R

$k_{0g}, k_{rg}, k_{gg}, k_{bg}$ = fatores de correção para G

$k_{0b}, k_{rb}, k_{gb}, k_{bb}$ = fatores de correção para B

r, g, b = valores de R, G e B da imagem original

Para o sistema HSI, as mesmas equações serão utilizadas no cálculo dos fatores de correção.

O cálculo das 12 constantes é efetuado pelo método dos mínimos quadrados. As mesmas considerações e simbologias dos casos anteriores são válidas. Reescrevendo o sistema na notação matricial para todos os “n” elementos do mosaico:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_1 & g_1 & b_1 \\ 1 & r_2 & g_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & r_n & g_n & b_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{0r} & k_{0g} & k_{0b} \\ k_{rr} & k_{rg} & k_{rb} \\ k_{gr} & k_{gg} & k_{gb} \\ k_{br} & k_{bg} & k_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{c1} & g_{c1} & b_{c1} \\ r_{c2} & g_{c2} & b_{c2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{cn} & g_{cn} & b_{cn} \end{bmatrix}$$

Ou seja, pela notação abreviada:

$$[r \ g \ b][k] = [r \ g \ b_c]$$

Pelo Método dos Mínimos Quadrados,

$$[r \ g \ b]^T [r \ g \ b] [k] = [r \ g \ b]^T [r \ g \ b_c]$$

Então,

$$[k] = ([r \ g \ b]^T [r \ g \ b])^{-1} [r \ g \ b]^T [r \ g \ b_c]$$

Uma vez calculados, os fatores de correção são aplicados a todos os *pixels* da imagem a corrigir, ou, eventualmente, às regiões que se queiram corrigir.

3.2.2 Conversão entre Sistemas de Cores

Conforme exposto no Capítulo 2, os valores das componentes de cor H, S e I de uma imagem são obtidos a partir dos valores de R, G e B determinados pela câmera digital. Os modelos de transformação linear propostos serão testados para ambos os sistemas de representação de cor (RGB e HSI). Para estes Modelos, serão testados dois caminhos:

- Valores das componentes medidos e corrigidos pelas transformações lineares propostas em um dado sistema de cor (RGB ou HSI);
- Valores convertidos a partir dos valores corrigidos pelo outro sistema de cor (Conversão de RGB para HSI após a correção e vice-versa).

A Figura 3.5 apresenta esta proposta.

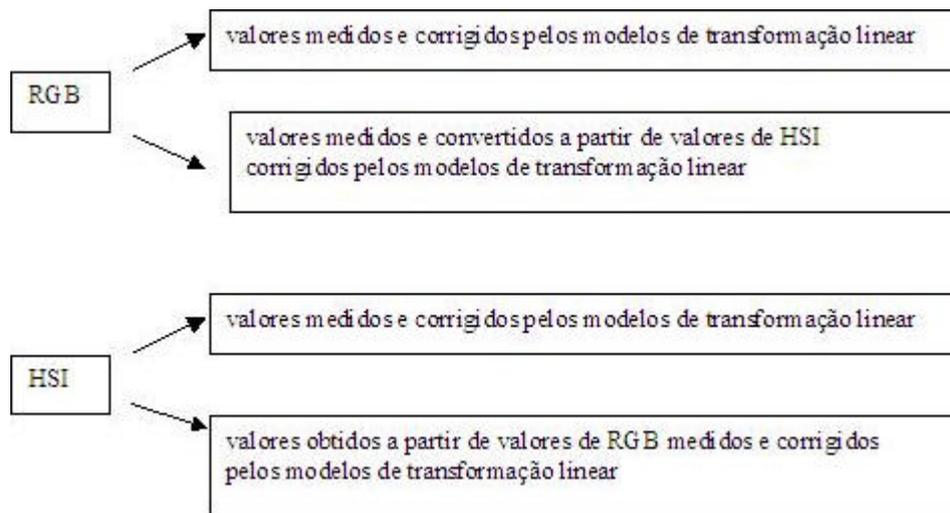


Figura 3.5 Caminhos para comparação entre resultados obtidos pela correção em um determinado sistema ou conversão entre sistemas de cor

Estes dois caminhos terão seus resultados comparados, de maneira a se determinar aquele que leva às menores incertezas.

3.2.3 Correção pelo Branco

Outro modelo de correção sugerido baseia-se nos algoritmos clássicos existentes nas câmeras digitais para realização do balanço de branco da imagem [36] [38]. Uma maneira de realizar esta operação é através da utilização de uma região branca de referência da imagem. A câmera mede os valores médios de R, G e B desta região. Se esta é uma região branca, estes valores médios deveriam ser iguais. São calculados os fatores de correção multiplicativos para cada componente de cor, de forma que valores médios iguais para R, G e B sejam obtidos na região branca. Os cálculos são efetuados de acordo com as equações:

$$k_r = \frac{\overline{R + G + B}}{\overline{R}}$$

$$k_g = \frac{\overline{R + G + B}}{\frac{3}{G}}$$

$$k_b = \frac{\overline{R + G + B}}{\frac{3}{B}}$$

Sendo:

k_r , k_g , k_b = fatores multiplicativos de correção para as componentes R, G e B respectivamente

\overline{R} , \overline{G} , \overline{B} = valores médios de R, G e B da região branca

Assim como nos outros modelos, estes fatores são, então, aplicados a todos os *pixels* da imagem, de maneira que sejam corrigidas as componentes RGB da imagem original.

Este modelo corrige as cores e preserva a intensidade original da imagem. No entanto, quando se pretende comparar cores, é interessante normalizar a intensidade da imagem, isto é, tornar todas as imagens comparadas com a mesma intensidade de referência, evitando que sejam comparadas imagens mais ou menos escuras que outras.

De maneira a normalizar os valores de intensidade, propõe-se implementar uma modificação no modelo de Correção pelo Branco com a utilização de um valor de Intensidade de referência.

a) Utilizando Intensidade de Referência

Segundo este modelo, a correção é feita de acordo com as equações:

$$k_r = \frac{I_{ref}}{R}$$

$$k_g = \frac{I_{ref}}{G}$$

$$k_b = \frac{I_{ref}}{\bar{B}}$$

Sendo:

k_r, k_g, k_b = fatores de correção para cada componente

I_{ref} = Intensidade de referência

$\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ = valores médios de R, G e B da região branca

O valor de intensidade de referência é estabelecido e fornecido ao programa pelo usuário, com base em um critério de comparação pré-estabelecido. Os valores de k_r, k_g, k_b são calculados e multiplicados às respectivas componentes de cada *pixel* da imagem, de maneira que a correção seja feita.

3.2.4 Programa de computador para processamento das imagens

Para o desenvolvimento da metodologia de correção de cores, foi utilizado um sistema de processamento de imagens descrito na seqüência.

O programa de computador utilizado é capaz de ler a imagem, extrair parâmetros de cor e aplicar algoritmos para correção das cores.

A imagem adquirida pela câmera é inicialmente convertida para o formato BMP. Em seguida, o programa lê a imagem, extrai os valores de R, G e B e calcula os valores de H, S e I.

Conforme exposto anteriormente, foram testados dois tipos de correção: um que utiliza uma referência branca na imagem, e outro que utiliza uma grade colorida com referência.

Na primeira técnica, o programa calcula a média dos valores de RGB e HSI de uma região branca (de 20 X 20 *pixels*) selecionada pelo usuário e, a partir dos parâmetros

calculados conforme descrito na Seção 3.2.3, faz a correção dos demais *pixels* da imagem.

Pela segunda técnica, o programa utiliza como referência a primeira de uma seqüência de imagens e calcula os valores médios de R, G e B. A partir da variação de cor medida entre a primeira imagem e imagens subseqüentes, pela utilização dos algoritmos apresentados na Seção 3.2.1, aplica os fatores de correção nos *pixels* da imagem a ser corrigida. Esta técnica permite que a correção seja feita para cada *pixel* da imagem, bem como para valores médios de RGB de regiões escolhidas.

3.3 Verificação do Programa de Computador

Com o objetivo de verificar o funcionamento do programa de computador e verificar a eficácia dos algoritmos propostos, foi feita a correção de uma imagem artificialmente distorcida, porém de forma controlada.

No primeiro caso, a imagem a corrigir e a imagem de referência eram iguais. Constantes multiplicativas iguais a um e aditivas iguais a zero eram esperadas. Como conseqüência, a imagem corrigida deve apresentar os mesmos valores da RGB da imagem original. Isto foi verificado e para todos os métodos de correção propostos.

Para a análise de imagens com alterações controladas de cor, foi utilizado um mosaico de cores semelhante ao da Seção 3.1.1. Esta imagem foi manipulada, de modo que fossem provocadas alterações nos valores de R, G e B, conforme exemplificado na Figura 3.6.

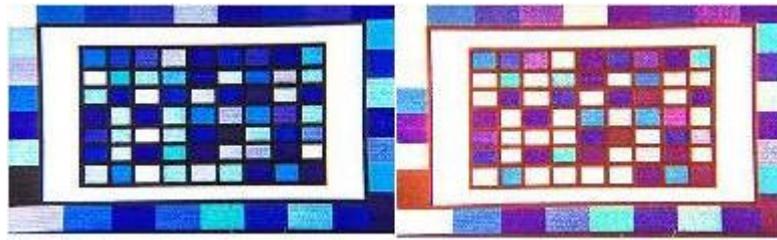


Figura 3.6 Mosaicos de cores original e manipulado artificialmente, utilizado na verificação do programa de computador

Em seguida, estas imagens foram processadas pelo programa através dos diferentes métodos de correção propostos. Os resultados obtidos com a correção pelo Modelo de 12 Constantes podem ser observados na Figura 3.7.

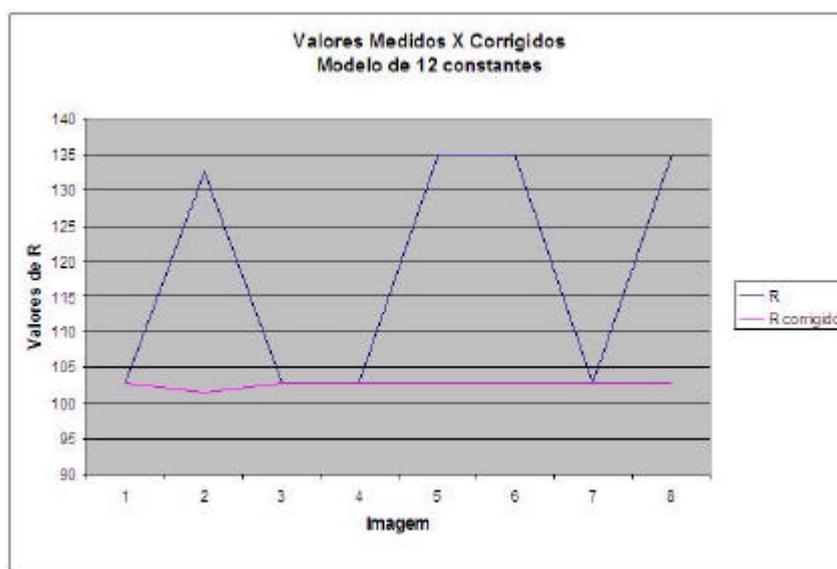


Figura 3.7 Resultados obtidos com a correção de imagens modificadas artificialmente (componente R, Modelo de 12 Constantes)

Pela análise destes resultados, pode-se concluir que, mesmo para alterações controladas e uniformes de uma imagem, a correção realizada pelo programa não é perfeita.

Visualmente, todos os métodos apresentam bons resultados (Figura 3.8).

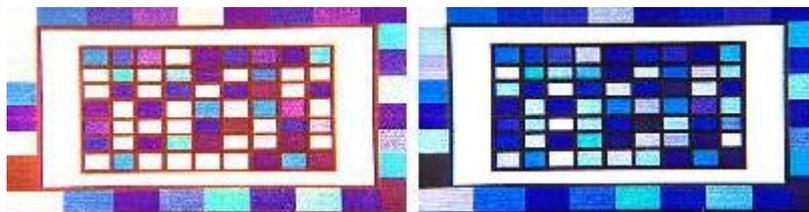


Figura 3.8 Imagem modificada artificialmente e corrigida pelo Modelos de 3 Constantes

Não se pode afirmar que as alterações de cor provocadas nas imagens sejam representativas das variações naturais. No entanto, para fins de avaliação da eficácia dos algoritmos propostos, estas alterações são consideradas suficientes. A análise de imagens reais, adquiridas pela câmera, será feita no Capítulo 4.

Capítulo 4

Avaliação da Metodologia Proposta

Com o objetivo de avaliar os diversos modelos de correção apresentados no Capítulo 3, bem como determinar as melhores condições de aquisição das imagens e os fatores que levam a maiores incertezas¹ no sistema, foram realizados testes em condições variadas de aquisição.

Os experimentos realizados envolveram uma avaliação da câmera digital utilizada no sistema, sua estabilidade na medição das cores ao longo do tempo, variações nas condições de iluminação e no posicionamento relativo entre a câmera e o objeto, bem como uma avaliação de influências externas ao sistema. Uma vez determinados os fatores que geram os maiores erros, estes podem ser trabalhados para otimizar o desempenho do sistema.

Para a realização dos testes, foi utilizada uma bancada de laboratório que será descrita a seguir.

¹ Incerteza de medição é o “parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando”[43].

4.1 Bancada para aquisição das imagens

A bancada para aquisição das imagens utiliza iluminação simétrica, composta por uma lâmpada de halogênio que, conduzida por uma fibra óptica, ilumina a imagem a ser fotografada (Figura 4.1). O sistema de iluminação conta com uma fonte de tensão estabilizada, e é protegido contra influências de iluminação externa.

Para aquisição das imagens, foi utilizada uma câmera fotográfica digital colorida KODAK DC4800, que possui apenas um sensor (do tipo CCD) e resulta em imagens com resolução espacial de 2160X 1440 *pixels*. A resolução de cor da câmera é de 8 bits – RGB, ou seja, cada componente é medida numa faixa de 0 a 255 do nível daquela cor.

A bancada permite um posicionamento relativo entre a câmera e a figura a ser fotografada para avaliação do sistema com boa repetitividade, bem como um deslocamento espacial da figura controlado (nos eixos X, Y e Z).

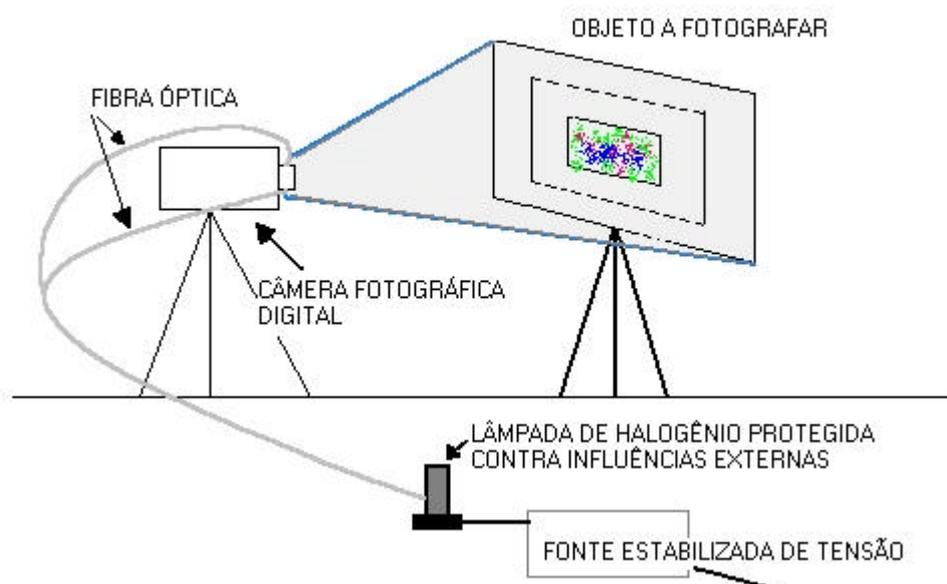


Figura 4.1 Bancada utilizada nos experimentos

A escolha das imagens da Seção 3.1.1 (Figura 3.4) permitiu avaliar qual a melhor referência de cor (tons de RGB, cores diversas ou tons parecidos com a imagem a ser corrigida). Testes indicaram que a melhor referência era aquela que mais se aproximava da cor predominante na imagem. Desta forma, nos testes realizados neste Capítulo, foram fotografados dois tipos de mosaico de cores (Figura 4.2): um predominantemente azul e outro multicolorido. Os mosaicos possuem duas regiões: a borda de referência e uma região multicolorida interna que deverá ser corrigida a partir das informações da borda. Em ambas as imagens, a região a ser corrigida (interna) repete alguns tons presentes na borda de referência e contém outros tons que são distintos da borda de referência. Para ambos os casos, a correção pelos diversos modelos desenvolvidos neste trabalho apresentou comportamento semelhante, o que indica que os algoritmos são eficazes tanto para a correção de imagens em que predomine apenas uma cor, como para imagens multicoloridas. Desta forma, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos apenas com o grupo de imagens do mosaico predominantemente azul.

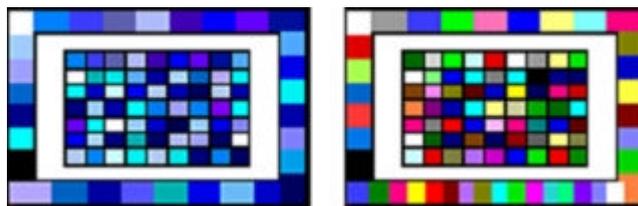


Figura 4.2 Mosaicos de Cores utilizados na avaliação dos modelos de correção propostos

4.2 Programa de Computador utilizado no processamento das imagens

Para análise dos resultados dos experimentos descritos na seqüência, foi utilizado um programa de computador que utiliza os modelos de correção descritos na Seção 3.2

Inicialmente o programa lê a primeira de uma seqüência de imagens, extrai os valores das componentes R, G, B, H, S e I da imagem e calcula as médias de cada componente sempre nas mesmas regiões selecionadas pelo usuário como referência e na

região da imagem a ser corrigida. Em seguida, realiza os mesmos cálculos para a imagem seguinte, determinando os fatores de correção (pelo modelo de correção selecionado pelo usuário), a partir das variações de cor detectadas entre as referências de imagens subsequentes. Uma vez determinados, estes fatores são aplicados às regiões da imagem a corrigir. Em seguida, são determinados os desvios padrão e a incerteza das mesmas regiões de cada conjunto de imagens, antes e após a correção.

4.3 Levantamento das Componentes de Incerteza

Para a realização dos ensaios, foram consideradas as incertezas decorrentes das seguintes fontes:

- Câmera fotográfica digital.
- Sistema de iluminação.
- Posicionamento relativo entre a câmera e o objeto.
- Programa de computador
- Influências externas ao sistema.

A Figura 4.3 apresenta as principais fontes de incerteza consideradas presentes na medição:

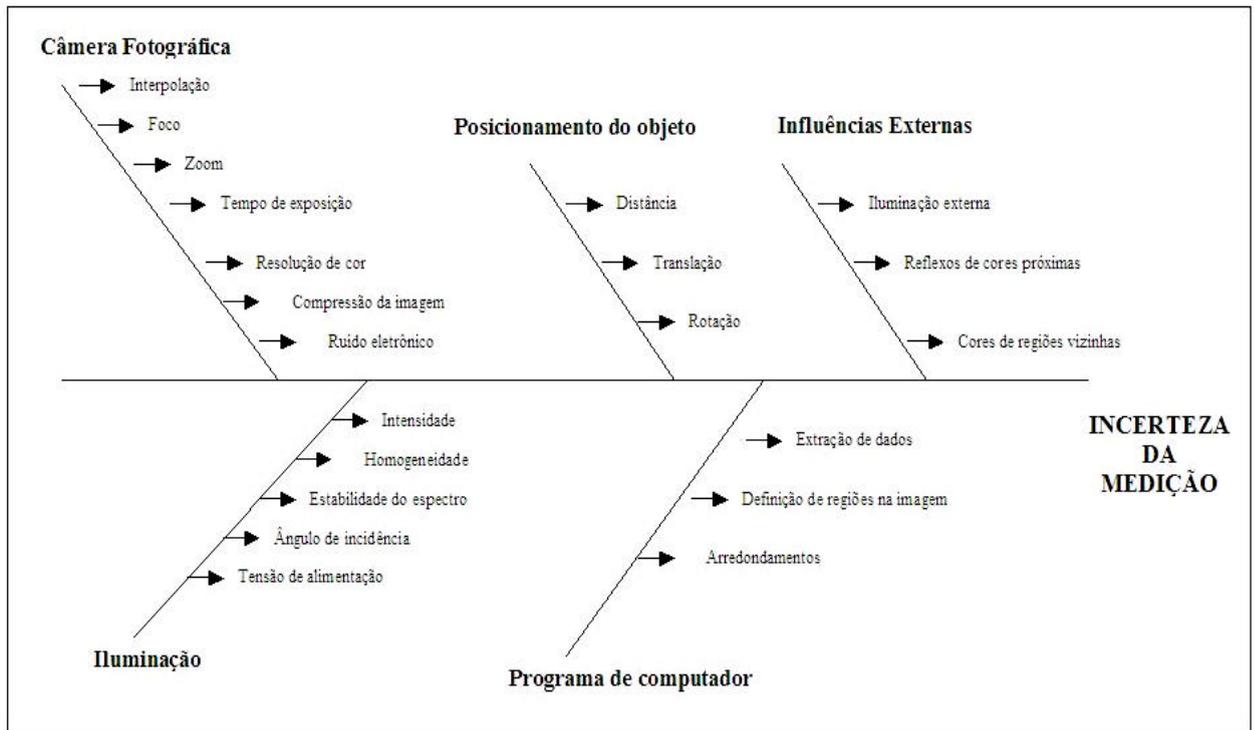


Figura 4.3 Fontes de incerteza da medição

A avaliação das incertezas em todos os ensaios foi feita por meio do levantamento da incerteza do Tipo A², segundo as equações:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

$$R_e = s \cdot t$$

Sendo:

s: desvio padrão experimental

² Método de avaliação da incerteza pela análise estatística de séries de observações [43] .

Re: Repetitividade³

n: número de amostras do ensaio

t: fator de *Student* para n amostras

Neste trabalho, foi utilizado um nível de confiança de 95 % de probabilidade.

Para o sistema GlucoIris, o valor exato da cor não é importante, mas a capacidade de repetir a medição da cor em diferentes momentos. Desta forma, neste trabalho não serão analisadas as componentes sistemáticas da incerteza.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos com a correção das componentes de cor das imagens pelos diferentes modelos propostos. Os resultados serão apresentados para diferentes tipos de avaliação: fontes de incerteza provenientes da câmera utilizada, sistema de iluminação, influências externas ao sistema, posicionamento relativo entre a câmera e o objeto, etc. Cabe ressaltar que as incertezas decorrentes do processamento das imagens estarão presentes em todas as avaliações.⁴

4.4 Avaliação da câmera digital

Com o objetivo de avaliar a câmera digital utilizada no sistema (KODAK DC 4800), bem como definir a melhor configuração da mesma (a ser utilizada nos testes seguintes), foi realizada uma série de experimentos descritos a seguir. Nestes testes, todas as demais condições de aquisição das imagens, como posicionamento entre câmera

³ A repetitividade do resultado de uma medição é o “grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição”[43]. Deve-se ressaltar que, neste trabalho, será utilizado o conceito “liberal” de repetitividade. Ou seja, as condições de repetitividade estabelecidas na teoria nem sempre serão rigorosamente satisfeitas.

⁴ Deve-se notar que o erro apresentado entre diferentes imagens é de natureza aleatória. No entanto, em uma mesma imagem, pode ser considerado sistemático (características “tempo” X “espaço”). Desta forma, a correção se constitui na aplicação de transformações lineares às coordenadas de cor e, como resultado, espera-se uma melhoria da repetitividade das imagens.

e objeto, condições de iluminação, isolamento de influências externas, foram mantidas constantes.

4.4.1 Compressão da Imagem

O primeiro experimento realizado com a KODAK DC 4800 visou a avaliar a influência do processo de compressão de imagens pela câmera. A câmera utilizada permite adquirir imagens e armazenar arquivos em diversos formatos, sem compressão e com diferentes níveis de compressão.

O procedimento consistiu em se adquirir 4 (quatro) imagens do mosaico em formato TIFF sem compressão, 4 (quatro) imagens em formato JPEG com compressão de 1:5 e 4 (quatro) imagens em formato JPEG com compressão de 1:10.

Deve-se ressaltar que, neste ensaio, não foram realizadas correções das componentes de cor, uma vez que a intenção é determinar a melhor qualidade da imagem no momento da aquisição. Assim, foi apenas avaliada a repetitividade para os valores de R, G, B, H, S e I medidos.

Os resultados deste ensaio podem ser vistos nos gráficos a seguir (Figura 4.4 e Figura 4.5).

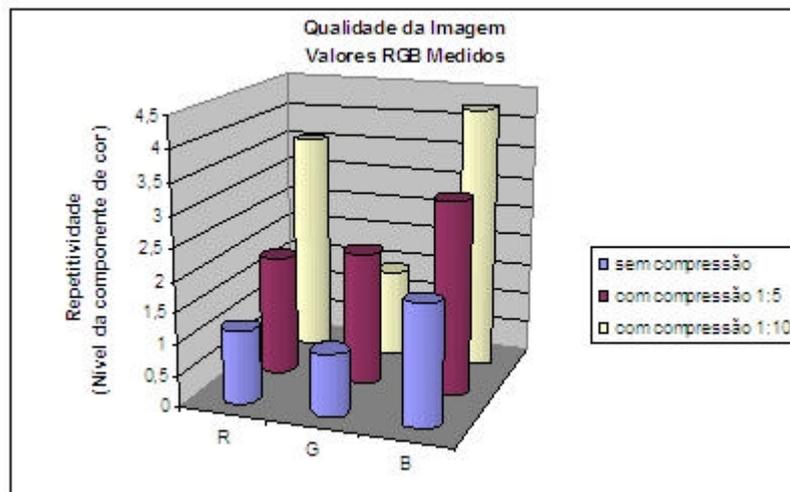


Figura 4.4 Valores de repetitividade para as componentes R, G e B. Avaliação da Qualidade da Imagem

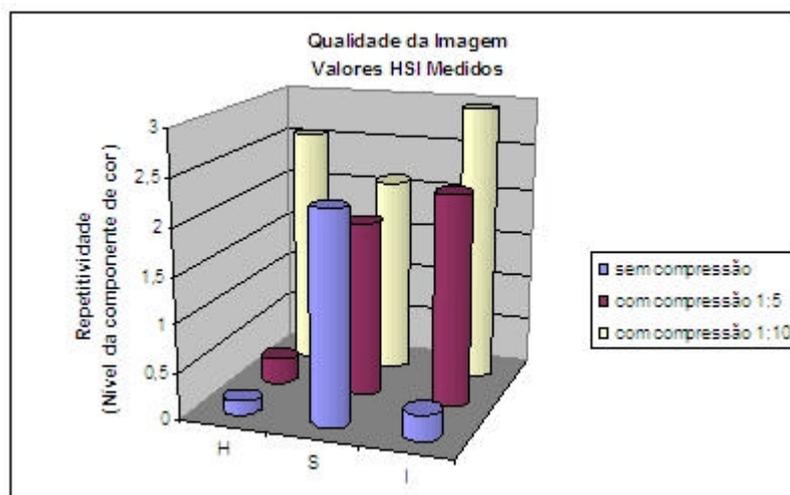


Figura 4.5 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I. Avaliação da Qualidade da Imagem

Do ponto de vista metrológico, a utilização de imagens sem compressão é a melhor alternativa. Entretanto, do ponto de vista operacional, a memória da máquina fotográfica digital só comportaria quatro imagens no formato TIFF sem compressão. Decidiu-se então utilizar o formato JPEG com compressão 1:5 em todos os testes seguintes, mesmo sabendo que há uma perda.

4.4.2 Balanço de Branco

Neste ensaio, foram adquiridas 6 (seis) imagens com ajuste de branco automático pela câmera e 6 (seis) com ajuste de branco manual. As imagens foram processadas e corrigidas pelos diferentes modelos propostos, conforme definido na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Legenda utilizada para os Modelos de Correção Propostos

Modelo de correção	Legenda
3 constantes	3 ctes
6 constantes	6 ctes
12 constantes	12 ctes
Balanço de branco sem intensidade de referência	wb sr $(I_{ref} = \frac{\overline{R} + \overline{G} + \overline{B}}{3})$
Balanço de branco com intensidade de referência igual a 240	wb 240 $(I_{ref} = 240)$

Os resultados apresentados nos gráficos a seguir correspondem à repetitividade da média das regiões corrigidas da imagem. Para o sistema RGB, são apresentados neste capítulo apenas os valores da componente R, uma vez que as demais componentes apresentam comportamento semelhante.

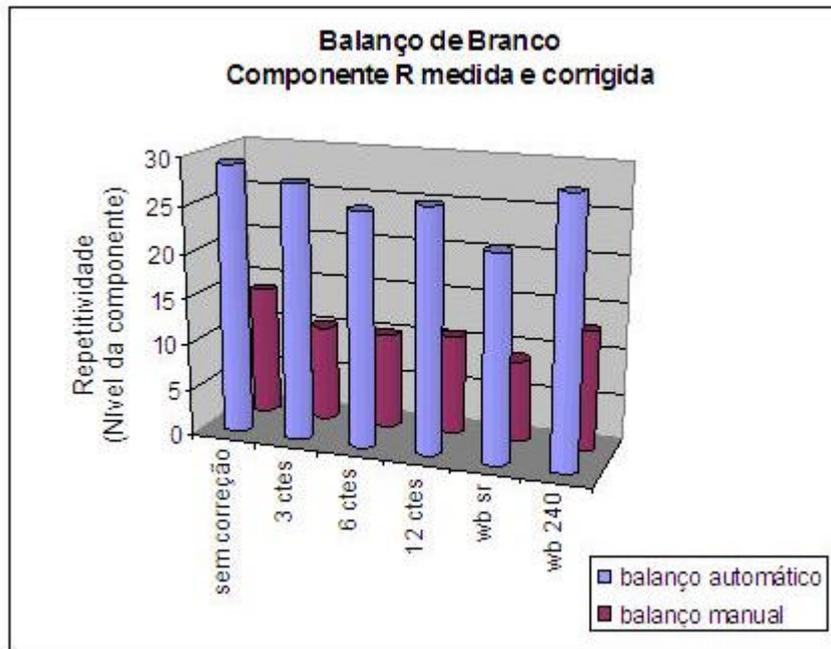


Figura 4.6 Valores de repetitividade para a componente R
Avaliação do Balção de Branco

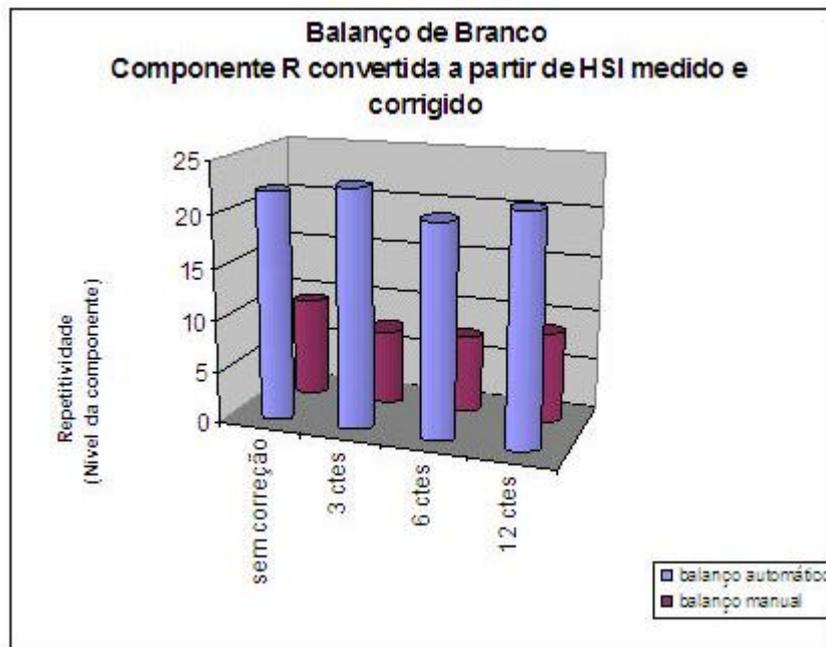


Figura 4.7 Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI)
Avaliação do Balção de Branco

Os gráficos da Figura 4.8 e da Figura 4.9 apresentam os valores de repetitividade

calculados para as componentes H, S e I, antes e após a correção pelos modelos propostos.

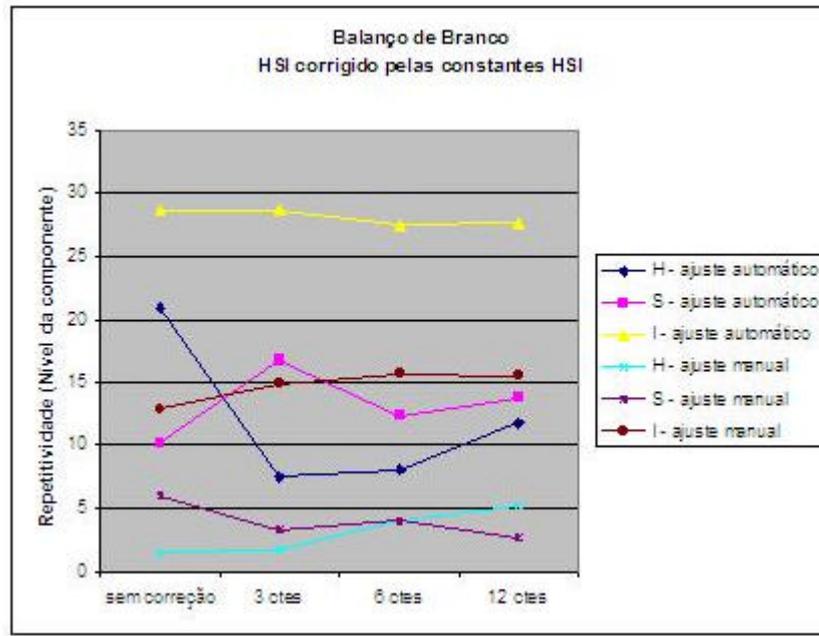


Figura 4.8 Repetitividade para as componentes H, S e I
Avaliação do Balanço de Branco

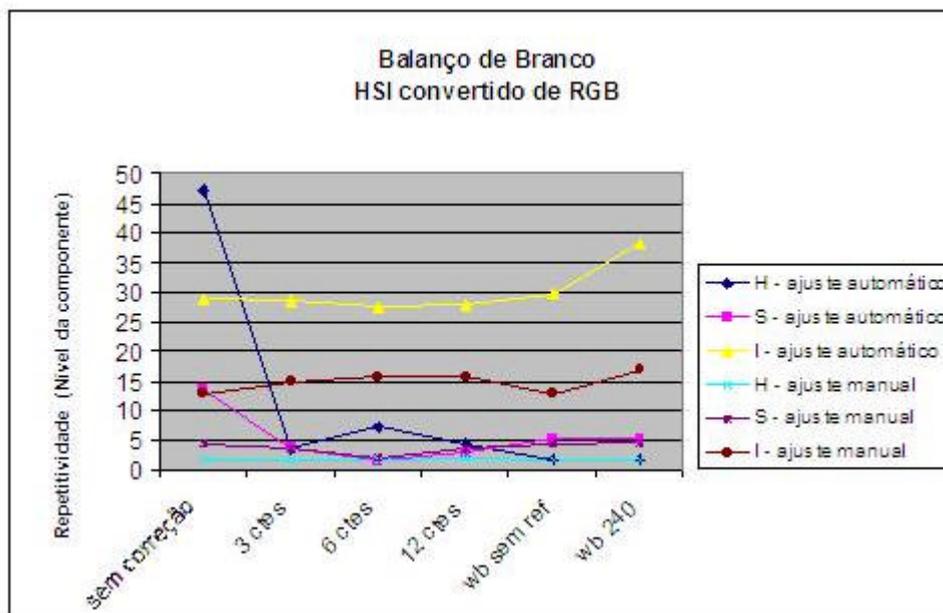


Figura 4.9 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB)
Avaliação do Balanço de Branco

Pela análise dos gráficos, pode-se notar que o balanço manual de branco resultou em menores erros.

Ao se comparar os resultados alcançados pelos valores obtidos através do cálculo e aplicação das constantes nos diferentes sistemas (RGB e HSI) com os valores obtidos a partir da conversão entre estes sistemas é possível chegar a algumas conclusões: A correção a partir de valores HSI das coordenadas de cores do sistema RGB apresenta melhores incertezas. Da mesma forma, os valores HSI adquiridos pela câmera e corrigidos pelos modelos propostos apresentam, aqui, melhores resultados.

Para este teste, os resultados obtidos pelos diferentes Modelos de Correção propostos apresentaram desempenho semelhante.

4.4.3 Modo de Cor

A câmera utilizada permite adquirir imagens no modo de cor neutro e no modo de cor saturado, em que se utilizam algoritmos para controlar tons e intensidades das cores, tornando-as mais vivas.

Para avaliação do modo de cor da câmera, foram adquiridas 6 (seis) imagens da figura no modo de cor saturado e 6 (seis) no modo neutro. Em seguida, as imagens foram processadas e a repetitividade foi calculada para cada conjunto. Nos gráficos das Figuras 4.10 a 4.13, estão apresentadas as repetitividades dos valores médios das componentes de cor da imagem, obtidos pela correção segundo os diferentes modelos propostos.

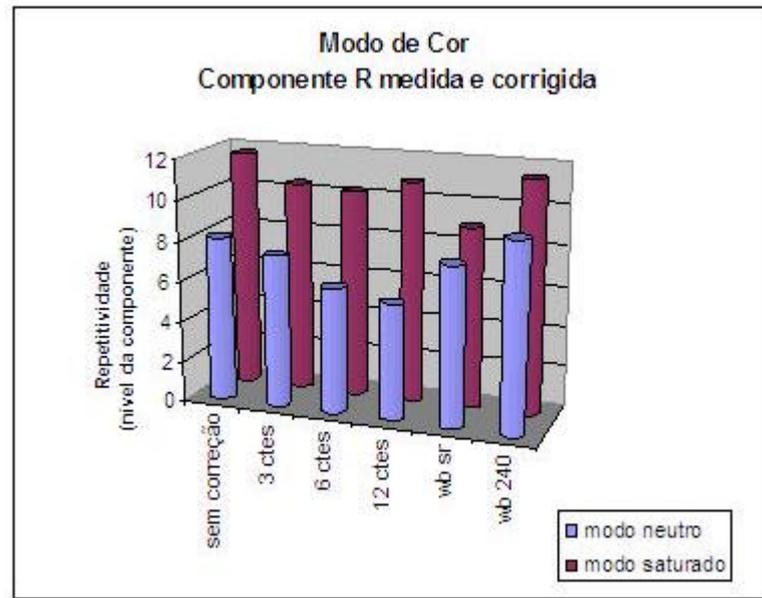


Figura 4.10 Valores de repetitividade para a componente R
Avaliação do Modo de Cor da Câmera

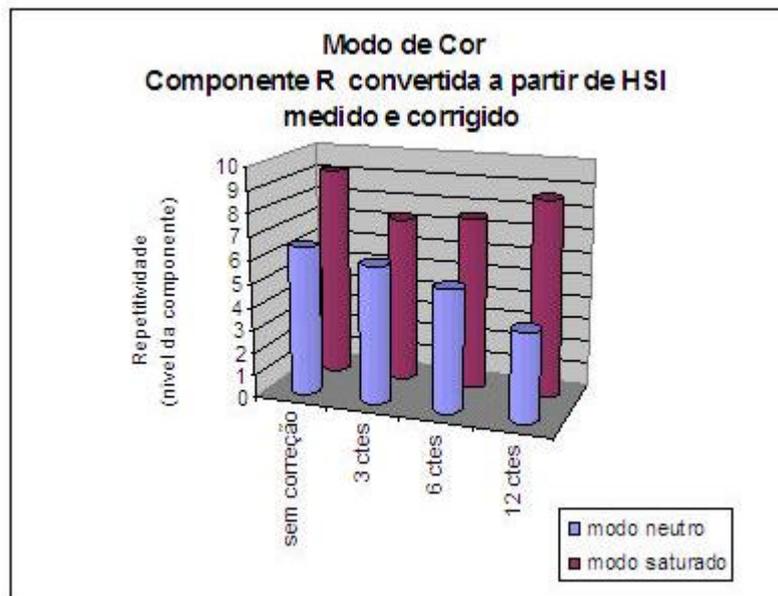


Figura 4.11 Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI)
Avaliação do Modo de Cor da Câmera

Para o sistema HSI, os valores de repetitividade estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.12 e 4.13:

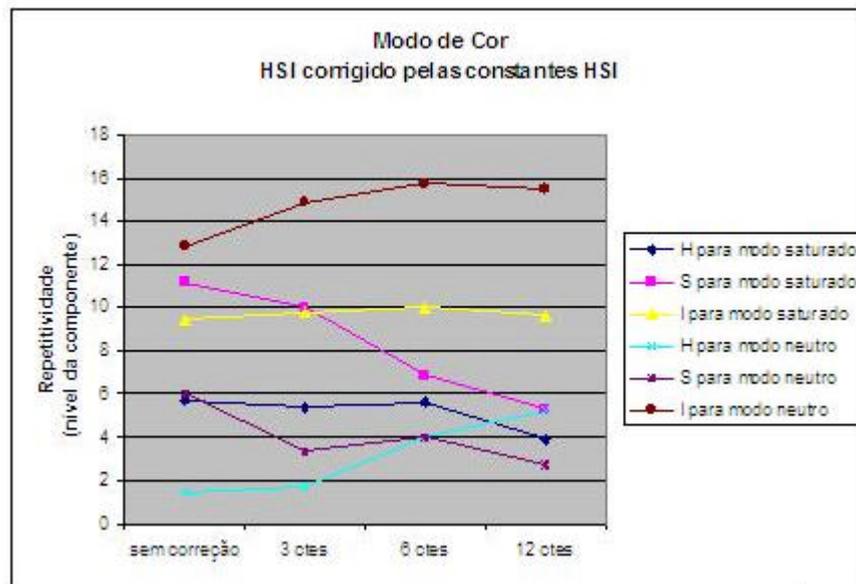


Figura 4.12 Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Modo de Cor da Câmera

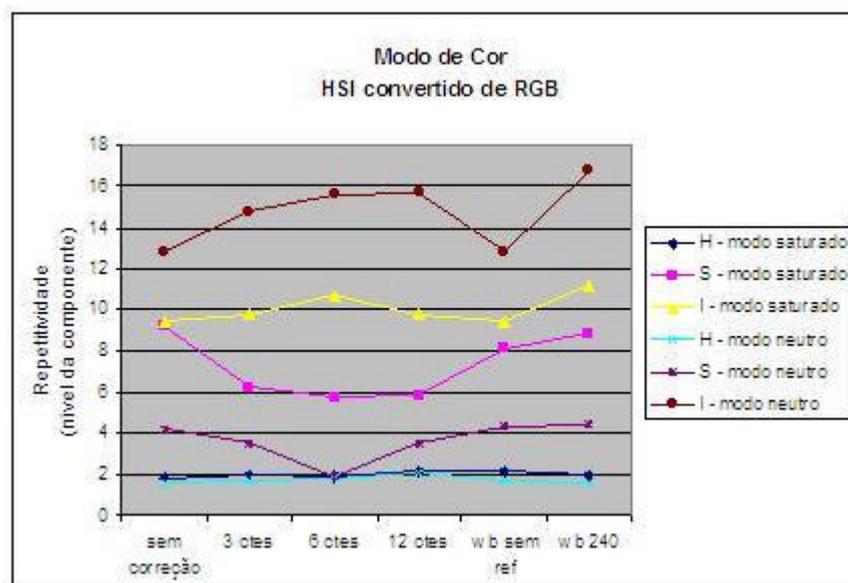


Figura 4.13 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Modo de Cor da Câmera

Pode-se observar que o modo de cor neutro apresenta menor dispersão que o saturado. Isto se deve ao fato de que, no modo neutro, não são feitos ajustes automáticos pela câmera.

Para o sistema RGB, os Modelos de 6 e 12 Constantes apresentam os melhores resultados, e a correção pelo Modelo do Balanço de Branco reduz muito pouco a repetitividade. No caso de se utilizar um valor arbitrário de intensidade de referência, a correção pode piorar os valores de repetitividade.

4.4.4 Tempo de exposição da câmera

O procedimento deste ensaio consistiu na aquisição de 6 (seis) imagens para cada valor de tempo de exposição selecionado: 1/45 segundos, 1/60 segundos e ajuste automático pela câmera. Cada conjunto de imagens foi processado e teve sua repetitividade calculada para cada modelo de correção. Os resultados encontrados estão apresentados no gráfico das Figuras 4.14 e 4.15.

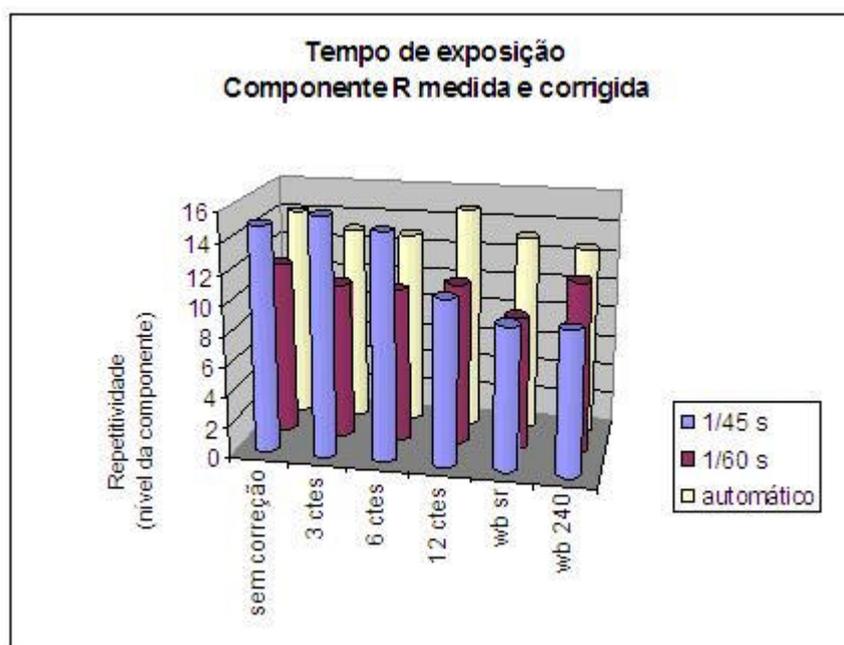


Figura 4.14 Valores de repetitividade para a componente R
Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera

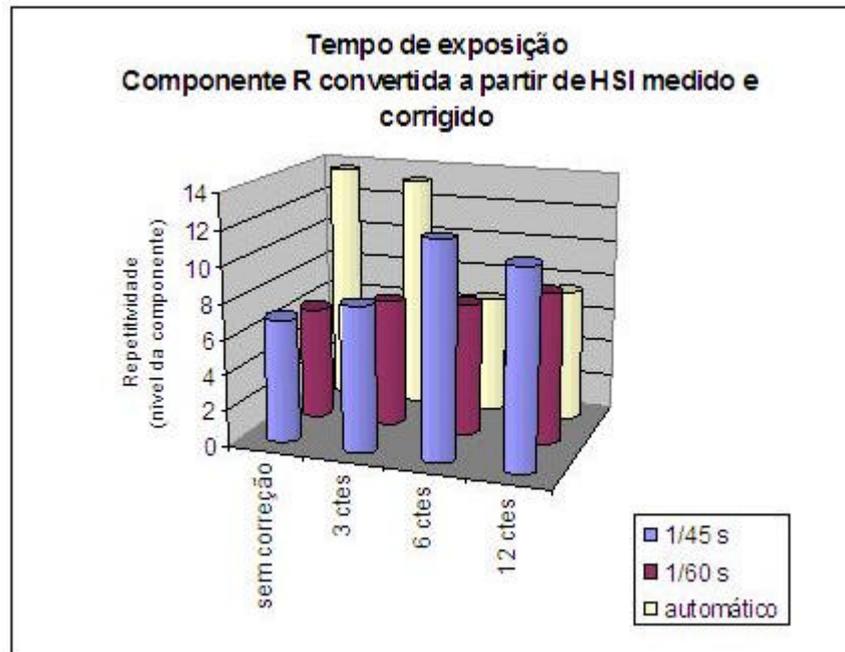


Figura 4.15 Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera

Para o sistema HSI, foram obtidos os seguintes resultados (Figuras 4.16 e 4.17):

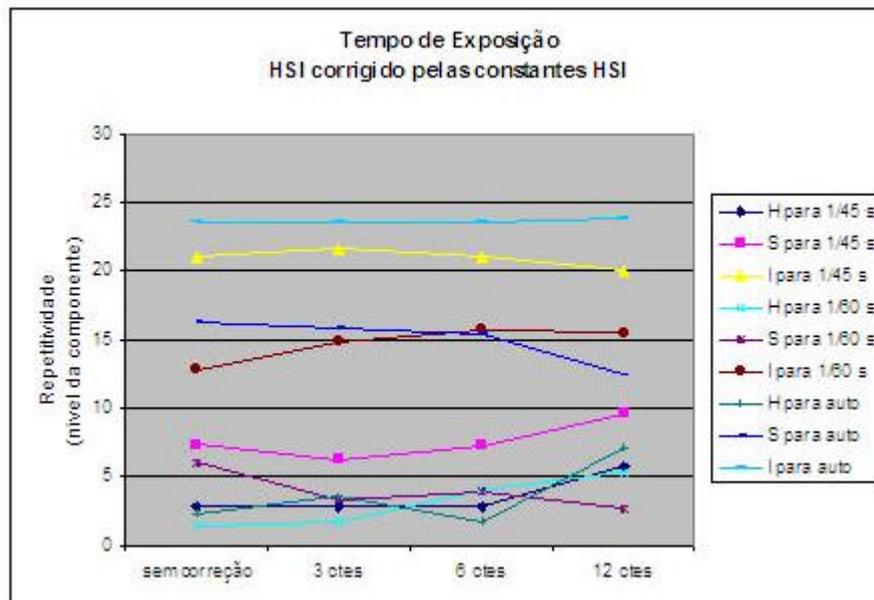


Figura 4.16 Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera

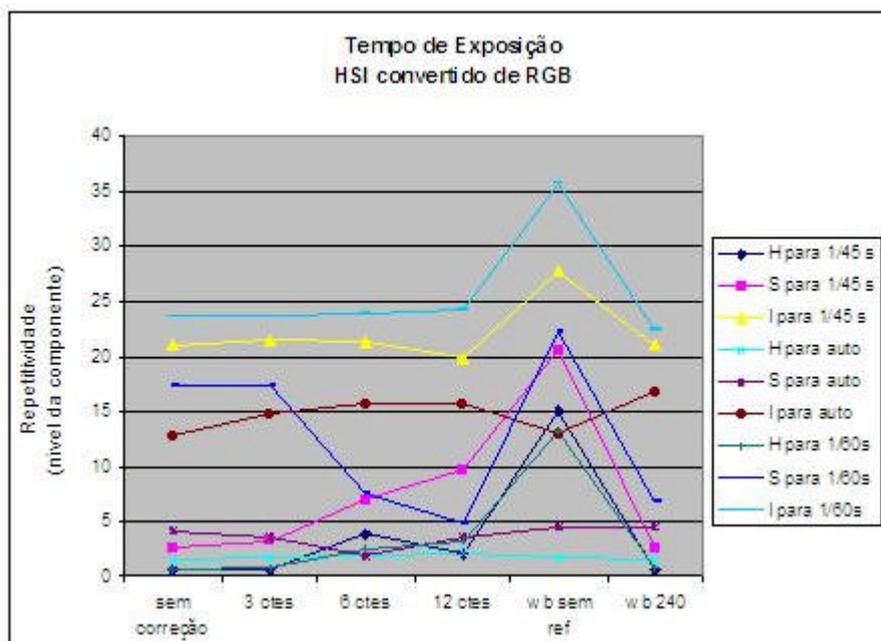


Figura 4.17 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Tempo de Exposição da Câmera

Os resultados indicam que o tempo de exposição de 1/60 s é o mais indicado para aquisição das imagens, pois apresenta a melhor repetitividade.

Pela análise dos gráficos anteriores, pode-se notar que, também para este teste, os valores de R, G e B obtidos a partir de conversões de H, S e I apresentam, em alguns casos, pioram a repetitividade.

Neste teste, para os valores de RGB, a correção apresentou os melhores resultados pelos Modelos de 12 Constantes e Balanço de Branco. Para o sistema HSI, as diferenças entre os resultados alcançados com as correções não foram significativas.

4.5 Avaliação do sistema de iluminação

Este experimento teve como objetivo avaliar a influência de variações na intensidade luminosa da lâmpada na medição de cores pelo sistema. O procedimento consistiu na aquisição de 10 (dez) imagens do mosaico, variando a tensão da fonte de alimentação linearmente entre 100 e 95% de seu valor nominal. Durante a execução do ensaio, todas as demais condições foram mantidas constantes.

Após o processamento das imagens e correção das cores pelos diferentes modelos, a repetitividade foi calculada e os resultados para cada componente estão apresentados nos gráficos seguintes (Figuras 4.18 a 4.21).

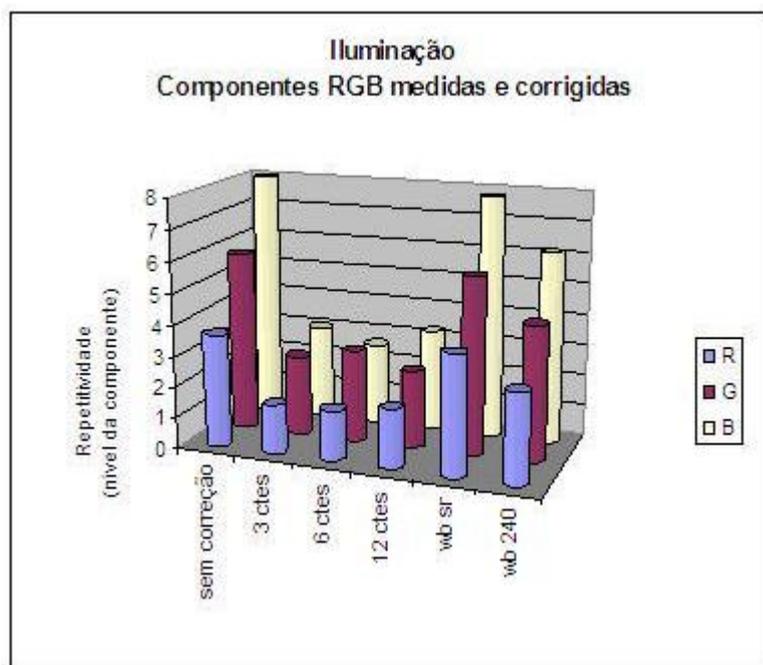


Figura 4.18 Valores de repetitividade para as componentes R, G e B
Avaliação do Sistema de Iluminação

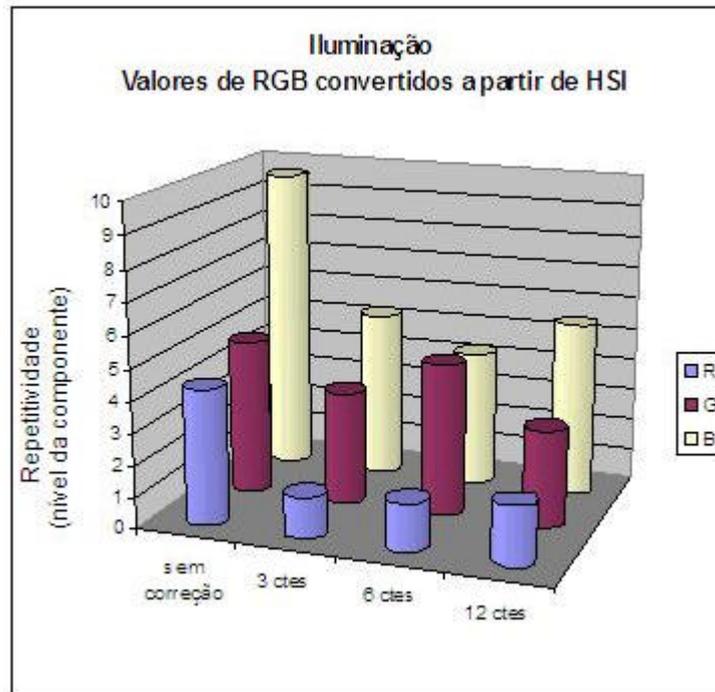


Figura 4.19 Repetitividade para as componentes R, G e B (valores obtidos a partir da conversão de HSI) Avaliação do Sistema de Iluminação

Para as coordenadas de cores em HSI, os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.20 e 4.21.

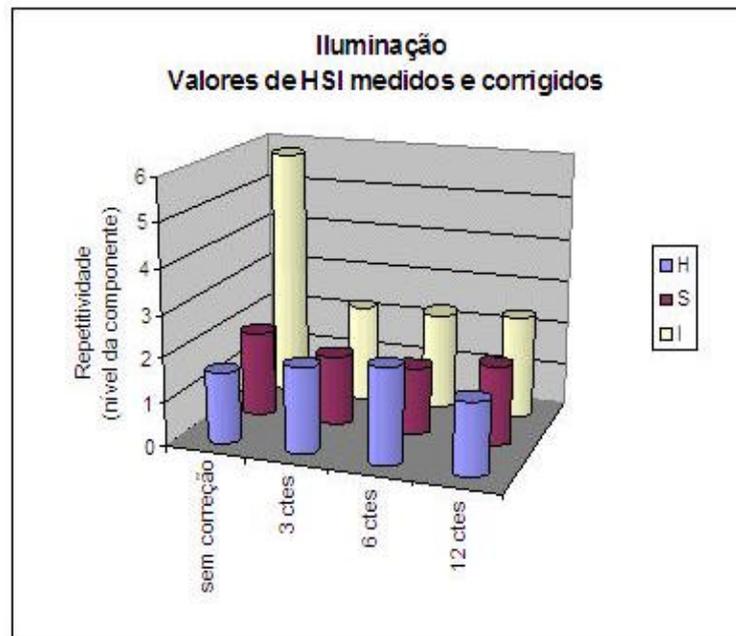


Figura 4.20 Repetitividade para as componentes H, S e I Avaliação do Sistema de Iluminação

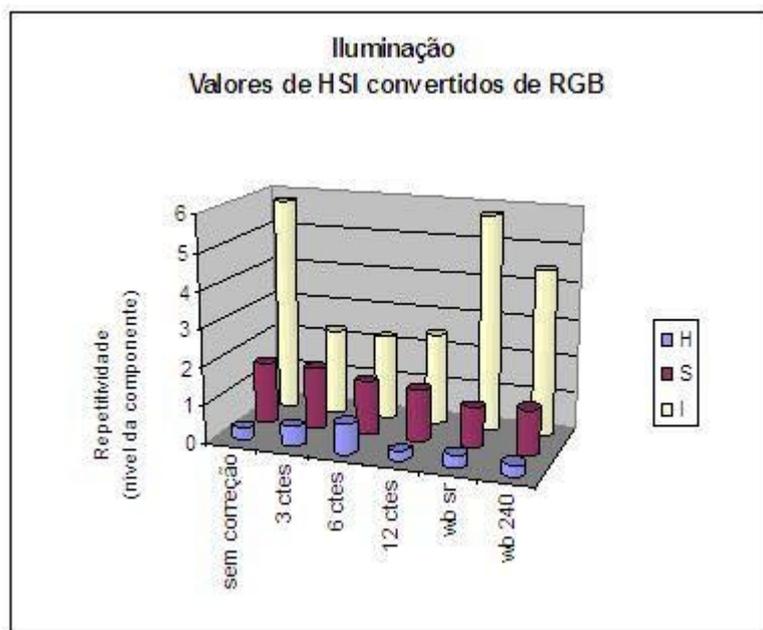


Figura 4.21 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB) Avaliação do Sistema de Iluminação

Pela análise do gráfico, pode-se notar que a correção compensou as variações previstas na rede elétrica, pois os níveis de repetitividade alcançados são equivalentes aos apresentados no teste 1 (“Compressão da Imagem”). Bons resultados foram obtidos com a utilização dos Modelos de 3, 6 e 12 Constantes.

4.6 Posicionamento da Imagem em relação à câmera

Para avaliar a eficácia da correção de cores para imagens adquiridas com variações de distância entre a câmera e o objeto, foram adquiridas 10 (dez) imagens do mosaico, com deslocamento de 1 mm em relação à câmera a cada aquisição. O experimento foi repetido com o reajuste de foco a cada deslocamento. Após o processamento das imagens, foi calculada a repetitividade para cada conjunto e os resultados foram plotados nos gráficos das Figuras 4.22 a 4.25.

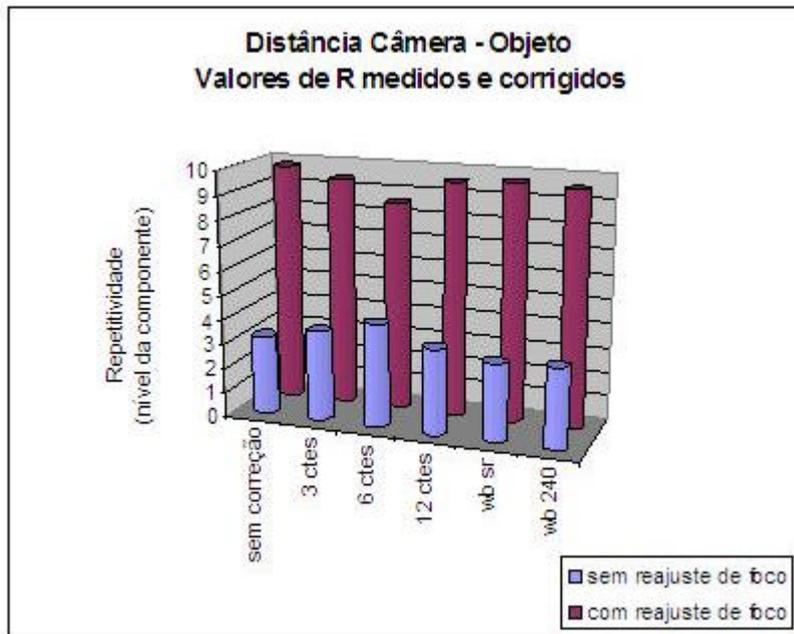


Figura 4.22 Valores de repetitividade para a componente R
Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto

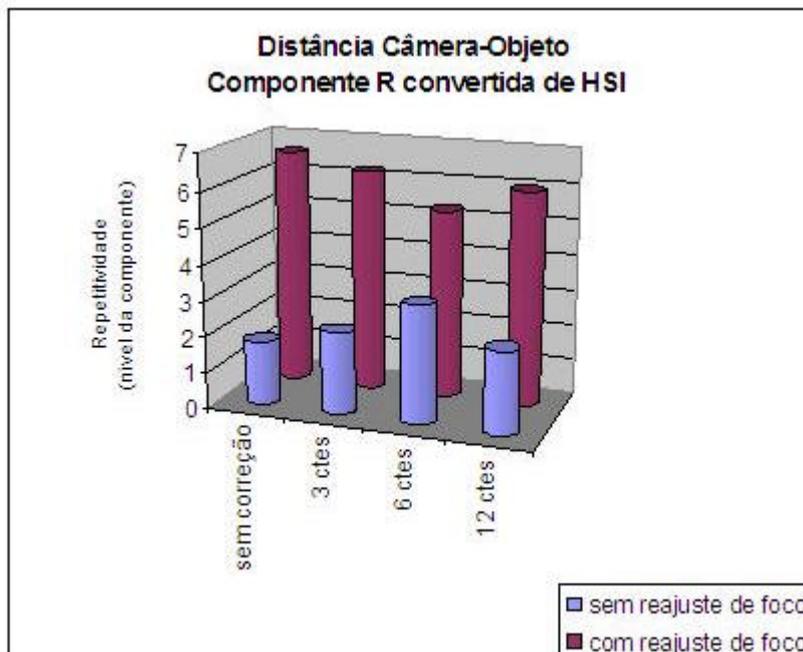


Figura 4.23 Repetitividade para a componente R (valores obtidos a partir da conversão de HSI)
Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto

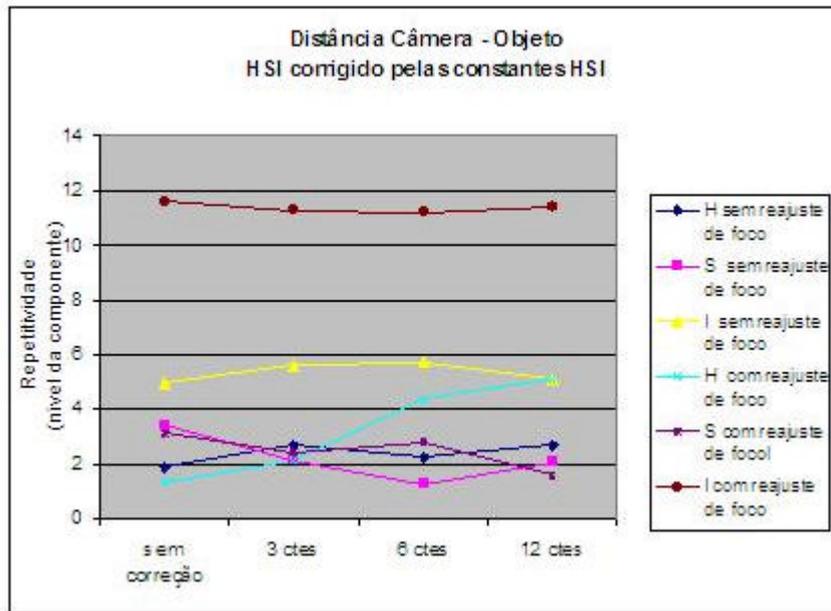


Figura 4.24 Repetitividade para as componentes H, S e I
Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto

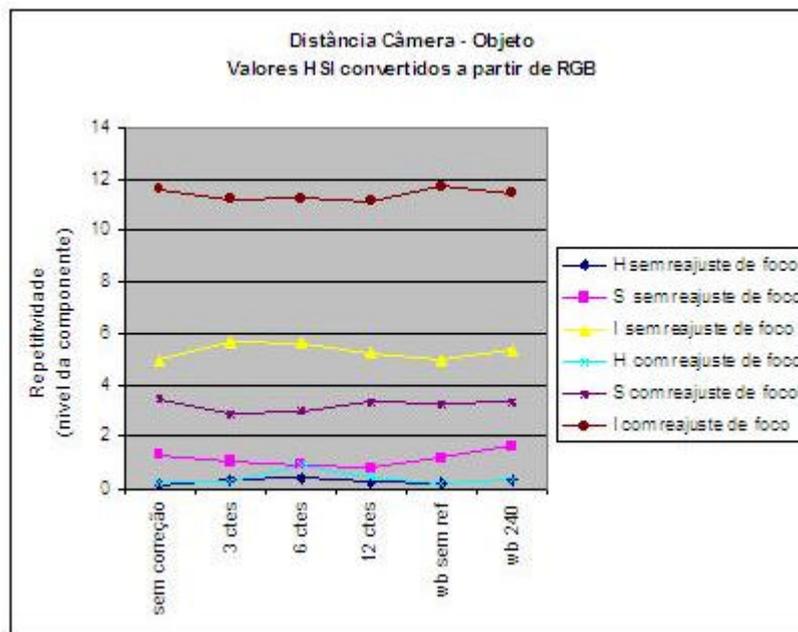


Figura 4.25 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB)
Avaliação da Variação da Distância Câmera-Objeto

O modelo de correção não alterou consideravelmente os valores de repetitividade

calculados para este caso. Deve-se observar que, para este ensaio, o fato das imagens estarem fora de foco não influenciou a medição das cores. O reajuste de foco, por sua vez, piorou a repetitividade da medição, devido às interferências provocadas no sistema.

Outro aspecto a ser observado é que, quanto maior a distância entre a câmera e o objeto, menor a imagem. No entanto, a região para processamento não muda (continua com as mesmas coordenadas de tela). Ou seja, serão utilizadas diferentes regiões do mosaico (tanto na referência de cor, como na região a ser corrigida), maiores ou menores conforme a variação da distância. Não uniformidades no mosaico e na textura do papel influenciaram estes resultados.

Para uma próxima avaliação, esse teste pode ser refeito, com alteração proporcional na área avaliada da imagem (ou seja, aumentando-se a distância, reduz-se a área analisada).

Pela análise dos valores de repetitividade para o sistema HSI, nota-se que os resultados da correção não foram significativos.

4.7 Influências Externas

4.7.1 Iluminação externa

Com o intuito de avaliar a influência de iluminação externa sobre o sistema na eficácia da correção das cores com os modelos propostos, foram adquiridas 10 (dez) imagens sem a proteção contra iluminação externa. As imagens foram corrigidas e comparadas, utilizando-se como referência uma imagem adquirida nas condições-padrão (ou seja, com o sistema protegido contra outros tipos de iluminação).

Em seguida, as imagens foram processadas e a repetitividade foi calculada para

cada modelo de correção. Os resultados estão apresentados no gráfico a seguir (Figuras 4.26 a 4.29).

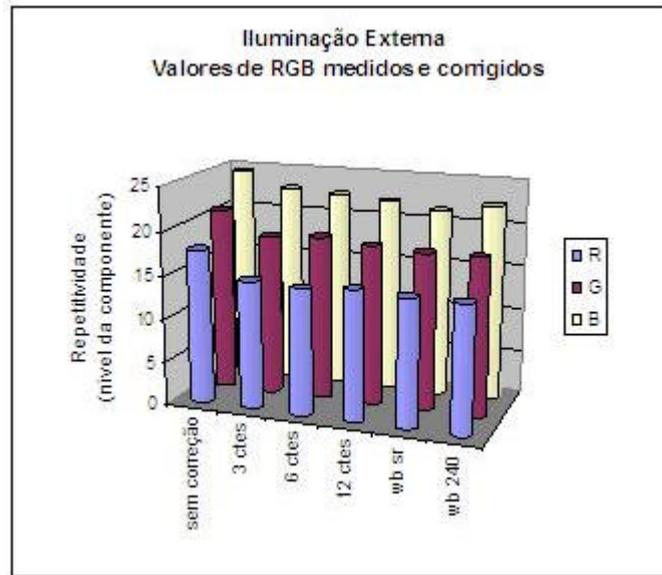


Figura 4.26 Valores de repetitividade para as componentes R, G e B
Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema

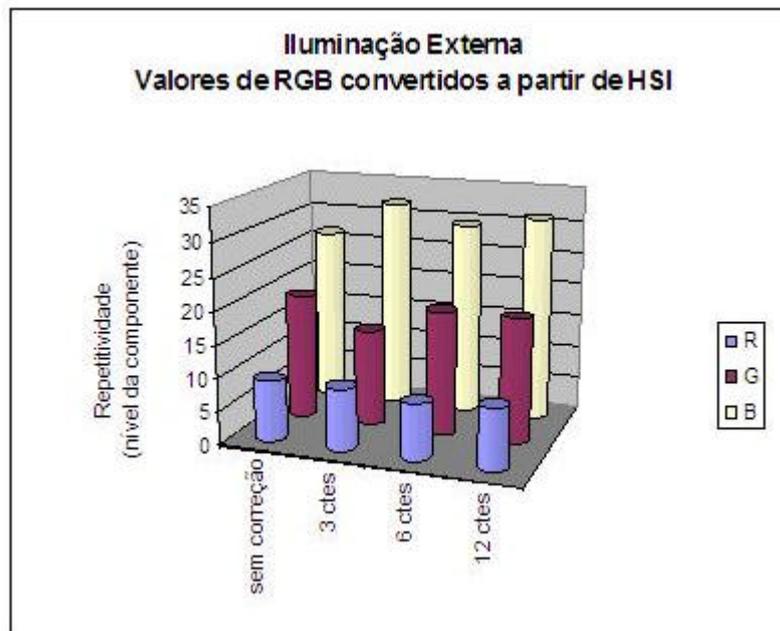


Figura 4.27 Repetitividade para as componentes R, G e B (valores obtidos a partir da conversão de HSI)
Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema

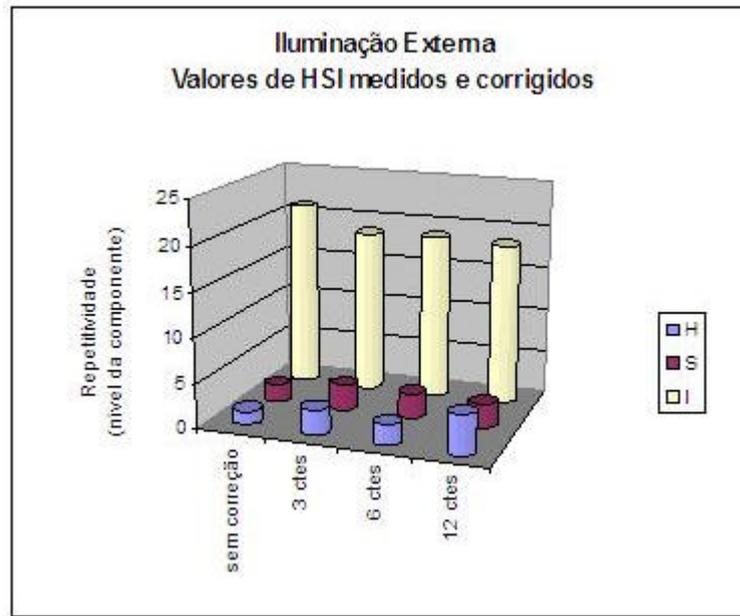


Figura 4.28 Repetitividade para as componentes H, S e I
Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema

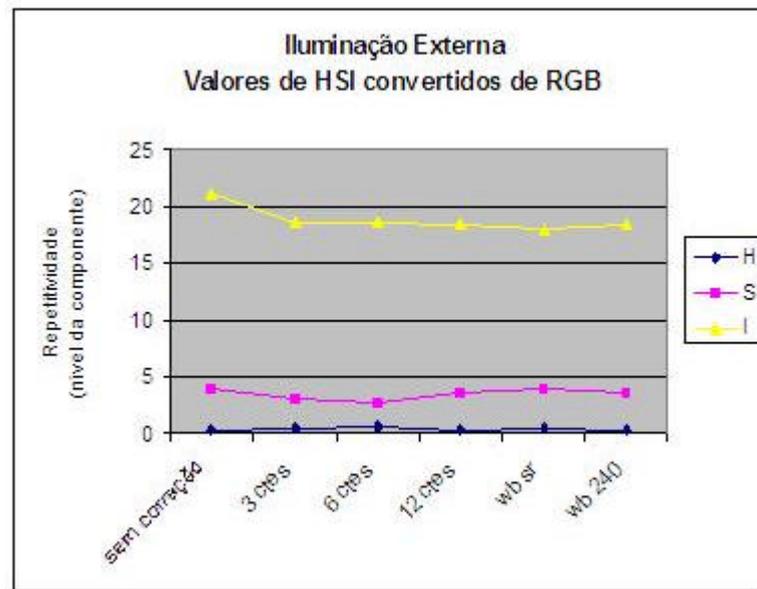


Figura 4.29 Valores de repetitividade para as componentes H, S e I (valores convertidos a partir de RGB)
Avaliação da Influência de Iluminação externa ao sistema

Neste caso, os diversos modelos propostos apresentaram desempenho semelhante para a correção das cores da imagem.

Pode-se notar que a presença de iluminação ambiente aumentou muito os níveis de repetitividade das componentes.

4.7.2 Influência de cores de regiões vizinhas

Foi realizado um teste que teve como objetivo avaliar a influência de cores de regiões vizinhas ao objeto cuja coloração será medida. Neste experimento, foi utilizada uma moldura colorida (Figura 4.30) em torno do mosaico a ser fotografado. Em seguida, foram adquiridas 6 (seis) imagens: uma sem a moldura (a ser utilizada como referência) e cinco com a moldura variando de posição a cada aquisição. As imagens foram processadas e a repetitividade foi calculada para cada caso. Os resultados apresentados no gráfico da Figura 4.31 indicam que a câmera não é sensível a tais influências.

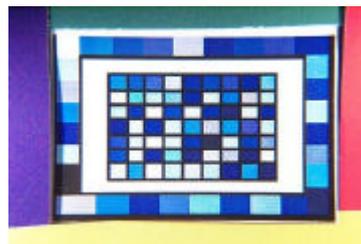


Figura 4.30 Mosaico de cores com moldura colorida

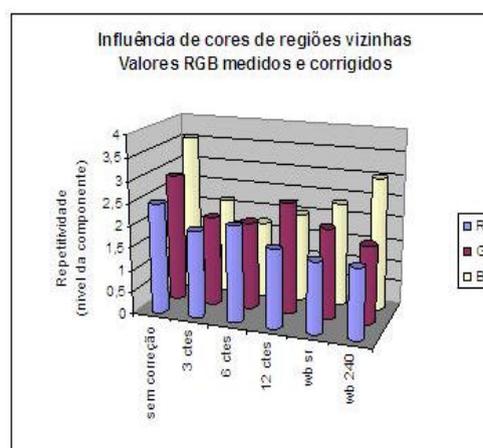


Figura 4.31 Valores de repetitividade para as componentes R, G e B
Avaliação da Influência de Cores de Regiões Vizinhas

4.7.3 Influência de reflexos de cores próximas

Este experimento teve como objetivo avaliar a influência de reflexos de cores próximas ao objeto a ser avaliado. Para simular esta situação, foram utilizados filtros de cores (vermelho, verde e azul) dispostos na frente de uma fonte de iluminação auxiliar que, também com o auxílio de uma fibra óptica, foi utilizada para iluminar o mosaico. O procedimento consistiu em se adquirir 8 (oito) imagens do mosaico: a primeira sem filtros e as seguintes com os filtros variando a cada aquisição. A repetitividade foi calculada para cada componente de cor envolvendo as imagens adquiridas com iluminação colorida auxiliar. Os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 4.32.

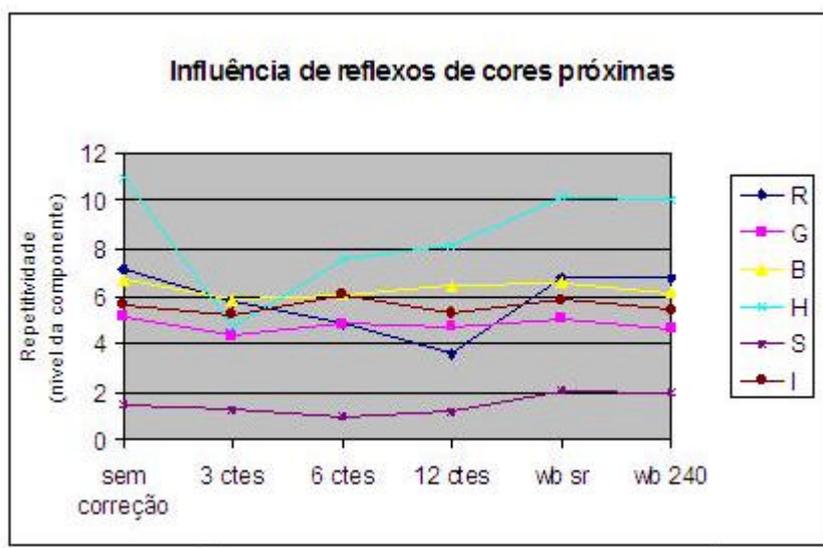


Figura 4.32 Valores de repetitividade para as componentes R, G, B, H, S e I Avaliação da Influência de Reflexos de Cores Próximas

Para este caso, o Modelo de 12 Constantes apresentou os melhores resultados.

4.8 Estabilidade da medição de cores ao longo do tempo

De maneira a verificar a eficácia dos modelos para a correção de imagens adquiridas ao longo do tempo, foi realizado o seguinte experimento: foram adquiridas 5 (cinco) imagens do mosaico, a cada cinco minutos, durante quarenta minutos, totalizando 45 (quarenta e cinco) imagens. Em seguida, as imagens foram processadas, e a média e a repetitividade de cada seqüência de 5 (cinco) imagens foram calculadas. Os resultados obtidos com a correção pelo Modelo de 12 Constantes estão apresentados no gráfico da Figura 4.33.

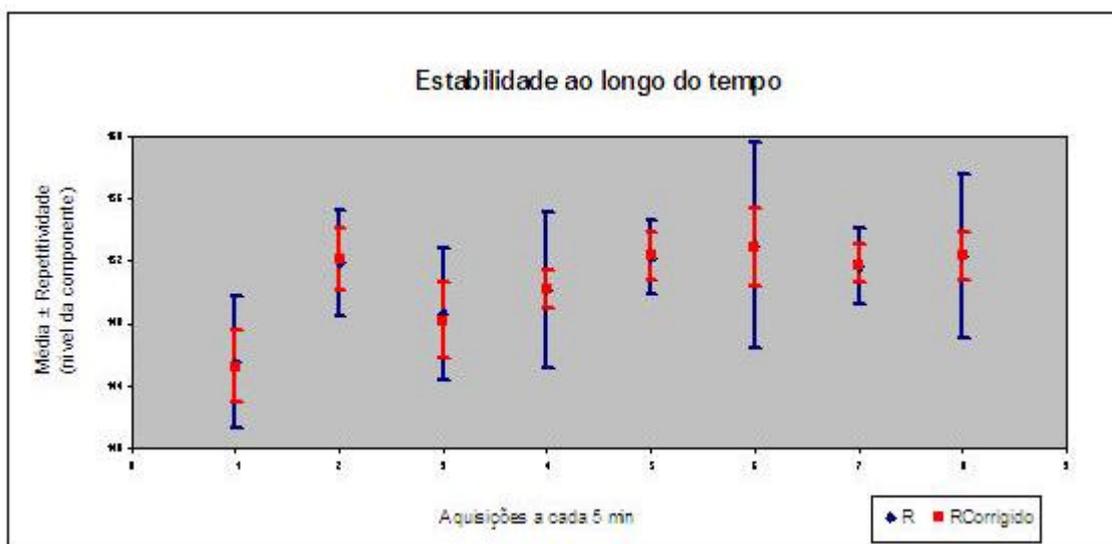


Figura 4.33 Avaliação da Estabilidade da Medição de Cores ao longo do Tempo
Valores medidos e corrigidos pelo Modelo de 12 Constantes (componente R)

Pode-se observar que, com a correção, a repetitividade melhora significativamente a cada ponto da curva.

Para o sistema de cores HSI, foram alcançados os seguintes resultados (Figura 4.34).

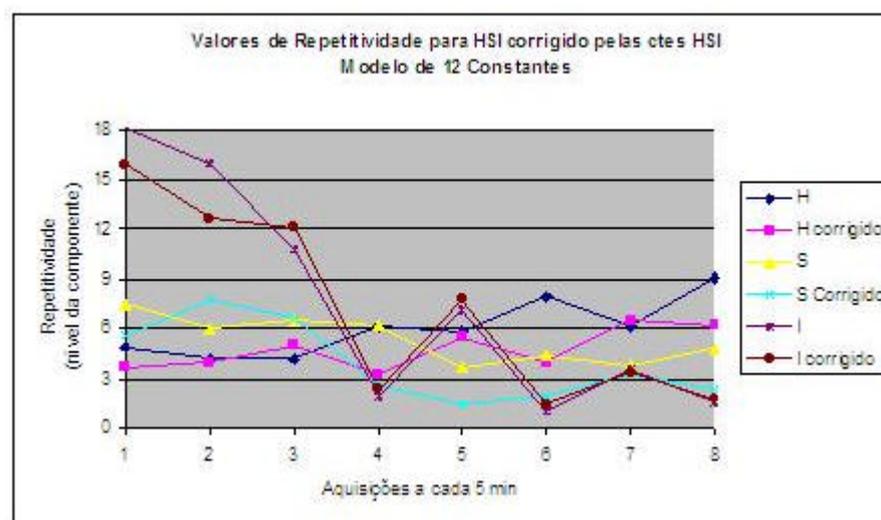


Figura 4.34 Repetitividade das componentes H, S e I
Avaliação da Estabilidade da Medição de Cores ao longo do Tempo

4.9 Avaliação dos Resultados das Incertezas

O objetivo desta avaliação é determinar os fatores de maior influência no resultado da medição, identificando aqueles que devem ser controlados no sistema. Para isto, foi plotado o gráfico comparativo da Figura 4.35, que apresenta os valores de repetitividade calculados para cada fator de influência antes e após a correção pelo Modelo de 12 Constantes.

Para esta avaliação, deve-se observar que:

- As incertezas decorrentes do processamento das imagens estão presentes em todos os testes;
- A repetitividade do posicionamento das regiões utilizadas no cálculo das constantes não é perfeita, devido às variações de posição existentes entre imagens adquiridas em seqüência. Este fato, associado à textura das imagens, gera erros no processo de cálculo e aplicação das constantes de correção;
- Existem variações naturais na intensidade da luz em todos os ensaios,

ainda que se tenha utilizado uma fonte estabilizada de tensão;

- Para avaliação da câmera, as imagens foram adquiridas com a melhor configuração da mesma, determinada a partir dos resultados dos testes 1 a 4 deste Capítulo.

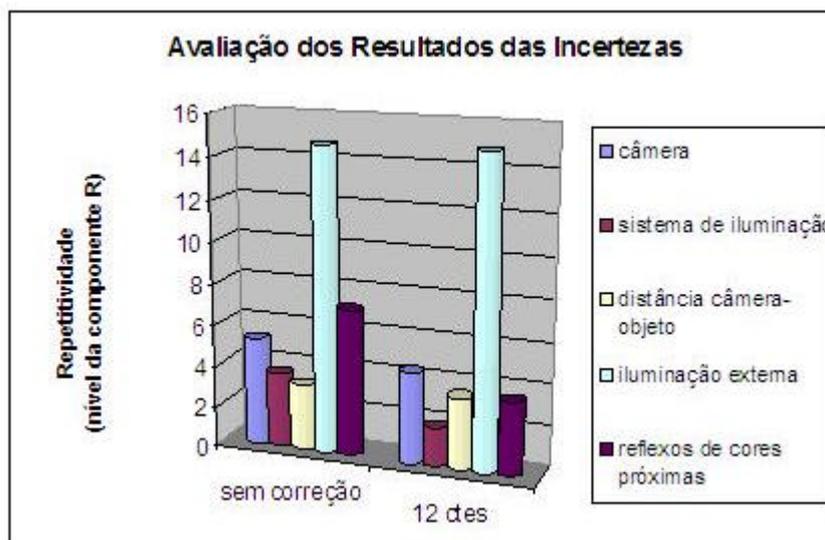


Figura 4.35 Valores de Repetitividade para a componente R
Avaliação Geral das Incertezas

Com base nestes resultados, pode-se concluir que:

- A escolha da câmera a ser utilizada representa um fator de grande importância no sistema. Deve, portanto, ser utilizada uma câmera que apresente resultados repetitivos na quantificação das cores;
- Ainda que a correção das cores pelos modelos propostos compense parcialmente os efeitos das oscilações da rede elétrica, recomenda-se a utilização de uma fonte de tensão estabilizada para a iluminação, para que seja evitado o acúmulo de erros;
- Pequenas variações na distância câmera-objeto não interferem significativamente no processo de medição das cores, desde que não seja feito reajuste de foco;

- A correção reduz os efeitos provocados pela iluminação externa ao sistema, mas não chega a anulá-los. É necessário, portanto, um controle rigoroso contra tais influências; uma vez que este foi o aspecto que apresentou as piores repetitividades. Conforme apresentado na página 24, a variação das cores da íris em função da glicemia é de cerca de 8 pontos no nível da componente da cor. Pelo gráfico da Figura 4.35, o resultado ficaria totalmente mascarado pelo efeito da iluminação externa;
- Reflexos de cores próximas àquelas a serem medidas apresentam alguma interferência no processo, embora pequena. O sistema deve, portanto, ser isolado de tais influências. Este aspecto deve ser observado quando da inserção da referência de cores no sistema.

4.10 Comentários Gerais

Alguns comentários podem ser tecidos, se realizada uma avaliação geral dos resultados dos testes realizados neste Capítulo.

Não houve um Modelo de Correção ou caminho proposto (correção diretamente em um sistema de cores ou conversão entre sistemas após a correção) que apresentasse sempre os melhores resultados. Este comportamento foi verificado para todas as componentes de cores dos sistemas RGB e HSI.

Em alguns casos, a correção proposta piorou os valores de repetitividade das componentes. Em outros, alguns modelos de correção que costumaram apresentar o melhor desempenho apresentaram piores resultados. Isto pode ser explicado, em parte, por outros fatores como, por exemplo, as variações na seleção das regiões na imagem, as irregularidades na textura dos mosaicos coloridos utilizados e os efeitos da amostragem limitada. Estes fatores aumentam os limites dos intervalos de confiança dos desvios padrão, que são calculados conforme descrito a seguir:

$$\frac{(n-1)*S^2}{c_{\alpha/2}^2} < \mathbf{s}^2 < \frac{(n-1)*S^2}{c_{1-\alpha/2}^2}$$

Sendo:

\mathbf{s}^2 : variância da população

S^2 : variância da amostra

n : número de elementos da amostra

c^2 : distribuição chi-quadrada com $v = n-1$ graus de liberdade

Para o sistema HSI, a correção muitas vezes gera erros e aumenta os valores de repetitividade em algumas componentes. Isto pode ser explicado pelo fato de se estar aplicando transformações lineares a coordenadas de cores que não apresentam este tipo de comportamento. Além disso, para os valores obtidos a partir das conversões de valores RGB, deve-se considerar o fato de que pequenas mudanças nas coordenadas de cores deste sistema podem levar a grandes variações em HSI.

Capítulo 5

Estudo de Casos

Com o objetivo de verificar a eficácia dos modelos propostos na correção de cores de imagens digitais de íris humanas, foi realizado um estudo de casos, descritos na seqüência. Neste estudo, foi avaliado um tipo de íris humana (clara), e três tipos de referência de cor: uma grade multicolorida, uma grade com diversos tons de azul e uma grade contendo apenas tons de azul próximos ao tom da íris a ser corrigida. As mesmas imagens foram analisadas pelos Modelos de 3, 6 e 12 Constantes.

5.1 Programa de Computador para Análise de Íris Humanas

No estudo de casos, foi utilizado um programa de computador similar ao utilizado na avaliação da metodologia: O programa permite a extração de parâmetros de cor da imagem e aplicação dos algoritmos para correção das cores na imagem que se queira corrigir. São realizadas, também, análises estatísticas dos dados.

Inicialmente, as imagens adquiridas pela câmera devem ser convertidas para o formato BITMAP (BMP). O programa carrega duas imagens: uma imagem de referência e outra a ser corrigida. O usuário seleciona um conjunto de várias regiões de 16 X 16 *pixels*, a serem utilizadas como referências de cor em ambas as imagens e o Modelo de

Correção de cores a serem utilizados. Em seguida, são calculados os valores médios de R, G, B, H, S e I de cada região de 16 x 16 *pixels* da imagem de referência e da imagem a corrigir. O modelo de correção de cores selecionado é aplicado sobre a imagem a corrigir.

Para avaliar o desempenho dos algoritmos de correção de cores utilizado, foi selecionada uma região anelar na íris, como mostra a Figura 5.1. Para manter uma certa uniformidade entre as imagens, o usuário posiciona a região anelar da seguinte forma: um círculo externo é ajustado com o auxílio do *mouse*, até ficar com o mesmo diâmetro da íris. Movendo a posição do seu centro, o usuário deve fazer com que este círculo fique visualmente concêntrico com a íris. O programa utiliza uma função que ajusta automaticamente os diâmetros dos círculos interno e externo da região anelar para 65% e 85%, respectivamente, do diâmetro da íris. Em seguida, o programa calcula o valor médio de R, G e B dentro desta região anelar.

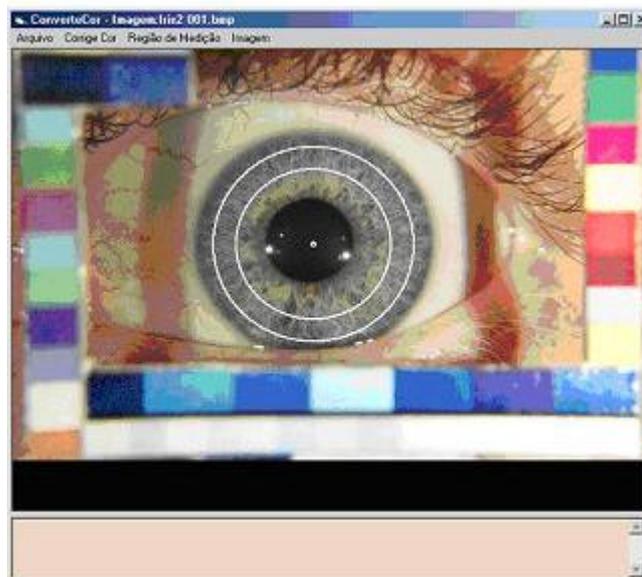


Figura 5.1 Região anelar da íris, cujo centro coincide com o centro do círculo íris/esclera. O raio externo corresponde a 85% do raio da íris e o raio interno a 65% do raio da íris

O procedimento é repetido para cada imagem a corrigir, mantendo fixas a

imagem de referência e as posições das regiões de 16 x 16 *pixels* em todas as imagens da mesma série. Em seguida, os valores médios de R, G e B da imagem corrigida são exportados para uma planilha MS-Excel[®], que permite uma avaliação estatística dos resultados.

5.2 Imagens Analisadas

Utilizando a mesma bancada do Capítulo 4, foram adquiridos dois conjuntos de nove imagens da íris de um mesmo voluntário, mantendo-se a iluminação e a distância do olho aproximadamente constantes.

No primeiro conjunto, as imagens foram obtidas procurando variar o mínimo possível nas condições de aquisição, sem que a cabeça do voluntário fosse removida do dispositivo. No segundo conjunto, as imagens foram feitas variando a posição da cabeça entre cada exposição.

Em ambos os casos, foi utilizada uma referência de cor contendo regiões de cores variadas, diversos tons de azul e tons de azul próximos da região da imagem a ser corrigida (Figura 5.1). A utilização desta configuração permite comparar o desempenho dos Modelos de Correção em função da escolha de diferentes combinações de referência de cores.

Para análise dos dois conjuntos, foi sempre utilizada a mesma imagem de referência. As análises foram feitas utilizando-se os Modelos de 3, 6 e 12 Constantes. Três conjuntos de referências cores foram utilizados: (a) o conjunto denominado “multicolorido”, composto dos 24 elementos representados na Figura 5.2, (b) um conjunto com diversos tons de azul, formado pelos 8 elementos representados na Figura 5.3 e, finalmente, (c) um conjunto de tons de azul próximos da íris a ser corrigida, formado pelos 11 elementos da Figura 5.4.

Os resultados obtidos nos ensaios serão apresentados a seguir.

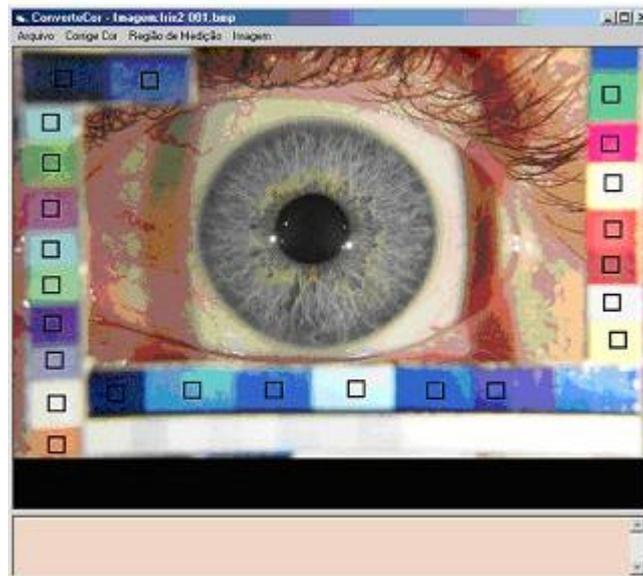


Figura 5.2 Referência Multicolorida (Conjunto de 24 elementos de 16 x 16 pixels com cores variadas)

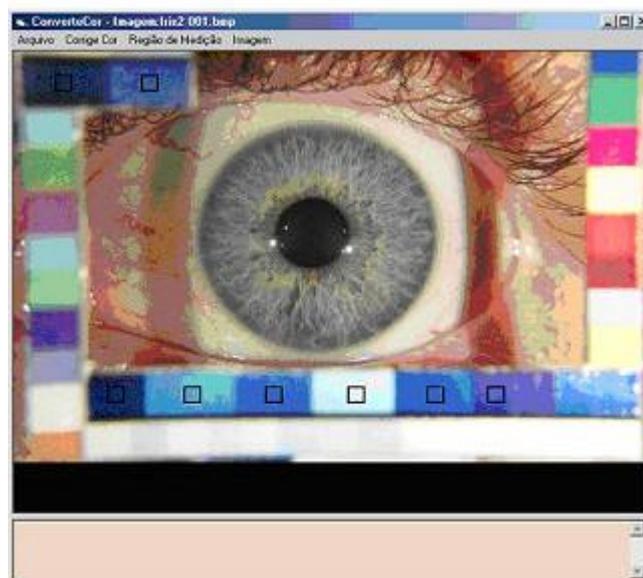


Figura 5.3 Referência contendo diversos tons de azul (conjunto de 8 elementos de 16 x 16 pixels)

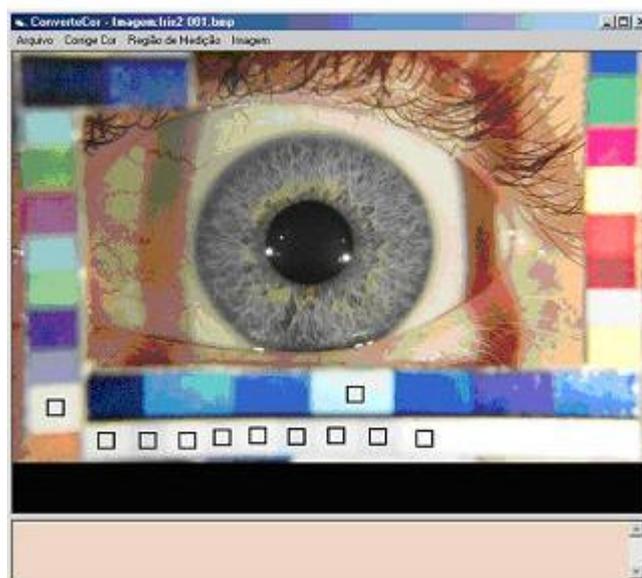


Figura 5.4 Referência contendo apenas tons de azul próximos da íris a ser corrigida (conjunto de 11 elementos de 16 x 16 *pixels*)

5.3 Resultados Obtidos

5.3.1 Referência de Cor Multicolorida

A Tabela da Figura 5.5 apresenta os resultados obtidos com a correção das imagens do primeiro conjunto (adquiridas com o mínimo de variação nas condições de aquisição) utilizando a referência de cor “multicolorida”.

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119,91	1,07			
	G	129,21	1,02			
	B	115,40	1,27			
	I	121,51	0,85			
Três ctes e Multicor	R	119,98	1,07	0,074	0,000	0,0%
	G	129,23	1,04	0,026	0,021	2,0%
	B	115,31	1,25	-0,089	-0,017	-1,4%
	I	121,51	0,95	0,004	0,100	10,5%
Seis ctes e Multicor	R	119,75	1,17	-0,160	0,103	8,8%
	G	128,94	0,86	-0,266	-0,158	-18,3%
	B	115,70	1,35	0,299	0,079	5,9%
	I	121,46	0,90	-0,042	0,052	5,8%
12 ctes e Multicor	R	119,79	1,12	-0,112	0,049	4,4%
	G	129,09	1,09	-0,111	0,077	7,1%
	B	114,59	2,44	-0,816	1,175	48,1%
	I	121,16	1,34	-0,347	0,492	36,7%

Figura 5.5 Resultados obtidos com a correção utilizando uma referência multicolorida – Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição

A tabela apresenta os valores médios de R, G e B entre imagens, medidos e corrigidos pelos diferentes Modelos. Traz, também, os valores das componentes de cor da região anelar da imagem de referência, bem como as médias e os desvios padrão entre imagens. A coluna “ Δ Médias” apresenta a diferença entre as médias das imagens corrigidas e as médias das imagens não corrigidas. Os valores da coluna “ Δ Desvios” são calculados a partir da diferença entre o desvio padrão entre imagens após a correção e o desvio padrão entre as imagens sem nenhuma correção. Quando este número é negativo, é sinal de que a correção reduziu o desvio padrão, isto é, melhorou a repetitividade. Na última coluna (“% Δ Desvios”), a redução do desvio padrão está expressa em termos percentuais.

Os resultados obtidos com a correção das imagens do segundo grupo (adquiridas com uma maior variação nas condições de aquisição) estão apresentados na Figura 5.6.

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119,52	0,79			
	G	129,51	0,59			
	B	115,83	1,47			
	I	121,62	0,61			
Três ctes e Multicolor	R	119,65	0,63	0,128	-0,165	-26,3%
	G	129,69	0,38	0,183	-0,206	-53,9%
	B	115,97	0,99	0,143	-0,480	-48,4%
	I	121,77	0,46	0,152	-0,153	-33,2%
Seis ctes e Multicolor	R	119,75	0,48	0,107	-0,148	-30,7%
	G	129,73	0,45	0,039	0,066	14,8%
	B	116,07	0,57	0,097	-0,423	-74,2%
	I	121,85	0,46	0,081	0,000	-0,1%
12 ctes e Multicolor	R	120,04	0,62	0,282	0,140	22,6%
	G	129,93	0,61	0,196	0,161	26,4%
	B	116,79	4,25	0,717	3,683	86,6%
	I	122,25	1,79	0,398	1,332	74,3%

Figura 5.6 Resultados obtidos com a correção utilizando uma referência multicolorida – Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição

Observando-se os resultados das Figuras 5.5 e 5.6, nota-se que, o ganho na correção foi maior no segundo caso.

Os Modelos de 3 e 6 Constantes foram aqueles que apresentaram os melhores desempenhos. A utilização do Modelo de 12 Constantes piorou a repetitividade das imagens.

5.3.2 Referência de cor contendo diversos tons de azul

As mesmas imagens foram analisadas utilizando-se como referência o conjunto contendo os diversos tons de azul (Figura 5.3). Os resultados obtidos no primeiro e segundo conjunto de imagens (sem variações e com variações nas condições de aquisição) estão apresentados nas Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119.91	1.07			
	G	129.21	1.02			
	B	115.40	1.27			
	I	121.51	0.85			
Três ctes e Azul Variado	R	119.95	0.65	0.045	-0.415	-63.6%
	G	129.21	1.02	0.000	0.000	0.0%
	B	115.27	1.17	-0.130	-0.098	-8.4%
	I	121.48	0.78	-0.028	-0.070	-9.0%
Seis ctes e Azul Variado	R	119.91	0.64	-0.042	-0.008	-1.3%
	G	129.20	1.02	-0.005	0.001	0.1%
	B	114.49	0.85	-0.780	-0.316	-37.0%
	I	121.20	0.72	-0.276	-0.055	-7.6%
12 ctes e Azul Variado	R	119.47	1.09	-0.442	0.442	40.7%
	G	128.83	1.36	-0.367	0.347	25.4%
	B	115.79	3.47	1.300	2.617	75.4%
	I	121.36	1.67	0.163	0.942	56.5%

Figura 5.7 Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons variados de azul
Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119.52	0.79			
	G	129.51	0.59			
	B	115.83	1.47			
	I	121.62	0.61			
Três ctes e Azul Variado	R	118.64	0.68	-0.882	-0.118	-17.5%
	G	129.09	0.70	-0.423	0.112	16.1%
	B	115.51	1.11	-0.320	-0.364	-32.8%
	I	121.08	0.67	-0.542	0.057	8.4%
Seis ctes e Azul Variado	R	118.80	0.77	0.163	0.098	12.6%
	G	129.10	0.72	0.013	0.018	2.4%
	B	115.87	0.28	0.363	-0.832	-299.8%
	I	121.26	0.45	0.179	-0.223	-50.1%
12 ctes e Azul Variado	R	119.48	0.79	0.677	0.016	2.1%
	G	130.74	0.75	1.642	0.034	4.5%
	B	115.82	4.72	-0.053	4.438	94.1%
	I	122.01	1.88	0.755	1.435	76.3%

Figura 5.8 Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons variados de azul
Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição

Também neste caso, os Modelos de 3 e 6 Constantes apresentaram bons resultados. A utilização do Modelo de 12 Constantes piorou a repetitividade das imagens.

Os resultados obtidos com a utilização desta referência de cor se mostraram melhores que o caso anterior (referência multicolorida), ainda que o número de referências utilizadas tenha sido menor.

5.3.3 Referência de cor contendo tons de azul próximos da imagem a ser corrigida

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os resultados da correção com a utilização do conjunto de tons de azul claro como referência de cor (Figura 5.4).

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119,91	1,07			
	G	129,21	1,02			
	B	115,40	1,27			
	I	121,51	0,85			
Três ctes e Azul Claro	R	119,94	0,92	0,032	-0,143	-15,5%
	G	129,52	0,69	0,318	-0,323	-46,5%
	B	115,78	1,49	0,378	0,219	14,8%
	I	121,75	0,71	0,243	-0,139	-19,6%
Seis ctes e Azul Claro	R	120,28	0,38	0,338	-0,540	-140,6%
	G	129,22	1,35	-0,300	0,660	48,8%
	B	113,24	1,30	-2,538	-0,185	-14,2%
	I	120,91	0,65	-0,833	-0,059	-9,0%
12 ctes e Azul Claro	R	119,34	1,34	-0,932	0,959	71,4%
	G	129,23	1,34	0,006	-0,015	-1,2%
	B	117,90	5,40	4,657	4,096	75,9%
	I	122,16	2,31	1,243	1,658	71,8%

Figura 5.9 Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons de azul claro
Imagens adquiridas com poucas variações nas condições de aquisição

Modelo		Média	Desvio Padrão	Δ Médias	Δ Desvios	% Δ Desvios
Sem correção	R	119,52	0,79			
	G	129,51	0,59			
	B	115,83	1,47			
	I	121,62	0,61			
Três ctes e Azul Claro	R	119,52	0,80	0,004	0,006	0,7%
	G	129,52	0,60	0,007	0,009	1,5%
	B	115,76	1,29	-0,070	-0,180	-13,9%
	I	121,60	0,60	-0,019	-0,017	-2,8%
Seis ctes e Azul Claro	R	120,17	1,59	0,643	0,791	49,7%
	G	129,03	3,29	-0,483	2,697	81,9%
	B	116,51	2,61	0,751	1,319	50,5%
	I	121,90	1,71	0,304	1,113	65,1%
12 ctes e Azul Claro	R	120,80	2,38	0,634	0,790	33,2%
	G	128,03	2,69	-1,005	-0,603	-22,4%
	B	120,35	6,31	3,834	3,693	58,6%
	I	123,06	3,03	1,155	1,316	43,5%

Figura 5.10 Resultados obtidos com a correção utilizando como referência tons de azul claro
Imagens adquiridas com maior variação nas condições de aquisição

Neste caso, a correção não se mostrou tão eficaz quanto com a utilização de referência com tons variados de azul. Também aqui, o Modelo de 12 Constantes piorou a repetitividade das imagens.

5.4 Análise de Resultados

Para análise dos casos estudados, deve-se observar que:

- As imagens foram adquiridas de maneira controlada, conforme as melhores condições, definidas a partir dos resultados dos testes do capítulo 4.
- Embora tenham sido controladas, as incertezas decorrentes de influências de iluminação externa ao sistema, variações no posicionamento relativo câmera-objeto, variações nas condições de iluminação, distorções de cores pela câmera, etc, continuam presentes nestes ensaios.
- Ainda que se tenha tentado minimizá-la, a textura presente nas referências de cor leva a erros nos cálculos das constantes de correção, especialmente se consideradas as variações de posicionamento das referências entre imagens subseqüentes.
- Existem ainda outras componentes de incerteza presentes nos testes realizados: aquelas decorrentes de fatores fisiológicos do voluntário (como tamanho da pupila, movimento dos olhos, proximidade da pálpebra, umidade do olho e alterações psicossomáticas), bem como incertezas inerentes ao programa de computador (processamento das imagens, determinação de regiões, cálculo de constantes, arredondamentos, etc).

Pela análise dos resultados alcançados no estudo de casos, pode-se concluir que:

- Para a correção de cores no sistema RGB, o Modelo de 3 Constantes apresentou o melhor resultado em média. Pelos percentuais de redução no

desvio padrão percebe-se um ganho com a utilização deste Modelo.

- Os resultados alcançados pelo Modelo de Seis Constantes foram um pouco piores, mas ainda trouxeram algum ganho perceptível.
- Em geral, o Modelo de 12 Constantes provocou uma piora na repetitividade. Acredita-se que o grande número de constantes a ser determinado neste modelo requiera um conjunto maior de dados e com grande variedade de componentes de cores. Sem esta condição, o mau condicionamento matemático do sistema de equações usado para calcular estas constantes leva a grandes variações nos valores das constantes calculadas, o que piora os resultados das correções.
- O desempenho da metodologia melhora quando se utilizam referências de cores com diversos tons da mesma cor da região da imagem a ser corrigida em conjunto com os Modelos de 3 e 6 constantes.

A seleção das cores das regiões de referência é mais importante que o número de referências a serem utilizadas.

Capítulo 6

Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo propor e avaliar alternativas para melhorar a incerteza da medição de cores usando câmeras fotográficas digitais de baixo custo. Foi motivado pela busca pelo aperfeiçoamento do GlucoIris, sistema não-invasivo para monitoração dos níveis de glicemia em seres humanos a partir da variação da coloração da íris humana.

Cinco modelos de correção de cores foram idealizados, implementados e experimentalmente avaliados. Os resultados indicam que os erros na medição de cores provocados pelo sistema podem ser reduzidos, em maior ou menor grau, com a utilização da metodologia proposta.

A seguir, serão tecidos alguns comentários a respeito dos resultados atingidos, bem como recomendações de melhorias para a metodologia.

6.1 Conclusões

6.1.1 Quanto ao Modelo de Correção

Entre os cinco modelos de correção propostos, três se baseiam em transformações lineares entre coordenadas de cor (3, 6 e 12 Constantes), e dois outros (WB e WBSR) são baseados em algoritmos de correção de cores usados em câmeras fotográficas digitais atuais.

Na análise de imagens com distorções simuladas, todos os modelos de correção apresentaram desempenho semelhante. Isto pôde ser verificado no caso de imagens com distorções de cores artificialmente provocadas (Capítulo 3). Deve-se ressaltar que tais modificações foram aplicadas à imagem como um todo e que os níveis de R, G e B sofreram alterações significativas (da ordem de até 30%).

Pequenas variações entre os desempenhos dos diferentes modelos foram verificadas e podem ser atribuídas a fatores naturais inerentes à aplicação da própria metodologia, como os erros numéricos, por exemplo. Estas variações estão embutidas nos intervalos de confiança calculados, conforme apresentado no Capítulo 4.

Para o Balanço de Branco (WB), não é aconselhável se utilizar um valor de intensidade de referência, pois um valor escolhido de maneira arbitrária pode apresentar resultados positivos em alguns casos e negativos (distorções nas coordenadas de cores) em outros.

Em nenhum modelo houve componentes de cor que apresentassem melhor desempenho na correção que outras. Também não foi verificado um único Modelo que apresentasse os melhores resultados em todos os casos.

6.1.2 Quanto ao Sistema de Representação de Cores HSI

Alguns comentários devem ser feitos a respeito da aplicação da metodologia para o caso da utilização do sistema HSI. Conforme exposto no Capítulo 2, os valores das coordenadas em HSI são calculados a partir dos valores adquiridos em RGB. E, de acordo com as equações apresentadas nesse Capítulo, deve-se ter em mente que pequenas variações dos valores das coordenadas RGB podem gerar grandes alterações nos respectivos valores do HSI. Desta forma, com a correção proposta, pode acontecer uma piora dos níveis de repetitividade destas componentes, mesmo que as variações no sistema RGB estejam dentro de níveis razoáveis.

Para o sistema HSI, o modelo que apresentou o melhor desempenho, em geral, foi o do Balanço de Branco (WB). Ainda assim, em alguns casos a redução dos níveis de repetitividade foi pequena.

6.1.3 Quanto às Referências de Cores utilizadas

Os ensaios realizados nos Capítulos 4 e 5 analisaram a correção de imagens adquiridas em condições controladas. Foram analisadas diferentes configurações de referências de cores:

- (a) Diversos tons da cor predominante na região a ser corrigida;
- (b) Tons de vermelho, verde, azul e cinza;
- (c) Uma referência multicolorida;
- (d) Tons próximos aos tons da região a ser corrigida da imagem.

Deve-se ressaltar que a escolha adequada das cores da referência se mostrou um fator mais importante que o número de referências utilizadas.

Outro aspecto relevante em relação à referência é a sua textura. A referência de cor deve ser confeccionada de forma a ser o mais uniforme possível, apresentando textura homogênea. Além disso, é importante que a posição das referências de cores esteja fixa em relação à câmera, propiciando que as regiões da imagem tomadas como referências sempre correspondam às mesmas regiões físicas no mosaico que corporifica as cores. Assim, minimizam-se os efeitos de eventuais não uniformidades na textura das referências de cores.

A repetitividade da seleção de regiões (tanto da referência como da região a ser corrigida) é bastante importante para os resultados da correção. Desta forma, devem ser tomados cuidados no processo de seleção de regiões para que elas correspondam sempre às mesmas regiões físicas do mosaico com as cores de referência.

6.1.4 Quanto às Condições de aquisição das imagens

Conforme analisado no Capítulo 4, as melhores condições de reprodução das imagens adquiridas envolvem uma configuração com ajustes manuais, evitando, assim, as distorções provocadas pelas “compensações” geradas pelos algoritmos automáticos internos da câmera. Os efeitos externos ao sistema, assim como as variações da iluminação utilizada, são melhorados pela utilização dos modelos propostos. O fato das regiões das cores de referência estarem fora de foco não é um quesito importante para o sistema.

Os reflexos da iluminação, quando pontuais e incidentes na região da imagem a ser analisada, também acarretam erros na determinação e correção das cores da imagem. Assim, cuidados devem ser tomados com este quesito, deslocando o reflexo da fonte de iluminação para fora da região a ser analisada. Outro aspecto importante é a homogeneidade da iluminação sobre o objeto, uma vez que a correção é uniforme em todos os *pixels* da imagem.

O fato de a imagem estar ou não em foco não é um aspecto relevante apenas quando a compensação de cores é considerada, conforme observado no Capítulo 4. Entretanto, no caso de análises de íris humanas, a importância do foco permanece quando se leva em conta o processo de detecção de regiões da íris. Assim, para o sistema GlucoIris, o foco da imagem continua sendo um aspecto relevante.

6.1.5 Aplicação da Metodologia para o caso de um objeto inanimado

Em geral, os Modelos de Correção propostos se mostraram eficazes para a correção de imagens de um objeto inanimado. Os Modelos de 6 e 12 Constantes e do Balanço de Branco, sem a utilização de um valor de Intensidade de referência, apresentaram os melhores resultados na correção das cores.

A conversão entre os sistemas de cores RGB e HSI após a correção, em alguns casos, melhorou os níveis de repetitividade e, em outros, piorou. Isto pode ser explicado pelo fato de que pequenas alterações em um sistema levam a grandes alterações no outro.

6.1.6 Aplicação da Metodologia para o caso de íris humanas

Quanto à aplicação para o caso de imagens de íris humanas, o Modelo de 3 Constantes, no geral, apresentou o melhor desempenho. A melhor referência foi aquela que continha diversos tons da mesma cor da íris a ser corrigida (caso “a”). Os resultados dos testes indicam que é melhor ter uma referência da cor com tons predominantes próximos aos da imagem a ser corrigida do que uma referência com grande número de cores variadas.

Não se deve perder de vista que a correção proposta tenta abater a parcela sistemática embutida na incerteza. No caso de íris humanas, os fatores aleatórios específicos (iluminação não-uniforme e reflexos devidos à curvatura e umidade do globo

ocular, além de fatores psicossomáticos – como fadiga pela incidência da luz, etc) se fazem presentes na medição. Além disso, o fato da referência de cor e a íris estarem em planos diferentes faz com que os ângulos de iluminação e observação da íris mudem de foto para foto, mas não os da referência, o que faz com que a correção desse tipo de imagem não seja tão boa.

Para o caso de íris humanas, a utilização do Modelo de 12 Constantes piorou a repetitividade das imagens. Acredita-se que o grande número de constantes a determinar exija um conjunto suficientemente grande e variado de referências de cores nas imagens de referência e a corrigir. A não observação desta condição pode provocar um mau condicionamento matemático no sistema de equações do modelo de 12 constantes. De fato, esta hipótese é reforçada com os resultados do capítulo 5, que mostram que a qualidade da correção com o modelo de 12 cores é melhor quando o conjunto multicolorido é usado como referência e piora quando cores menos variadas são utilizadas.

6.2 Recomendações de melhorias

Como forma de buscar a melhoria dos resultados para as coordenadas de cor no sistema HSI, sugere-se testar a correção por *pixel* da imagem, e não por região, como foi feito neste trabalho. Não se pode perder de vista que os modelos propostos sugerem transformações lineares, e o sistema HSI não é linear.

Uma vez que em alguns casos determinados modelos apresentaram melhores resultados que outros, sugere-se a implementação de algoritmos que determinem e utilizem o melhor modelo de correção em cada caso.

Pode-se testar ainda, a utilização de uma maior diversidade e número de referências de cor, sempre da mesma cor da região da imagem a ser corrigida.

Por fim, deve-se ressaltar que a metodologia proposta não se restringe à aplicação no sistema GlucoIris. Outros sistemas que utilizem a medição de cores por imagens digitais podem ter estes algoritmos testados e implementados, conforme recomendações de utilização, de maneira que haja redução dos níveis de repetitividade das componentes de cor da imagem.

Referências Bibliográficas

- [1] Freeman, H., **Machine vision for inspection and measurement**, Boston: Academic Press, USA, 1989.
- [2] Vieira Neto, H. & Marques Filho, O., **Processamento Digital de Imagens**, Brasport, Rio de Janeiro, 1999.
- [3] **Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens**, Anais, FAPESP, São Carlos, 1995.
- [4] Grimson, W. E. L. & Huttenlocher, D. P., **Object recognition by computer: the role of geometric constraints**, MIT Press, Cambridge, 1990.
- [5] SITe Inc, **An Introduction to Scientific Imaging Charge -Coupled Devices**, USA, 1994.
- [6] AutoVision Inc., **Color Measurement for Industry**, USA, 2002.
- [7] Hamey Vision, **Machine Vision Systems**, <<http://www.hameyvision.com/vision.html>>, 14 Nov 2002.
- [8] Mumzhiu, A M., **Application of vision systems for color and appearance measurements in industrial inspection**, Volume 3652 – SPIE Proceedings, USA, 1999.
- [9] Pica, C. Q., **Aperfeiçoamento e Avaliação de Sistema para Quantificação da Glicemia Através de Análises de Imagens da Íris Humana**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2002.

- [10] Menezes, J. R., **Desenvolvimento e Avaliação Preliminar de um Sistema para Quantificação da Glicose no Sangue por meio de Imagens da Íris Humana**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, Brasil, 2000.
- [11] Gomes, J. & Velho, L., **Computação Gráfica: Imagem**, IMPA & SBM, Rio de Janeiro, 1994.
- [12] Wyszecki & Stiles, **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**, John Wiley, USA, 2000.
- [13] Billmeyer Jr., F. W. & Saltzman, M., **Principles of Color Technology**, John Wiley, USA, 1981.
- [14] Oliveira, M.C.F., **Computação Gráfica - Apostila Nº 11**, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, USP, 1999.
- [15] Malacara, D., **Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications**, SPIE Press, USA, 2002.
- [16] Facon, J., **Processamento e Análise de Imagens**, Universidad Nacional de Cordoba, Córdoba, 1993.
- [17] National Instruments, **Anatomy of a Camera**, <<http://www.ni.com/support/imaqsupp.htm>>, 10 Ago. 2003.
- [18] Host, G. C., **CCD Arrays, Cameras and Displays**, Spie, USA, 1996
- [19] Sun, Anthony, **A System: The Digital Camera**, <<http://www.princeton.edu/~sun>>, 28 Out 2002.
- [20] Scuri, E. A., **Fundamentos da Imagem Digital**, <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/~scuri/>>, 18 Ago 2003.
- [21] Dam, A. van, Feiner, S. K. & Foley, J. D., **Introduction to Computer Graphics**, Addison-Wesley, 1994.

- [22] Scuri, E. A., **O Sistema de cor HSI**, <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/~scuri/>>, 18 Ago 2003.
- [23] Canfield Scientific Inc., **Anatomy of a Camera**, 2000.
- [24] KODAK, **Digital Learning Center**, <<http://www.kodak.com/US/en/digital/dlc>>, in Book II: Technology, 10 Ago, 2003
- [25] KODAK, **Digital Learning Center**, <<http://www.kodak.com/US/en/digital/dlc>>, in Book III: Courses, 10 Ago, 2003
- [26] Ford, A. & Roberts, A., **Colour Space Conversions**, <<http://www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf>>, 10 Ago. 2003.
- [27] Newsome, H. & Beier, J., **Camera Information** <<http://www-ise.stanford.edu/class/psych221/00/jsbeier/camerainfo.html>>, 10 Ago, 2003
- [28] Colour Imaging Group, **Understanding Digital Color Resources and Links**, <<http://www.digitalcolour.org/understanding/Links.htm>>, 10 Ago. 2003.
- [29] Colour & Imaging Institute, **Digital Camera Colour Characterisation and its Application for On-screen Texture Simulation**, <http://colour.derby.ac.uk/colour/people/student/bing_han.html>, 10 Ago. 2003
- [30] Palmer, J., **Radiometry and Photometry**, <<http://www.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/rpfaq.htm>>, 10 Ago 2003.
- [31] Poyton, C, **Frequently Asked Questions about Color**, <<http://www.poynton.com/ColorFAQ.html>>, 10 Ago. 2003
- [32] Macbeth ColorChecker, <http://www.digital-photography.org/mcbeth_color_checking/Macbeth_ColorChecker_Gray.html>
- [33] Electronics for Imaging, **Color Measurements Solutions: Color Glossary**, <http://www.efi.com/products/color_glossary.html>, 10 Ago 2003.
- [34] Montgomery, D. C. & Runger, G. C., **Applied Statistics and Probability for Engineers**, Second Edition, *John Wiley & Sons, Inc*,

- [35] Wilburn, B., **Color Correction of a Photobit PB159DX Based Câmera**, Stanford University, CA, 2000.
- [36] Cardei, V. C., **A Neural Network Approach to Colour Constancy**, Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, School of Computing Science, Simon Fraser University, 2000.
- [37] Cardei, V. C., Funt, B. & Brockington, M., **Issues in Color Correction Digital Images of Unknown Origin**, CSCS12, Bucharest, Romania, 1999.
- [38] Motorola Inc., **White Balance and Color Correction in Digital Cameras**, 2000.
- [39] Vora, P. L. Farrell, J. E., Tietz, J. D. & Brainard D. H., **Linear Models for Digital Cameras**, Proceedings of the IST 50th Annual Conference, 1997.
- [40] Cardei, V. C. & Funt, B., **Committee-Based Color Constancy**, Scottsdale, 1999.
- [41] Finlayson G. D., Drew, M. & Funt, B., **Diagonal Transforms Suffice for Color Constancy**, Simon Fraser University, Canada, 1992.
- [42] Cardei, V. C., Funt, B. & Barnard, K., **White Point Estimation for Uncalibrated Images**, Scottsdale, 1999.
- [43] INMETRO, CNI/SENAI, **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**, Segunda Edição Brasileira, 2000.
- [44] Gonçalves Jr., A. A., **Metrologia – Parte 1**, Laboratório de Metrologia e Automatização, UFSC, 2001.
- [45] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**, Segunda Edição Brasileira, 1998.