



Universidade Estadual do Paraná

Campus Apucarana

CARLOS EDUARDO RODRIGUES SIMÕES RISSATI



**FILTRO DE CORREÇÃO CROMÁTICA EM TEMPO REAL
PARA ACESSIBILIDADE DIGITAL DE PESSOAS COM
DISCROMATOPSIA**

APUCARANA-PR

2025

CARLOS EDUARDO RODRIGUES SIMÕES RISSATI

**FILTRO DE CORREÇÃO CROMÁTICA EM TEMPO REAL
PARA ACESSIBILIDADE DIGITAL DE PESSOAS COM
DISCROMATOPSIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual do Paraná para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Seixas Junior

APUCARANA-PR

2025

Carlos Eduardo Rodrigues Simões Rissati

Filtro de Correção Cromática em Tempo Real para Acessibilidade Digital
de Pessoas com Discromatopsia/ Carlos Eduardo Rodrigues Simões Rissati. –
Apucarana-PR, 2025-

45 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. José Luis Seixas Junior

– Universidade Estadual do Paraná, 2025.

1. Palavra-chave1. 2. Palavra-chave2. I. Orientador. II. Universidade xxx. III.
Faculdade de xxx. IV. Título

CDU 02:141:005.7

CARLOS EDUARDO RODRIGUES SIMÕES RISSATI

**FILTRO DE CORREÇÃO CROMÁTICA EM TEMPO REAL
PARA ACESSIBILIDADE DIGITAL DE PESSOAS COM
DISCROMATOPSIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual do Paraná para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Luis Seixas Junior
Universidade Estadual do Paraná
Orientador

Prof. Dr. Lisandro Rogério Modesto
Universidade Estadual do Paraná

Prof. Ms. Marcelo Caetano de Cernev Rosa
Universidade Estadual do Paraná

Apucarana-PR, 1 de dezembro de 2025

Este trabalho é dedicado a todas às pessoas com deficiência na percepção de cores, que diariamente enfrentam barreiras visuais em um mundo que nem sempre é projetado pensando em suas necessidades. Que este estudo possa contribuir, ainda que modestamente, para um futuro mais acessível e inclusivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luis Seixas Junior, expresso minha profunda gratidão pela orientação dedicada ao longo deste trabalho. Suas valiosas contribuições, ideias inspiradoras sobre a área e constante motivação foram fundamentais para que eu pudesse superar os momentos de incerteza e perseverar até a conclusão deste projeto.

Ao meu amigo e colega de turma Fabrício, agradeço imensamente pelo apoio na estruturação deste trabalho e pela colaboração no desenvolvimento de tópicos mais precisos, contribuindo significativamente para alcançar uma abordagem acadêmica adequada.

A ambos, meu sincero reconhecimento por tornarem esta jornada possível.

“Não vemos as coisas como elas são, vemos como nós somos.”
(Anaïs Nin)

. **Filtro de Correção Cromática em Tempo Real para Acessibilidade Digital de Pessoas com Discromatopsia.** 45 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual do Paraná, Apucarana–PR, 2025.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um filtro de correção cromática em tempo real para acessibilidade digital de pessoas com discromatopsia, com foco específico na deuteranopia. A solução proposta utiliza técnicas de computação gráfica para manipular cores em tempo de execução, implementando uma camada de sobreposição no sistema operacional Windows que intercepta e processa os quadros antes da renderização final. A implementação foi desenvolvida em C++ utilizando APIs gráficas como GDI+ e OpenGL com GLSL, permitindo processamento acelerado por GPU. Dois métodos de correção foram avaliados: o algoritmo LMS Daltonization, que simula a visão daltônica convertendo imagens do espaço RGB para LMS e aplicando compensações cromáticas; e o método baseado em Look-Up Tables, que pré-calcula as correções para maior eficiência computacional. Os experimentos realizados demonstraram que ambos os métodos alcançam o objetivo de correção cromática em tempo real. O contador de FPS implementado revelou que o sistema opera com mediana próxima a 15 quadros por segundo, valor suficiente para evitar flickering e manter a percepção visual contínua. A análise de fidelidade cromática, realizada através da métrica CIEDE2000 no espaço CIELAB, mostrou que o método LUT apresenta leve perda de precisão comparado ao algoritmo LMS, porém mantém resultados visuais satisfatórios para uso prático. O método LMS oferece maior precisão na representação das transformações espectrais, mas demanda maior custo computacional. Já o método LUT, embora ligeiramente menos preciso, proporciona processamento mais eficiente através de correções pré-calculadas, representando um equilíbrio adequado entre qualidade perceptual e desempenho para aplicações em tempo real. As limitações identificadas incluem o foco exclusivo na deuteranopia e restrição ao sistema Windows, versões 10 e 11, além de comportamentos inconsistentes na sobreposição gráfica durante certas operações do sistema. O trabalho contribui para o avanço das soluções de acessibilidade digital, apresentando um método viável e eficiente para correção cromática que auxilia pessoas com deficiência na percepção de cores em ambientes computacionais.

Palavras-chave: Daltonismo. Deuteranopia. Acessibilidade Digital. Correção Cromática. LUT. Computação Gráfica.

. **Real-Time Chromatic Correction Filter for Digital Accessibility of People with Dyschromatopsia.** 45 p. Final Project (Bachelor of Science in Computer Science) – State University of Paraná, Apucarana–PR, 2025.

ABSTRACT

This work presents the development of a real-time chromatic correction filter for digital accessibility of people with dyschromatopsia, specifically focusing on deutanopia. The proposed solution employs computer graphics techniques to manipulate colors at run-time, implementing an overlay layer in the Windows operating system that intercepts and processes frames before final rendering. The implementation was developed in C++ using graphic APIs such as GDI+ and OpenGL with GLSL, enabling GPU-accelerated processing. Two correction methods were evaluated: the LMS Daltonization algorithm, which simulates color-blind vision by converting images from RGB to LMS space and applying chromatic compensations; and the Look-Up Table (LUT) method, which pre-calculates corrections for greater computational efficiency. Experiments demonstrated that both methods achieve real-time chromatic correction. The implemented FPS counter revealed that the system operates with a median close to 15 frames per second, sufficient to prevent flickering and maintain continuous visual perception. Chromatic fidelity analysis, performed using the CIEDE2000 metric in CIELAB space, showed that the LUT method presents slight precision loss compared to the LMS algorithm, yet maintains satisfactory visual results for practical use. The LMS method offers greater precision in representing spectral transformations but demands higher computational cost. The LUT method, although slightly less precise, provides more efficient processing through pre-calculated corrections, representing an adequate balance between perceptual quality and performance for real-time applications. Identified limitations include exclusive focus on deutanopia and restriction to Windows systems, along with inconsistent graphic overlay behavior during certain system operations. This work contributes to advancing digital accessibility solutions, presenting a viable and efficient method for chromatic correction that assists people with color perception deficiencies in computational environments.

Keywords: Color Blindness. Deutanopia. Digital Accessibility. Chromatic Correction. LUT. Computer Graphics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da tricromacia anômala e porcentagem de gênero afetada.	25
Figura 2 – Cones LMS distribuídos pela frequência.	26
Figura 3 – Representação da dicromacia e porcentagem de gênero afetada.	26
Figura 4 – Espaço de cor RGB	29
Figura 5 – Espaço de cor LAB	30
Figura 6 – Representação da diferença entre os QPS	35
Figura 7 – Espaço de cores CIELAB	36
Figura 8 – Resultados da aplicação do filtro.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação utilizando método LMS Daltonization	36
Tabela 2 – Comparação utilizando método LUT	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	Application Programming Interface
CMY	Cyan, Magenta, Yellow
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
GDI+	Graphics Device Interface plus
GPU	Graphics Processing Unit
GLSL	OpenGL Shading Language
HSL	Hue, Saturation, Lightness
LMS	Large, Medium, Short
LUT	Look Up Table
OpenGL	Open Graphics Library
QPS	Quadros Por Segundo
RGB	Red, Green, Blue

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Técnicas Existentes	26
2.2	Implementação no Sistema Operacional	27
2.3	Estado da Arte	27
2.4	Alteração e Simulação de Cores em Sistemas Computacionais	28
2.4.1	Espaço de Cor RGB	29
2.4.2	Espaço de Cor CIELAB (LAB)	29
2.5	Algoritmo de Daltonização LMS	30
3	MÉTODO DE PESQUISA	33
3.1	Inicialização	33
3.2	Captura e Atualização de Quadros	33
3.3	Aplicação e Processamento na GPU	34
3.4	Métricas de Avaliação	34
4	EXPERIMENTOS	35
4.1	Limitações	38
5	RESULTADOS	39
6	CONCLUSÃO	41
6.1	Trabalhos futuros	41
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

As cores são elementos fundamentais à nossa vida, estão presentes em praticamente tudo ao nosso redor, servindo para representar sentimentos, ações, estados, sinais e até mesmo transmitir mensagens visuais importantes. Diante dessa relevância, a incapacidade de perceber ou distinguir certas cores pode impactar significativamente a experiência de uma pessoa com o mundo [1].

Para indivíduos daltônicos, ou que possuem discromatopsia, termo técnico que designa as deficiências hereditárias ou adquiridas na percepção de cores, essas limitações acabam se manifestando em diversas situações cotidianas, como distinguir de forma errada um sinal de trânsito e acabar colocando sua vida em risco [2], gerar desconforto visual ao trabalhar com interfaces digitais mal projetadas e dificultar a compreensão de mapas, gráficos ou infográficos [3]. Essas dificuldades também se apresentam em ações consideradas simples, como escolher roupas que combinem ou identificar alimentos maduros.

Há casos em que essas restrições podem afetar até mesmo a escolha do rumo profissional de uma pessoa, como militares e pilotos, onde a percepção precisa de cores é essencial para distinguir algo camuflado, sinais de navegação e *displays*.

No entanto, quando tratamos de ambientes computacionais, especialmente na área da computação gráfica, temos a possibilidade de controlar, modificar e reinterpretar essas cores digitalmente. Isso nos permite criar soluções que adaptem ou corrijam essas representações visuais, possibilitando que pessoas com deficiência na distinção de cores consigam perceber informações que, de outra forma, seriam inacessíveis.

A necessidade de filtros de correção de cores surge da limitação dos sistemas convencionais em oferecer suporte adequado a esses usuários, tornando fundamental o desenvolvimento de soluções personalizadas para acessibilidade digital. Com as técnicas corretas, é possível rearranjar intensidades, contrastes e combinações cromáticas de maneira que a informação visual se torne mais inclusiva e funcional para todos [4].

O projeto tem como objetivo desenvolver um filtro de imagem para computadores que corrija as cores do sistema RGB, sendo aplicado em tempo de execução, garantindo que qualquer alteração possa ser corrigida imediatamente na tela visível. Assim, facilitando a percepção para pessoas com deficiência na distinção de cores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O daltonismo, condição visual caracterizada pela dificuldade em distinguir certas cores, pode ser classificado em três principais grupos de acordo com o número de fotorreceptores e seu funcionamento: tricromacia anômala, dicromacia e monocromacia [5]. Na tricromacia anômala, os três tipos de cones estão presentes, porém um deles possui uma sensibilidade espectral alterada resultando em alterações sutis na percepção de cores [6].

Essas alterações podem ser nomeadas de Protanomalia, onde a sensibilidade se encontra nos cones sensíveis ao vermelho, Deuteranomalia, onde a sensibilidade se encontra nos cones sensíveis ao verde e Tritanomalia, onde a sensibilidade se encontra nos cones sensíveis ao azul. A Figura 1¹ possui a representação dessa visão.

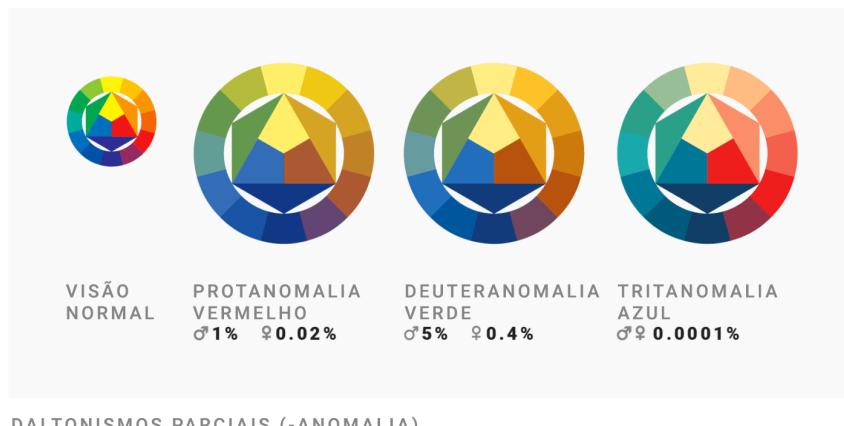


Figura 1 – Representação da tricromacia anômala e porcentagem de gênero afetada.

Já na dicromacia, apenas dois cones são funcionais, caracterizando o daltonismo total. Essas faltas podem ser nomeadas de protanopia, deuteranopia e tritanopia, onde existe a falta do cone vermelho, verde e azul, respectivamente² [7, 3], a Figura 3 ilustra a visão dos tipos de dicromacia. Esses distúrbios estão diretamente relacionados à ausência ou deficiência de um dos três tipos de cones na retina humana, sendo L(Large) para captação de frequências de ondas longas, M(Medium) para captação de frequências de ondas médias e S(Short) para captação de frequências de ondas curtas, afetando a percepção das cores em diferentes graus [8]. A Figura 2 apresenta a intensidade de resposta de cada cone de acordo com o comprimento de onda.

Por fim, na monocromacia, apenas um tipo dos cones é funcional, ou nenhum no caso de pessoas com acromatopsia completa, levando-as à ausência total de percepção cromática, com visão restrita apenas a variações de luminosidade.

¹<https://escoladedados.org>

²<https://www.saudebemestar.pt>

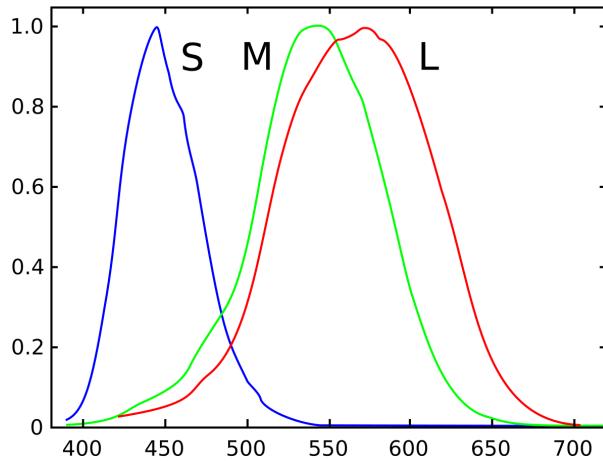


Figura 2 – Cones LMS distribuídos pela frequência.

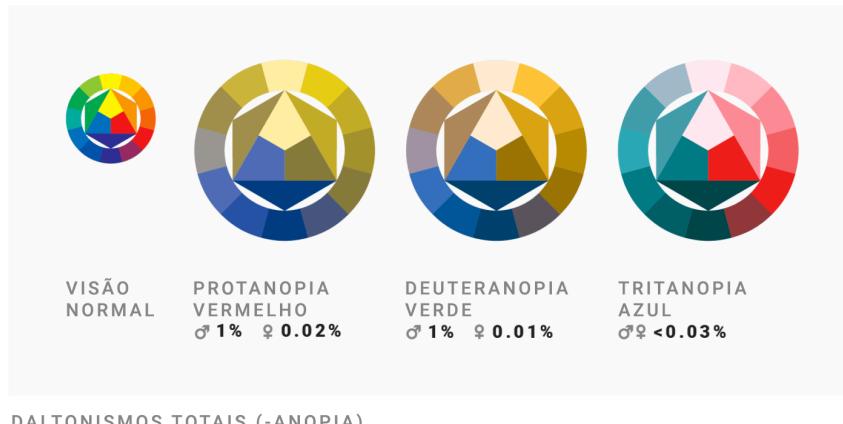


Figura 3 – Representação da dicromacia e porcentagem de gênero afetada.

A computação gráfica e o processamento de imagens desempenham um papel fundamental na manipulação visual e adaptação de conteúdos digitais para diferentes públicos. Técnicas de modificação de imagem em tempo real são amplamente utilizadas em aplicações como realidade aumentada, filtros de pós-processamento e acessibilidade visual.

Para que essa correção seja eficiente, é essencial compreender os modelos de cor utilizados na computação gráfica, como RGB e LAB [9], bem como os métodos de transformação entre esses espaços para ajustes perceptuais.

Além disso, o uso de aceleração via GPU é essencial para garantir que o processamento ocorra em tempo real, sem comprometer a experiência do usuário.

2.1 Técnicas Existentes

Algumas abordagens têm sido exploradas para corrigir cores em imagens e vídeos de forma a melhorar a percepção de indivíduos com daltonismo. Métodos tradicionais incluem o Daltonization³, técnica que mapeia cores problemáticas para tons mais facilmente

³<https://ixora.io>

distinguíveis dentro do espectro visível por daltônicos [10, 11]. Além disso, transformações de espaço de cor, como a conversão de RGB para LMS(Large, Medium, short), isto é, sistema que simula a resposta dos cones da retina, possibilitam ajustes mais precisos na percepção cromática [12].

Implementar tais métodos em tempo real exige o uso de técnicas otimizadas de processamento de imagem, como shaders gráficos em OpenGL/GLSL e computação paralela com CUDA ou OpenCL, que permitem a manipulação de pixels diretamente na GPU.

2.2 Implementação no Sistema Operacional

Para que o filtro desenvolvido funcione de forma global no sistema operacional, sem a necessidade de aplicação em um software específico, é crucial garantir que a correção cromática seja aplicada a todos os quadros exibidos na tela. Isso permite abranger todos os detalhes de imagem e realizar a correção em tempo real, proporcionando uma experiência visual fluida.

Para atingir esta operação global, é necessário implementar uma camada de sobreposição gráfica. No ambiente Windows, esse tipo de solução pode ser construído utilizando APIs como GDI+ e DirectX, em conjunto com OpenGL, permitindo a captura e modificação contínua dos quadros exibidos na tela.

Além disso, técnicas de composição gráfica são empregadas para assegurar que a sobreposição seja transparente e adaptável ao conteúdo original, evitando interferências na experiência do usuário. A eficiência do sistema dependerá diretamente da latência do processamento e do impacto no desempenho do computador, tornando essencial a otimização do código e o uso eficiente dos recursos de hardware, particularmente da GPU.

2.3 Estado da Arte

O estado da arte na área de acessibilidade visual e processamento de imagens em tempo real inclui diversas pesquisas e soluções já implementadas, como o modelo proposto por Brettel et al. [9] e suas variações, como a de Simon-Liedtke e Farup [13], que são amplamente utilizados para simular a visão dicromata. Esses modelos são essenciais tanto para a simulação quanto para métodos de aprimoramento de imagem.

O uso de LUTs para acelerar transformações de cores complexas é uma técnica consolidada na indústria, esta abordagem permite reduzir o processamento de correção, como o algoritmo Daltonization LMS, a uma única busca de textura com interpolação trilinear na GPU. Em cenários de alta resolução, isso pode gerar ganhos de velocidade de aproximadamente cem vezes [14].

Adicionalmente, o trabalho de Kotera [15] propõe um algoritmo de daltonização

baseado em *spectral shift* para indivíduos com discromatopsia, que busca maximizar a visibilidade e minimizar o “gap visual” em relação à visão normal. Este método demonstrou melhorias significativas na visibilidade de testes de Ishihara quando comparado a simuladores como o Vischeck.

O trabalho de Seo e Park [16] explora abordagens baseadas em aprendizado de máquina para adaptação de cores, propondo uma rede neural capaz de gerar imagens com cores corrigidas para pessoas daltônicas. Tais métodos também podem ser aplicados nos estudos de Interação Humano-Computador [17].

Embora soluções nativas, como os filtros de cor do Windows 10, ofereçam suporte básico [18, 19], seu impacto é restrito, justificando a proposta de um sistema mais robusto, flexível e perceptualmente eficaz.

Diante desse cenário, há desafios significativos a serem superados, como a necessidade de balancear qualidade visual e eficiência computacional. Assim, este projeto propõe uma solução que alia técnicas tradicionais de correção de cores com processamento otimizado para viabilizar uma aplicação eficiente e acessível para usuários com deficiência na distinção de cores.

2.4 Alteração e Simulação de Cores em Sistemas Computacionais

A manipulação de cores no ambiente computacional é uma etapa fundamental para o desenvolvimento de soluções de acessibilidade visual. Diferentes modelos de cor representam diferentes formas de interpretar e transformar dados visuais. O modelo Red, Green, Blue(RGB) é utilizado em telas e dispositivos emissores de luz, sendo baseado no conceito de cor-luz. Já o modelo Cyan, Magenta, Yellow(CMY), utilizado em impressões, parte do conceito de cor-pigmento, ou seja, a absorção seletiva de luz refletida.

Para alterar cores digitalmente, é necessário compreender como os dados de cor são estruturados e como podem ser convertidos entre diferentes modelos. Por exemplo, a conversão de RGB para HSL facilita alterações na tonalidade sem interferir diretamente no brilho da imagem. Já transformações entre RGB e LMS são úteis quando se deseja simular a percepção visual humana, especialmente em casos de daltonismo [20].

Além disso, algoritmos de correção cromática costumam atuar diretamente sobre os componentes de cor após essa conversão, aplicando compensações específicas de acordo com a deficiência visual simulada. A compreensão dessas transições entre modelos de cor é essencial para garantir uma representação fiel e acessível das imagens processadas.

Segundo Rocha [21], entender as diferenças entre modelos aditivos (como RGB) e subtrativos (como CMY) permite não apenas a correta representação visual das cores, mas

também sua manipulação adequada em diferentes dispositivos e contextos computacionais.

2.4.1 Espaço de Cor RGB

O modelo RGB é o espaço de cor mais amplamente utilizado em dispositivos digitais, como monitores, câmeras e telas, por ser baseado no princípio da síntese aditiva de luz. Neste modelo, as cores são formadas pela combinação de três componentes primárias: vermelho, verde e azul, cada uma variando em intensidade de 0 a 255 em sistemas de 8 bits por canal [9, 22]. A Figura 4 ilustra a composição do espaço RGB através de um cubo tridimensional, onde cada eixo representa uma das componentes primárias.

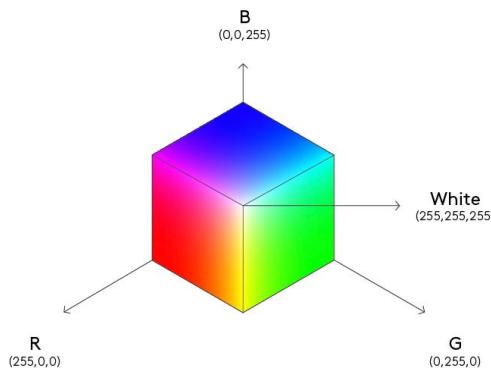


Figura 4 – Espaço de cor RGB

2.4.2 Espaço de Cor CIELAB (LAB)

O espaço de cor CIELAB, também conhecido simplesmente como LAB, foi desenvolvido pela Comissão Internacional de Iluminação(CIE)⁴, com o objetivo específico de criar um modelo perceptualmente uniforme, isto é, um espaço onde distâncias euclidianas correspondem aproximadamente a diferenças perceptuais de cor para o observador humano [22, 23].

O LAB é composto por três componentes: “L” sendo luminosidade, variando entre 0 (preto) e 100 (branco), representando o brilho. A letra “a” representando o eixo verde-vermelho, variando de valores negativos que representam o verde para valores positivos que representam o vermelho. A letra “b” representando o eixo azul-amarelo, variando de valores negativos que representam o azul para valores positivos que representam o amarelo. A Figura 5 ilustra a estrutura tridimensional do espaço LAB.

⁴<https://cie.co.at>

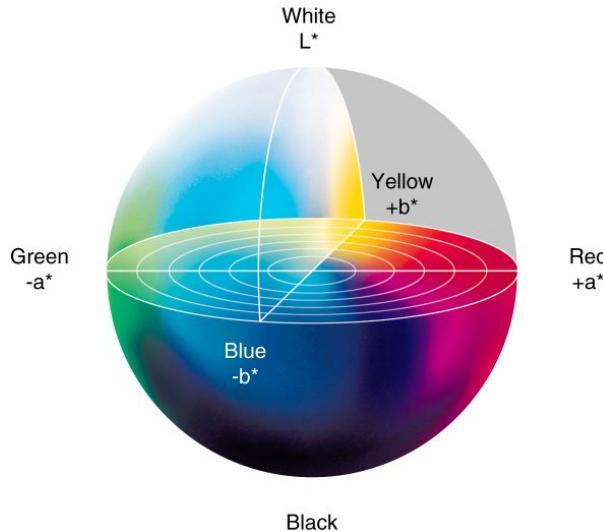


Figura 5 – Espaço de cor LAB

2.5 Algoritmo de Daltonização LMS

O algoritmo de Daltonização LMS é um método de processamento digital de imagens utilizado para ajustar cores, visando melhorar a percepção de indivíduos com deficiência na distinção de cores, especialmente dicromatas, como protanopia e deuteranopia [11, 24].

O método é fundamentado no espaço LMS por ser mais adequado para modelar o comportamento da recepção de luz do olho humano [3]. Funcionando em duas etapas, onde a primeira é simulação, que determina qual informação de cor está sendo perdida, ou confusa, e a segunda, correção, que irá ajustar a cor original baseando-se na informação perdida.

A primeira etapa irá simular como a pessoa daltônica percebe a imagem. Convertendo a imagem de entrada de RGB para LMS através de uma multiplicação matricial linear.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = T_{\text{RGB} \rightarrow \text{LMS}} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.8824 & 43.5161 & 4.1194 \\ 3.4557 & 27.1554 & 3.8671 \\ 0.0300 & 0.1843 & 1.4671 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Esta operação é realizada em cada pixel da imagem. A matriz de transformação $T_{\text{RGB} \rightarrow \text{LMS}}$ é derivada de estudos que mapeiam as coordenadas cromáticas para as respon-

tas dos cones [9]. Procede-se a remoção ou remapeamento da informação correspondente ao cone ausente ou deficiente. Para indivíduos deuteranópicos, a informação associada ao cone M é percebida como informação dos cones L e S, alcançado por multiplicação matricial linear que gera a visão simulada L_{Deut} , M_{Deut} , S_{Deut} [3].

$$\begin{bmatrix} L_{Deut} \\ M_{Deut} \\ S_{Deut} \end{bmatrix} = T_{DIC} \times \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} L_{Deut} \\ M_{Deut} \\ S_{Deut} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.4942 & 0 & 1.2483 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

A imagem simulada no espaço LMS é convertida de volta para o RGB usando a matriz inversa da conversão inicial $T_{RGB \rightarrow LMS}^{-1}$. Esta é a imagem tal como seria vista pelo dicromata.

$$\begin{bmatrix} R_{Inv} \\ G_{Inv} \\ B_{Inv} \end{bmatrix} = T_{RGB \rightarrow LMS}^{-1} \times \begin{bmatrix} L_{Deut} \\ M_{Deut} \\ S_{Deut} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} R_{Inv} \\ G_{Inv} \\ B_{Inv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0809 & -0.1305 & 0.1167 \\ -0.0102 & 0.0540 & -0.1136 \\ -0.0004 & -0.0041 & 0.6935 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{Deut} \\ M_{Deut} \\ S_{Deut} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

A segunda etapa irá fazer a diferença entre a imagem original e a imagem simulada para ajustar as cores, tornando as distinções visíveis para o dicromata através de um cálculo da Informação Perdida.

$$InformaçãoPerdida = ImagemOriginal - ImagemSimulada \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} R_{Perdida} \\ G_{Perdida} \\ B_{Perdida} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{Inv} \\ G_{Inv} \\ B_{Inv} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A informação perdida é modificada e mapeada para os comprimentos de onde que o dicromata ainda é capaz de perceber. Isso é feito aplicando uma matriz de modificação M à informação perdida.

$$\begin{bmatrix} R_{map} \\ G_{map} \\ B_{map} \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} R_{Perdida} \\ G_{Perdida} \\ B_{Perdida} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A matriz M é crucial para realocar o contraste perdido nas regiões do espectro onde o dicromata pode discriminá-lo [25]. Os valores mapeados são somados aos valores da imagem original para produzir a imagem ajustada, neste caso a imagem daltonizada.

$$\begin{bmatrix} R_{Ajustado} \\ G_{Ajustado} \\ B_{Ajustado} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{Original} \\ G_{Original} \\ B_{Original} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{map} \\ G_{map} \\ B_{map} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Após a aplicação do algoritmo, a imagem resultante apresenta as tonalidades de vermelho e verde com maior saturação, de modo a compensar a deficiência perceptiva típica da deuteranopia.

3 MÉTODO DE PESQUISA

O trabalho teve como objetivos investigar e definir modelos de correção de cores fundamentados em pesquisas sobre o daltonismo e seus diferentes tipos, analisando como essas deficiências se relacionam com os princípios da computação gráfica e com as transformações entre espaços de cor.

Por fim, objetivou-se validar a eficiência do sistema proposto por meio da comparação de métricas objetivas, como tempo de processamento, fidelidade na transformação das cores e impacto na performance, assegurando que a solução apresentada mantivesse um equilíbrio entre precisão perceptual e viabilidade computacional.

Os métodos adotados possuem foco no desenvolvimento e sequência lógica de execução do filtro, priorizando a execução em tempo real e estado de correção para indivíduos com a Deuteranopia. Onde o sistema deve inicializar com pré-processamento fazendo uma configuração do ambiente gráfico e carregando a tabela de busca LUT. Seguido da aquisição dos quadros através de uma captura de tela e atualizando o *framebuffer* do sistema operacional. Finalizando com o processamento pelo *shader* dos dados obtidos das etapas anteriores e renderizando o quadro filtrado, assim o exibindo na tela.

3.1 Inicialização

Através do uso da biblioteca GLFW, para criar uma janela onde será aplicado o filtro, a aplicação é configurada para total anonimização, onde ela aparecerá sem bordas, transparente e flutuante. Essa configuração é essencial para que o filtro se integre ao sistema operacional como uma sobreposição gráfica que atua de forma global. Comandos globais são configurados para controle da execução, como ativação ou troca de modelo do filtro.

A configuração do OpenGL também é inicializada nesta etapa para que possa ser utilizado, nas próximas etapas, o *shader* e a aceleração por GPU. Seguindo do carregamento da tabela LUT pré-processada presente como arquivo de imagem.

3.2 Captura e Atualização de Quadros

A captura é inicializada passando as métricas de tela e os contextos de dispositivos presentes, uma *thread* é executada e configurada para que o processamento haja em prioridade máxima, garantindo um execução com latência mínima visando alcançar uma captura continua sem efeitos de *flickering*.

Com a interceptação do *framebuffer* através de APIs gráficas, é realizado uma cópia de bloco de bits do contexto de dispositivo de tela para o contexto de memória, além, também, da extração dos dados brutos de pixel do *bitmap* de memória para preencher um *buffer* temporário. A captura é feita primeiro, antes de qualquer processamento.

Após adquirir estes dados, as informações são redirecionadas para um *buffer* de leitura que será utilizado pelo OpenGL para a aplicação do *shader*.

3.3 Aplicação e Processamento na GPU

O *shader* possui dois métodos integrados, sendo eles a tabela LUT e o algoritmo Daltonization LMS, através de comandos globais anteriormente configurados. O método selecionado, após seus cálculos, irá trazer o resultado do quadro capturado de forma corrigida, que então será desenhado em um *quad* que cobre toda a tela, utilizando a aceleração OpenGL.

A exibição da sobreposição é monitorada continuamente para resgate de dados de latência da execução do filtro, que serão utilizados com o objetivo de certificar que a execução está rodando em quantidade de QPS (Quadros por segundo) estável assim evitando o fenômeno de cintilação.

3.4 Métricas de Avaliação

Através dos dados provenientes do monitoramento de QPS, espera-se que o sistema alcance e mantenha uma taxa de quadros igual ou superior ao limiar de 15 QPS [26], assim operando de forma fluida sem causar desconforto visual perceptível.

Além disso, são utilizadas as fórmulas de distância CIEDE2000 e euclidiana para quantificar a magnitude das alterações cromáticas induzidas pelo filtro, esses resultados serão posteriormente comparados para certificar a eficiência entre o método LUT e Daltonization LMS esperando resultados mais sucintos vindos do Daltonization LMS. O método LUT, embora mais rápido, deve demonstrar uma leve perda de fidelidade cromática.

Por fim, é proposto uma comparação utilizando imagens, onde a visualização original e a filtrada são comparadas com uma simulação do que a pessoa dicromata deveria perceber. Os resultados devem apresentar um diferença perceptível sendo possível ver a área afetada pelos métodos utilizados.

4 EXPERIMENTOS

Usando a ferramenta de monitoramento de QPS em um notebook, é possível atestar as diferenças em momentos onde o computador estava carregando na tomada, momento esse que teria a maior eficiência energética e traria melhor performance, fora da tomada e em modo de economia de energia, onde espera-se que o filtro funcione de forma menos aprimorada, porém alcançando o objetivo de evitar *flickering*, condição onde existe uma cintilação do brilho de uma tela que causa alterações na luz emitida pela tela de um monitor¹ [27]. A Figura 6 demonstra a variação do QPS durante estes testes.

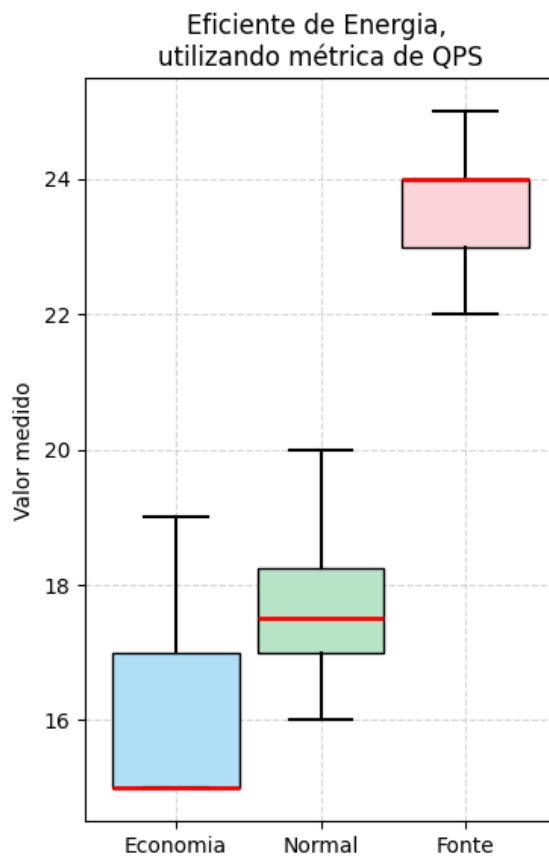


Figura 6 – Representação da diferença entre os QPS

Utilizando a distância euclidiana no espaço RGB, podemos avaliar a diferença entre a cor original e corrigida. Porém, por se tratar de um espaço linear, essa métrica não reflete com precisão a percepção da visão humana. Assim, foi adotado o uso da métrica proposta pela CIE, o CIEDE2000(ΔE_{00}), que retorna uma diferença das cores em espaço CIELAB, espaço esse com o objetivo de simular a sensibilidade da visão humana,

¹<https://www.adrenaline.com.br>

permitindo equiparar essa distância com uma simulação das cores que a pessoa daltônica com nível de deuteranopia iria observar. A Figura 7² representa esse espaço de cor.

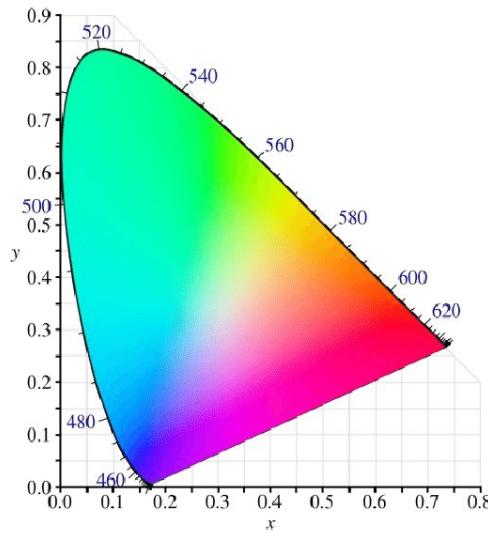


Figura 7 – Espaço de cores CIELAB

As Tabelas 1 e 2 possuem a primeira coluna com a cor original observada, a segunda coluna com o filtro aplicado, sendo a primeira tabela a equação LMS Daltonization e a segunda tabela a correspondência da LUT. A terceira e quarta coluna de ambas representam as distâncias medidas através da distância euclidiana RGB e CIEDE2000, respectivamente. Permitindo, assim, ver a diferença de impacto entre as duas abordagens utilizadas.

Tabela 1 – Comparaçāo utilizando método LMS Daltonization

Cor RGB	Cor RGB filtro ativo	Dist. Euclidiana	Dist. CIEDE2000
RGB(191, 6, 253)	RGB(255, 6, 219)	72,4707	13,4703
RGB(0, 255, 163)	RGB(0, 255, 210)	47	9,44748
RGB(43, 108, 255)	RGB(10, 108, 255)	33	1.32652
RGB(255, 0, 139)	RGB(255, 0, 92)	47	10,699
RGB(253, 197, 20)	RGB(255, 197, 10)	10,198	0,495232
RGB(0, 252, 210)	RGB(0, 252, 255)	45	13,1957

²<https://www.datacolor.com>

Tabela 2 – Comparaçāo utilizando mētodo LUT

Cor RGB	Cor RGB filtro ativo	Dist. Euclidiana	Dist. CIEDE2000
RGB(191, 6, 253)	RGB(228, 10, 238)	40,1248	7,43001
RGB(0, 255, 163)	RGB(0, 252, 194)	31,1448	6,38149
RGB(43, 108, 255)	RGB(0, 109, 254)	43,0232	1,73374
RGB(255, 0, 139)	RGB(255, 4, 83)	56,1427	12,9826
RGB(253, 197, 20)	RGB(255, 195, 0)	20,199	1,00814
RGB(0, 252, 210)	RGB(0, 249, 232)	22,2036	6,8539

A Figura 8 apresenta um experimento equiparando as imagens produzidas pela correção aplicada, juntamente de uma reprodução simulada da visão de um individuo deuteranópico.

Onde a Figura 8a apresenta a imagem original sem filtro aplicado, Figura 8b aplicação do filtro com o mētodo LUT e a Figura 8c com a aplicação do filtro com o algoritmo de daltonização LMS. Jā as Figuras 8d, 8e e 8f apresentam as figuras citadas, respectivamente, com a simulação da visão de um deuteranópico.

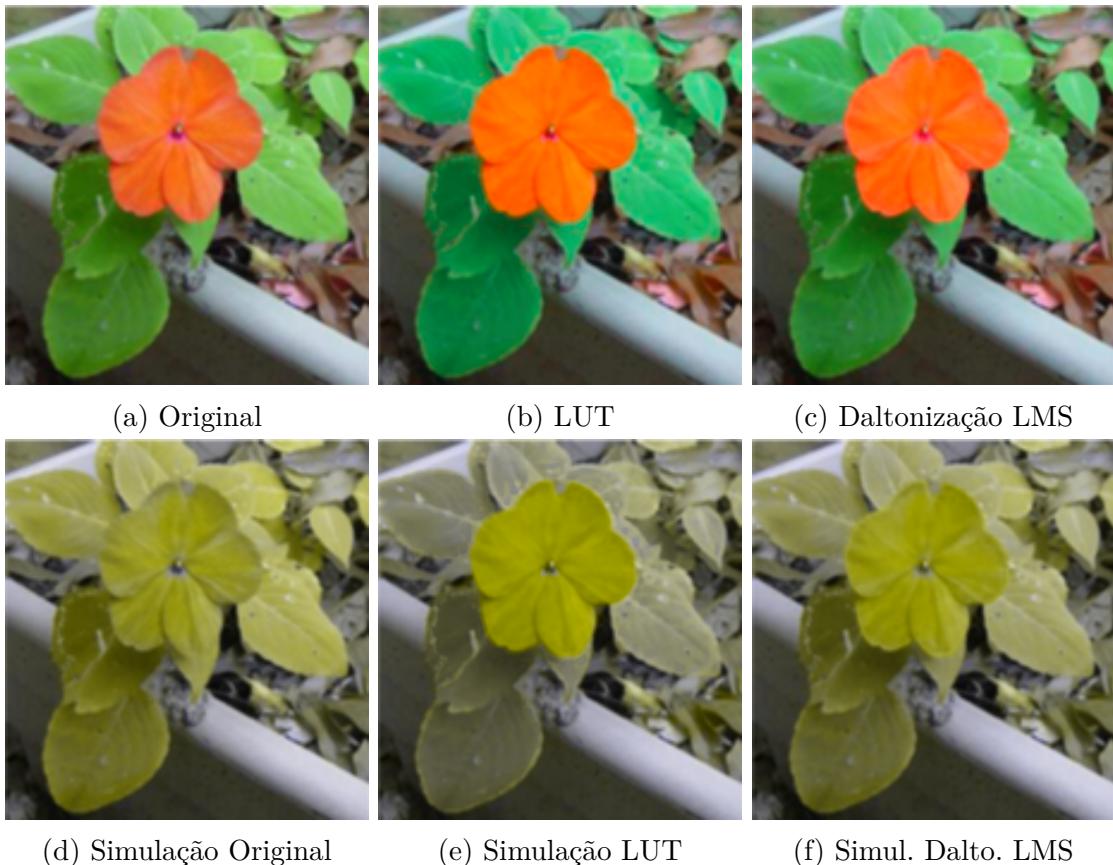


Figura 8 – Resultados da aplicāo do filtro.

4.1 Limitações

Algumas limitações do sistema foram identificadas, as quais podem impactar o uso geral da ferramenta. O filtro foi testado nos sistemas operacionais Windows 10 e Windows 11, que apresentaram comportamentos distintos quanto à sobreposição gráfica da aplicação.

O principal fator relacionado a essas diferenças está no processo de captura de tela, implementado com o uso da API GDI+, tecnologia da Microsoft que disponibiliza classes para manipulação e renderização de elementos gráficos ³.

Durante os testes, observou-se que a modificação visual não era aplicada quando certos elementos da interface do sistema operacional eram acionados, como no caso da troca de janelas por meio dos comandos de alternância do Windows.

Esse comportamento foi perceptível em ambas as versões do sistema. Entretanto, de forma específica no Windows 10, a sobreposição do filtro era temporariamente desativada, sendo necessário reativar o foco da janela da aplicação para que o efeito voltasse a ser exibido.

³<https://learn.microsoft.com>

5 RESULTADOS

Um dos principais aspectos avaliados foi a capacidade do sistema de operar em tempo real sem causar desconforto visual ao usuário. Para isso, utilizou-se uma ferramenta de monitoramento de QPS como indicador de desempenho.

A Figura 6 apresenta os valores de QPS obtidos durante a execução do filtro em diferentes condições de energia do dispositivo, comparando três cenários: dispositivo conectado à tomada, desconectado da tomada e em modo de economia de energia.

Com o valor de 15 QPS sendo considerado o limiar para evitar o efeito de cintilação, o sistema alcançou mediana próxima e valores superiores a esse limiar em todos os cenários testados, indicando que o filtro é capaz de operar em tempo real sem causar desconforto visual perceptível. Mesmo em modo de economia de energia, onde se espera uma performance reduzida, o sistema manteve-se acima do limite estabelecido, comprovando sua viabilidade para uso contínuo.

Para avaliar a precisão das transformações cromáticas realizadas pelos dois métodos implementados, LUT e Daltonization LMS, foram utilizadas duas métricas de distância: euclidiana no espaço RGB e CIEDE2000 no espaço CIELAB.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados das transformações cromáticas aplicadas por ambos os métodos. Ao comparar as duas tabelas, observa-se que o método baseado em LUT apresenta uma leve perda de fidelidade cromática quando comparado ao algoritmo Daltonization LMS, conforme evidenciado pelos valores de CIEDE2000 na quarta coluna de ambas. O algoritmo Daltonization LMS demonstra maior precisão na representação das transformações, pois opera diretamente sobre os valores espectrais de cada pixel através de cálculos matriciais em tempo de execução.

Por outro lado, o método LUT, que utiliza tabelas de busca pré-calculadas, apresenta distâncias cromáticas ligeiramente superiores em alguns casos. Entretanto, essa diferença não se mostra significativa a ponto de comprometer a percepção visual ou a utilidade prática do filtro. As variações observadas mantêm-se dentro de limites aceitáveis para aplicações de acessibilidade, considerando que o objetivo principal é tornar as distinções cromáticas perceptíveis para indivíduos com deuteranopia, e não reproduzir cores com exatidão absoluta.

Embora o método Daltonization LMS seja mais preciso, ele implica maior custo computacional, pois requer múltiplas operações matriciais por pixel em tempo de execução. O método LUT, por utilizar tabelas pré-calculadas, reduz significativamente o tempo de processamento, permitindo acesso direto aos valores corrigidos através de interpolação trilinear da GPU.

Considerando o objetivo de operação em tempo real, o método LUT demonstra-se uma alternativa altamente eficiente. Mesmo com uma pequena redução na exatidão das cores, os resultados visuais ainda se mostram satisfatórios para uso prático, representando um equilíbrio adequado entre qualidade perceptual e desempenho.

Além das métricas quantitativas, foi realizada uma avaliação visual qualitativa para verificar a eficácia dos métodos na prática. A Figura 8 ilustra esta comparação.

Os resultados visuais demonstram que ambos os métodos são capazes de aumentar a distinção cromática em áreas que seriam problemáticas para pessoas com deuteranopia. Nas simulações, Figuras 8e e 8f, é possível observar que as imagens filtradas mantêm maior diferenciação cromática quando comparadas à simulação da imagem original, retratada na Figura 8a, validando a eficácia dos algoritmos propostos.

6 CONCLUSÃO

O filtro de correção cromática proposto alcançou o objetivo estabelecido de fornecer uma solução em tempo real para auxiliar indivíduos com deuteranopia na distinção de cores. Os resultados demonstram que o sistema é capaz de operar de forma fluida, mantendo taxas de quadros adequadas e aplicando correções cromáticas eficazes.

A análise comparativa entre os métodos LUT e Daltonization LMS revelou que, embora o método LMS ofereça maior precisão nas transformações cromáticas, o método LUT representa uma alternativa viável que equilibra qualidade perceptual e eficiência computacional. Essa característica torna o método LUT especialmente adequado para aplicação em tempo real.

Em ambos os casos, o uso de aceleração por GPU foi fundamental para viabilizar a operação em tempo real do sistema, demonstrando a importância da otimização computacional em soluções de acessibilidade digital.

6.1 Trabalhos futuros

Entre as limitações do projeto, destaca-se o foco exclusivo na deuteranopia, o que restringe sua aplicação a apenas um dos tipos de discromatopsia. Como perspectiva futura, pretende-se expandir o modelo de correção para abranger outras variações da condição, como protanopia e tritanopia, ajustando as matrizes de transformação e os parâmetros de daltonização para cada caso específico.

Por fim, mesmo que o método LUT apresente uma leve perda de fidelidade cromática em relação ao algoritmo LMS, seus resultados visuais ainda se mostram satisfatórios para o uso prático. Com otimizações adicionais, essa abordagem pode se consolidar como uma alternativa eficiente e de baixo custo computacional, especialmente para aplicações que exigem desempenho em tempo real.

REFERÊNCIAS

- [1] MAZUR, S. *Colour Vision Deficiencies in the Digital Age: A Survey of User Experiences with Digital Displays*. Dissertação (Mestrado) — University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, jul. 2024. Acesso em: 19 nov. 2025. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10012/20713>>.
- [2] ZHU, Z.; MAO, X. Image recoloring for color vision deficiency compensation: a survey. *The Visual Computer*, v. 37, n. 12, p. 2999–3018, dez. 2021. ISSN 1432-2315. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00371-021-02240-0>>.
- [3] LEE, J.; SANTOS, W. P. dos. An adaptive fuzzy-based system to simulate, quantify and compensate color blindness. *Integrated Computer-Aided Engineering*, v. 18, n. 1, p. 29–40, 2011. Acesso em: 14 nov. 2025. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3233/ICA-2011-0356>>.
- [4] CARNEIRO, M. P. d. G. *Simulações de daltonismo no desenvolvimento de jogos cromaticamente acessíveis para dispositivos móveis*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, 2024. Orientadora: Ticianne de Góis Ribeiro Darin. Co-orientador: Windson Viana de Carvalho. Acesso em: 21 nov. 2025. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/77124>>.
- [5] YANG, Z. et al. Dyschromatopsia: a comprehensive analysis of mechanisms and cutting-edge treatments for color vision deficiency. *Frontiers in Neuroscience*, Volume 18 - 2024, 2024. ISSN 1662-453X. Acesso em: 20 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2024.1265630>>.
- [6] NEITZ, M.; NEITZ, J. Molecular genetics of color vision and color vision defects. *Archives of Ophthalmology*, v. 118, n. 5, p. 691–700, 05 2000. ISSN 0003-9950. Acesso em: 14 nov. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1001/archopht.118.5.691>>.
- [7] HASROD, N.; RUBIN, A. Defects of colour vision: A review of congenital and acquired colour vision deficiencies. *African Vision and Eye Health*, AOSIS Publishing, v. 75, n. 1, p. a365, 2016. Licensed under Creative Commons Attribution 4.0. Acesso em: 18 nov. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.4102/aveh.v75i1.365>>.
- [8] FOSTER, D. Chromatic function of the cones. In: *Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*. Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-809324-5. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128093245013249>>.
- [9] BRETEL, H.; VIÉNOT, F.; MOLLON, J. D. Computerized simulation of color appearance for dichromats. *J. Opt. Soc. Am. A*, Optica Publishing Group, v. 14, n. 10, p. 2647–2655, Oct 1997. Acesso em: 14 nov. 2025. Disponível em: <<https://opg.optica.org/josaa/abstract.cfm?URI=josaa-14-10-2647>>.
- [10] GREEN, P.; NUSSBAUM, P. Daltonization by spectral filtering. *Electronic Imaging*, v. 32, n. 15, p. 237–1–237–1, 2020. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://library.imaging.org/ei/articles/32/15/art00014>>.

- [11] MUHAMMAD, A. B. et al. Analysis of lms daltonization algorithm for adjusting image color for deutanopia. *Zaria Journal of Electrical Engineering Technology*, v. 9, n. 1, p. 128–134, 2020. Acesso em: 17 nov. 2025. Disponível em: <<https://journals.abu.edu.ng/index.php/zjeet/article/view/449>>.
- [12] MACHADO, G. M.; OLIVEIRA, M. M.; FERNANDES, L. A. F. A physiologically-based model for simulation of color vision deficiency. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 15, n. 6, p. 1291–1298, 2009. Acesso em: 14 nov. 2025. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5290741>>.
- [13] SIMON-LIEDTKE, J. T.; FARUP, I. Using a behavioral match-to-sample method to evaluate color vision deficiency simulation methods. *Color and Imaging Conference*, v. 24, n. 1, p. 106–106, 2016. Acesso em: 17 nov. 2025. Disponível em: <<https://library.imaging.org/cic/articles/24/1/art00018>>.
- [14] SELAN, J. Using lookup tables to accelerate color transformations. In: PHARR, M.; FERNANDO, R. (Ed.). *GPU Gems 2: Programming Techniques for High-Performance Graphics and General-Purpose Computation*. Addison-Wesley Professional, 2005. cap. 24, p. 381–392. ISBN 0-321-33559-7. Acesso em: 20 nov. 2025. Disponível em: <<https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems2/part-iii-high-quality-rendering/chapter-24-using-lookup-tables-accelerate-color>>.
- [15] KOTERA, H. Optimal daltonization by spectral shift for dichromatic vision. *Color and Imaging Conference*, v. 20, n. 1, p. 302–302, 2012. Acesso em: 21 nov. 2025. Disponível em: <<https://library.imaging.org/cic/articles/20/1/art00054>>.
- [16] SEO, S.; PARK, J. *Color Universal Design Neural Network for the Color Vision Deficiencies*. 2025. Acesso em: 20 nov. 2025. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2502.08671>>.
- [17] RIBEIRO, M. M. G. *Adaptive Methods for Color Vision Impaired Users*. Tese (Doutoramento em Engenharia Informática) — Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, jul. 2017. Orientador: Abel João Padrão Gomes. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.6/4777>>.
- [18] PAIVA, I.; SIQUEIRA, S.; FERREIRA, S. O recurso de filtro de cores do windows 10 como auxílio para daltônicos no uso de sites. In: *Anais do XX Simpósio Brasileiro sobre Fatores Humanos em Sistemas Computacionais*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2021. ISSN 0000-0000. Acesso em: 18 nov. 2025. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/ihc/article/view/19378>>.
- [19] VIOLATO, J. P. *Real-Time computer game recoloring for dichromats*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2022. Orientador: Manuel Menezes de Oliveira Neto. Acesso em: 17 nov. 2025. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/277375>>.
- [20] PAULA, J. B. D. *Converting RGB Images to LMS Cone Activations*. [S.l.], 2006. Technical Report 06-49. Acesso em: 19 nov. 2025. Disponível em: <<http://www.cs.utexas.edu/users/ai-lab?depaula:utcstr06-49>>.

- [21] ROCHA, J. C. Cor luz, cor pigmento e os sistemas rgb e cmy. *Revista Belas Artes*, v. 3, n. 2, dez. 2023. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <<https://revistas.belasartes.br/revistabelasartes/article/view/195>>.
- [22] PATRIA, A. D. *Hyperspectral colour imaging and spectrophotometric instrumentation*. Tese (Doutorado) — Università degli Studi di Parma, Parma, Itália, 2013. UNITesi deposit. Acesso em: 14 nov. 2025. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/20.500.14242/271496>>.
- [23] FARUP, I. A computational framework for colour metrics and colour space transforms. *PeerJ Computer Science*, PeerJ Inc., v. 2, p. e48, 2016. Acesso em: 19 nov. 2025. Disponível em: <<https://peerj.com/articles/cs-48>>.
- [24] ELREFAEI, L. A. Smartphone based image color correction for color blindness. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, v. 12, n. 3, p. pp. 104–119, Jul. 2018. Acesso em: 19 nov. 2025. Disponível em: <<https://online-journals.org/index.php/i-jim/article/view/8160>>.
- [25] DOLIOTIS, P. et al. Intelligent modification of colors in digitized paintings for enhancing the visual perception of color-blind viewers. In: ILIADIS et al. (Ed.). *Artificial Intelligence Applications and Innovations III*. Boston, MA: Springer US, 2009. p. 293–301. ISBN 978-1-4419-0221-4. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-0221-4_35>.
- [26] SALCHOW, C. et al. Rod driven frequency entrainment and resonance phenomena. *Frontiers in Human Neuroscience*, Frontiers Media SA, v. 10, p. 413, 2016. ISSN 1662-5161. Acesso em: 18 nov. 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00413>>.
- [27] MANKOWSKA, N. D. et al. Critical flicker fusion frequency: A narrative review. *Medicina (Kaunas)*, MDPI, Basel, Switzerland, v. 57, n. 10, p. 1096, 2021. ISSN 1648-9144. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34684133/>>.