



Universidade Federal do ABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Bacharelado em Engenharia de Informação

Mapeamento de componentes cromáticos em notas musicais

Beatriz Grassi Pereira
Caio Henrique Falcheti Nunes

Santo André - SP
Abril, 2026

**Beatriz Grassi Pereira
Caio Henrique Falcheti Nunes**

Mapeamento de componentes cromáticos em notas musicais

Trabalho de Graduação apresentado ao curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Informação.

Universidade Federal do ABC – UFABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas

Orientador: Kenji Nose Filho

Santo André - SP
Abril, 2026

RESUMO

Este trabalho de graduação busca desenvolver uma aplicação capaz de transformar cores em sons, criando uma ponte entre a visão e a audição. A proposta parte de fundamentos físicos e computacionais, como o estudo das frequências de luz no espectro visível e dos modelos digitais de cor (RGB e HSL), para traduzir essas informações em estímulos sonoros audíveis. A ideia é mapear características cromáticas em parâmetros sonoros, como frequência, timbre e intensidade, utilizando técnicas de processamento de sinais e síntese digital. Dessa forma, pretende-se construir uma representação perceptível e consistente das cores no domínio sonoro. Além do aspecto técnico, o projeto tem forte relevância social e cultural. Ele pode contribuir para a acessibilidade, oferecendo a pessoas com deficiência visual uma nova forma de perceber e diferenciar cores. Também abre possibilidades em áreas como a educação, ao estimular experiências multissensoriais que enriquecem a aprendizagem, e nas artes, ao explorar a integração entre sons e cores em processos criativos. Mais do que uma solução prática, a pesquisa propõe uma nova metodologia, na qual cores e sons dialogam para ampliar nossa maneira de interagir e compreender o mundo.

Palavras-chaves: Sonificação; Comunicação multimodal; Modelos digitais de cor; Processamento digital de sinais; Acessibilidade.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to develop an application capable of transforming colors into sounds, creating a bridge between vision and hearing. The proposal is based on physical and computational principles, such as the study of light frequencies within the visible spectrum and digital color models (RGB and HSL), in order to translate this information into audible sound stimuli. The idea is to map chromatic characteristics into sound parameters such as frequency, timbre, and intensity, using signal processing and digital synthesis techniques. In this way, the work seeks to build a perceptible and consistent representation of colors in the auditory domain. In addition to its technical aspects, the project holds strong social and cultural relevance. It may contribute to accessibility by providing visually impaired individuals with a new way of perceiving and distinguishing colors. It also opens possibilities in fields such as education, by promoting multisensory experiences that enhance learning, and in the arts, by exploring the integration of sound and color in creative processes. More than a practical solution, this research proposes a new methodology, in which colors and sounds interact to expand the way we perceive and understand the world.

Keywords: Sonification; Multimodal communication; Digital color models; Digital signal processing; Accessibility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Espectro eletromagnético mostrando as principais bandas de comprimento de onda e destaque à banda correspondente à luz visível. . .	4
Figura 2 – Diferentes formas de representação de uma imagem digital.	5
Figura 3 – Ilustração do processo de conversão analógica/digital de uma imagem. .	6
Figura 4 – Aquisição de imagens por arranjo de sensores.	7
Figura 5 – Decomposição de uma imagem colorida no modelo RGB.	8
Figura 6 – Representação vetorial de um pixel em uma imagem RGB a partir das componentes vermelho, verde e azul.	9
Figura 7 – Padrão de cor RGB	10
Figura 8 – Padrão de cor HSL.	12
Figura 9 – Divisão de frequências sonoras audíveis e inaudíveis para o ser humano.	14
Figura 10 – Círculo cromático HSL.	16
Figura 11 – A escala cromática padrão definida pelo semitom.	16
Figura 12 – Fluxograma de funcionamento do código.	21
Figura 13 – Escalas cromáticas criadas para testar o funcionamento do programa. .	27
Figura 14 – Interface do sistema em execução utilizando uma imagem estática como entrada, para a versão considerando 36 cores/frequências. . .	28
Figura 15 – Captura do funcionamento do sistema para cor Azul Ardósia (#4040BE). .	29
Figura 16 – Captura do funcionamento do sistema para cor Sienna (#BE4040). .	30
Figura 17 – Captura do funcionamento do sistema para cor Turquesa (#20E3DE). .	30
Figura 18 – Captura do funcionamento do sistema para cor Médio Turquesa (#40C1BE).	31
Figura 19 – Captura do funcionamento do sistema para cor Verde (#40BE40). .	31
Figura 20 – Captura do funcionamento do sistema para cor Verde Floresta (#206020). .	32
Figura 21 – Interface do sistema em execução utilizando captura de webcam como entrada.	32
Figura 22 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam como entrada com uma pequena variação do cursor em relação à Figura 21. .	33
Figura 23 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam sobre a cor Preta com matiz baixo.	33
Figura 24 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam sobre a cor Preta com matiz alta.	34
Figura 25 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 12 frequências para cor Chocolate (#DEB420).	35
Figura 26 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 12 frequências para cor Dourado (#E3DE20).	35

Figura 27 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 36 frequências para cor Amarelo Esverdeado (#7FBE40).	36
Figura 28 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 36 frequências para cor Azul Aço (#407FBE).	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	LUZ E PERCEPÇÃO DE COR	3
2.2	A IMAGEM COMO UM SINAL DIGITAL	4
2.2.1	Imagem digital como sinal bidimensional	5
2.2.2	Amostragem espacial e quantização	6
2.2.3	Representação matricial de imagens coloridas	7
2.2.4	Relação entre sinais visuais e auditivos	9
2.3	MODELOS DE COR	9
2.3.1	Modelo RGB	9
2.3.1.1	Representação Hexadecimal	10
2.3.2	Modelo BGR	11
2.3.3	Modelo HSL	12
2.3.3.1	Conversão de RGB/BGR para HSL	12
2.4	FUNDAMENTOS DO SOM	14
2.4.1	Mapeamento entre cores e notas musicais	15
2.5	COMUNICAÇÃO MULTIMODAL E SONIFICAÇÃO	17
2.6	PERCEPÇÃO HUMANA E PSICOFÍSICA	18
3	METODOLOGIA	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA	28
4.2	CENÁRIOS DE TESTES	29
4.2.1	Testes com imagens	29
4.2.2	Testes com captura de webcam	32
4.3	COMPORTAMENTO PARA TONS PRÓXIMOS AO BRANCO E AO PRETO	33
4.4	COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE MAPEAMENTO CROMÁTICO-SONORO	34
5	CONCLUSÕES	37
	REFERÊNCIAS	40
	APÊNDICE A – APÊNDICE 1	42

1 INTRODUÇÃO

A cor é um elemento essencial na comunicação humana e na forma como interagimos com o ambiente. Ela transmite informações, desperta emoções, organiza elementos visuais e, em muitos casos, serve como código para orientar ações e tomadas de decisão. Um bom exemplo são os semáforos, alertas visuais e interfaces digitais. Entretanto, para indivíduos com deficiência visual, a informação cromática não é diretamente acessível, criando barreiras de compreensão e interação com o mundo ao seu redor.

Esse problema torna-se ainda mais evidente em um cenário de crescente digitalização, no qual sistemas, aplicações e plataformas utilizam intensivamente elementos visuais para transmitir dados e guiar a experiência do usuário. Interfaces gráficas frequentemente empregam cores para diferenciar funções, indicar estados de operação ou destacar informações críticas. Em contextos educacionais, diagramas e gráficos coloridos são amplamente utilizados como recursos didáticos. No campo da arte e do design, as cores constituem parte fundamental da linguagem criativa. Dessa forma, a ausência de mecanismos que traduzam essa dimensão visual limita significativamente o acesso à informação.

Diante dessa lacuna, torna-se necessário explorar alternativas de representação de cores em outros canais sensoriais. Em especial, neste trabalho, será investigada a representação por meio da audição, visto que o sistema auditivo humano possui alta capacidade de processamento temporal e reconhecimento de padrões sonoros ([TERTO et al., 2011](#)). Essa característica abre caminho para o desenvolvimento de sistemas capazes de converter atributos visuais em estímulos auditivos de forma estruturada e interpretável.

No contexto da Engenharia de Informação, área caracterizada pela integração entre processamento de sinais, sistemas computacionais, análise de dados e interação humano-computador, esse desafio se apresenta como uma oportunidade de desenvolver soluções inovadoras baseadas na transformação e representação de dados entre diferentes domínios sensoriais. A proposta de converter informações visuais em estímulos auditivos dialoga diretamente com conceitos fundamentais da área, como processamento digital de sinais, modelagem matemática de sistemas e comunicação multimodal, reforçando o caráter interdisciplinar do curso de Engenharia de Informação da Universidade Federal do ABC.

A ideia de estabelecer correspondências entre cor e som não é inédita e tem sido explorada em diferentes contextos científicos e tecnológicos. Projetos como o *EyeMusic* ([ABBOUD et al., 2014](#)) propõem a conversão de imagens em sons para auxiliar pessoas com deficiência visual na percepção do ambiente. De forma semelhante, estudos na

área de sonificação investigam a transformação de dados visuais em representações auditivas com base em mapeamentos sistemáticos entre variáveis (HERMANN; HUNT; NEUHOFF, 2011). Além disso, abordagens contemporâneas em computação criativa e interação multimodal utilizam técnicas de síntese sonora para representar informações visuais em contextos educacionais, artísticos e científicos.

Nesse cenário, a proposta deste trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de traduzir cores em sons, estabelecendo uma correspondência perceptível e consistente entre estímulos visuais e auditivos. Diferentemente de abordagens puramente experimentais ou artísticas, este trabalho fundamenta-se em princípios físicos e matemáticos, utilizando modelos digitais de cor e técnicas de processamento de sinais para estruturar o mapeamento cromático-sonoro.

Essa abordagem apresenta relevância em múltiplos aspectos. No campo da acessibilidade, oferece uma ferramenta que amplia a autonomia e a qualidade de vida de pessoas cegas ou com baixa visão, permitindo a identificação e diferenciação de cores por meio da audição. No contexto da comunicação sensorial, o projeto contribui para a construção de uma possível “linguagem sonora das cores”, na qual propriedades cromáticas são associadas a parâmetros sonoros específicos, como frequência, timbre e intensidade. Além disso, a proposta dialoga com iniciativas de arte multimodal e educação multissensorial, ampliando as formas de interação entre usuários e sistemas computacionais.

Do ponto de vista científico e tecnológico, o desenvolvimento do sistema envolve a integração de conceitos de física da luz, modelos digitais de cor e fundamentos de acústica, aplicados por meio de técnicas de processamento digital de sinais. Modelos como RGB e HSL permitem quantificar atributos cromáticos de forma estruturada, enquanto técnicas de síntese sonora possibilitam gerar sinais auditivos consistentes a partir desses dados.

Ao transformar cores em sons de forma sistemática e interpretável, este trabalho busca não apenas oferecer uma solução prática para um problema real, mas também explorar novas possibilidades de interação humano-computador, nas quais a informação não está restrita a um único sentido, mas distribuída entre múltiplos canais perceptivos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica a seguir reúne os principais conceitos necessários para compreender o processo de conversão de informações cromáticas em sinais sonoros. Inicialmente, são apresentados os fundamentos físicos da luz e da percepção de cor. Em seguida, discute-se a imagem como um sinal digital, abordando sua representação matemática e computacional, com foco para o tratamento e extração de informações cromáticas. A partir dessa base, são apresentados os principais modelos de cor utilizados em sistemas digitais, que descrevem diferentes formas de interpretar os valores numéricos associados aos pixels de uma imagem. Por fim, são introduzidos os fundamentos do som, bem como conceitos de comunicação multimodal, sonificação e psicofísica, que sustentam a proposta de tradução entre os domínios visual e auditivo adotada neste trabalho.

2.1 LUZ E PERCEPÇÃO DE COR

A luz é uma forma de radiação eletromagnética que apresenta comportamento dual, podendo ser descrita tanto como forma de onda quanto como partícula (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Na descrição ondulatória, é composta por campos elétrico e magnético que se propagam perpendicularmente entre si e à direção do movimento, obedecendo às equações de Maxwell. O espectro eletromagnético abrange uma ampla gama de comprimentos de onda, desde as ondas de rádio, com extensões na ordem de quilômetros, até os raios gama, que possuem comprimentos da ordem de picômetros. Dentro desse espectro, a luz visível ocupa a faixa aproximada de 380–400 nm (violeta) a 700–740 nm (vermelho), percebida pelo olho humano graças à resposta espectral dos cones presentes na retina (NASSAU, 2001).

A relação entre comprimento de onda (λ) e frequência (f) é dada por:

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s). No intervalo visível, pequenas variações no comprimento de onda resultam em diferentes cores percebidas: ondas mais longas (625–740 nm) correspondem ao vermelho, ondas intermediárias (495–570 nm), ao verde e ondas mais curtas (380–450 nm), ao violeta (NASSAU, 2001), conforme ilustrado pela Figura 1.

Fisicamente, um menor comprimento de onda implica maior frequência e, portanto, maior energia por fóton, segundo a relação:

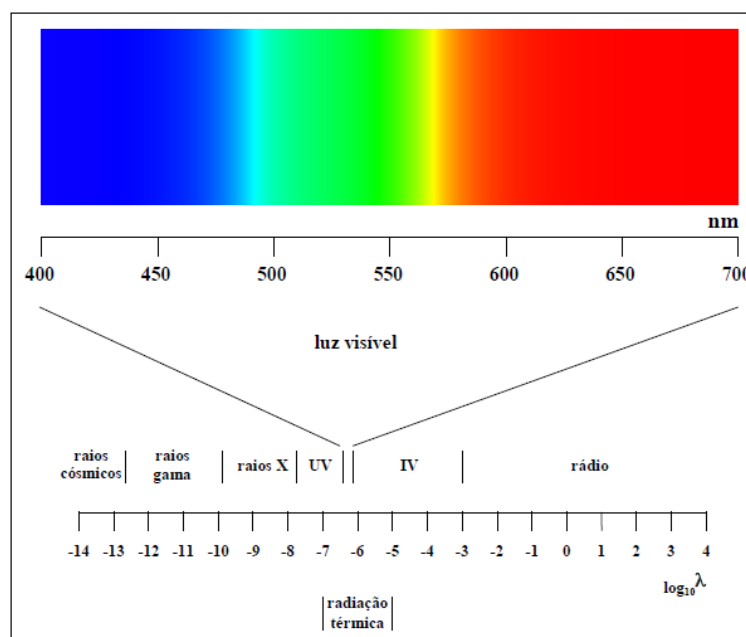
$$E = h \cdot f \quad (2.2)$$

onde h é a constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{34} \text{ J} \cdot \text{s}$). Assim, a transição do vermelho para o violeta no espectro visível representa um aumento gradual na frequência e na energia da radiação luminosa.

A percepção de cor é mediada pelos cones da retina, fotorreceptores especializados em diferentes faixas espectrais: cones S (*short*), mais sensíveis ao azul; cones M (*medium*), sensíveis ao verde; e cones L (*long*), sensíveis ao vermelho (PURVES et al., 2012). O padrão de ativação desses cones para um determinado comprimento de onda é processado pelo cérebro, originando a percepção consciente da cor. Quando a luz incidente muda de comprimento de onda, o padrão de estimulação também se altera, produzindo diferentes sensações cromáticas.

A diferença entre cores está diretamente ligada ao comprimento de onda da luz que atinge a retina. Ondas mais curtas e de maior frequência tendem a ser percebidas como cores frias (azul, violeta), enquanto ondas mais longas e de menor frequência são associadas a cores quentes (vermelho, laranja).

Figura 1 – Espectro eletromagnético mostrando as principais bandas de comprimento de onda e destaque à banda correspondente à luz visível.



Fonte: Lopes (2013, p. 4).

2.2 A IMAGEM COMO UM SINAL DIGITAL

No contexto do processamento digital de sinais, uma imagem pode ser formalmente interpretada como um sinal bidimensional discreto, no qual a informação visual é representada por valores numéricos organizados em uma estrutura espacial. Essa abordagem permite tratar imagens utilizando conceitos matemáticos similares aos aplicados a outros tipos de sinais, como os sinais de áudio, estabelecendo a base

conceitual necessária para a proposta deste trabalho (GONZALEZ; WOODS, 2008).

2.2.1 Imagem digital como sinal bidimensional

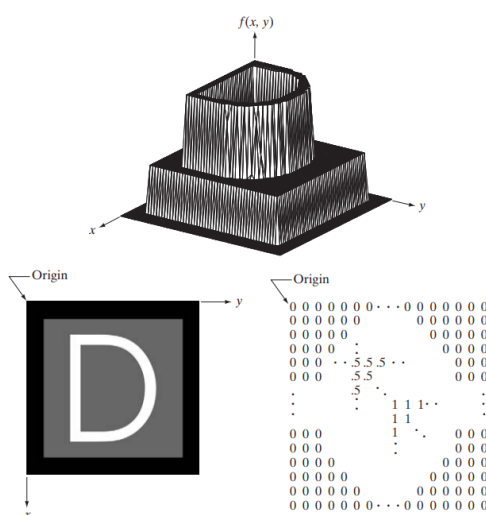
Uma imagem digital pode ser formalmente descrita como uma função bidimensional $f(x, y)$, na qual x e y representam as coordenadas espaciais, e o valor da função corresponde à intensidade luminosa ou à informação cromática associada a cada ponto. A partir dessa definição, a imagem pode ser representada de diferentes formas, conforme ilustrado na Figura 2.

A Figura 2(a) apresenta a imagem como uma superfície tridimensional, em que os eixos x e y definem a posição espacial e o eixo vertical representa os valores da função $f(x, y)$ (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Na Figura 2(b), a imagem é exibida na forma mais comum, equivalente à sua apresentação em monitores ou em impressões. Nessa representação, a intensidade de cada ponto é proporcional ao valor da função, permitindo a interpretação direta do conteúdo visual.

Por fim, a Figura 2(c) mostra a imagem como uma matriz bidimensional de valores numéricos, em que cada elemento corresponde ao valor da função em uma posição específica. Essa representação é fundamental para o processamento digital de imagens, pois possibilita a manipulação direta dos dados no ambiente digital.

Figura 2 – Diferentes formas de representação de uma imagem digital.



(a) Imagem representada como uma superfície tridimensional da função $f(x, y)$; (b) Imagem exibida como intensidade visual; (c) Imagem representada como uma matriz bidimensional de valores numéricos.

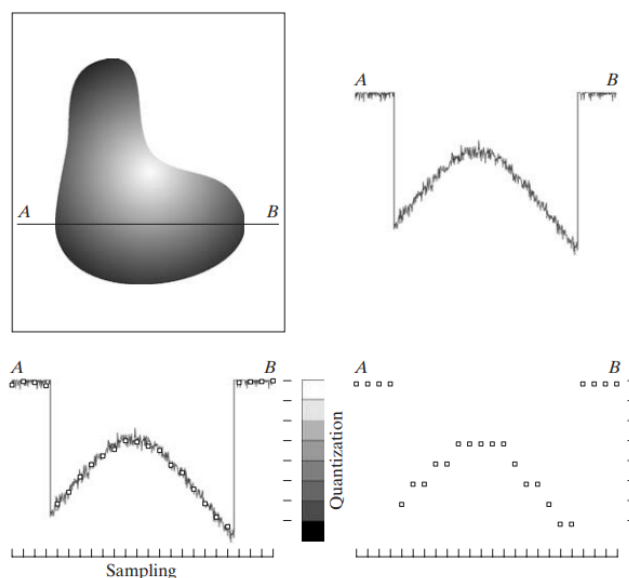
Fonte: Gonzalez e Woods (2008, p. 55)

2.2.2 Amostragem espacial e quantização

A conversão de uma imagem do mundo real para o domínio digital é realizada por meio de dois processos fundamentais: amostragem espacial e quantização. Uma imagem originalmente contínua, tanto nas coordenadas espaciais quanto nos valores de intensidade, deve ser amostrada e discretizada para possibilitar seu armazenamento e processamento digital.

A amostragem espacial consiste na discretização das coordenadas x e y , transformando o plano contínuo da imagem em uma grade finita de pixels. Já a quantização corresponde à discretização dos valores de intensidade associados a cada pixel, restringindo-os a um conjunto finito de níveis previamente definidos. Esses conceitos são ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração do processo de conversão analógica/digital de uma imagem.



(a) imagem analógica; (b) variação de intensidade ao longo de uma linha de varredura; (c) efeito da amostragem espacial (d) quantização dos níveis de intensidade e linha digital resultante

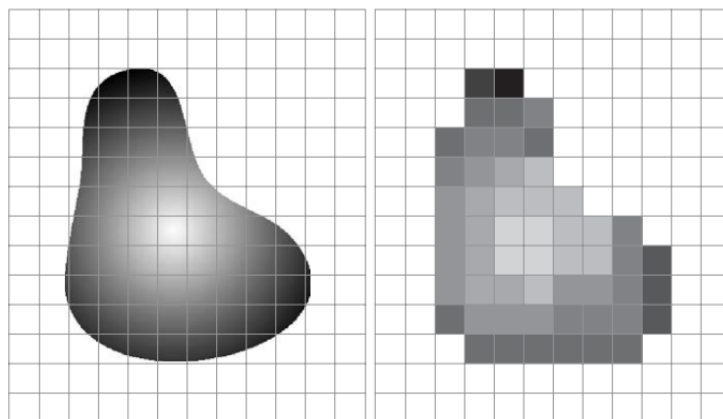
Fonte: [Gonzalez e Woods \(2008, p. 53\)](#)

Na Figura 3, observa-se inicialmente uma imagem analógica da qual é extraída uma linha de varredura. A variação de intensidade ao longo dessa linha evidencia que, apesar da discretização espacial realizada pela amostragem (*sampling*) em posições regulares, os valores de intensidade ainda pertencem a um intervalo contínuo. A quantização (*quantization*) atua, então, atribuindo a cada amostra um nível discreto de intensidade, resultando em um sinal digital composto exclusivamente por valores discretos. A repetição desse procedimento ao longo de toda a imagem permite a formação de uma representação digital bidimensional.

Na prática, o modo como a amostragem espacial é realizada depende do

sistema de aquisição de imagens empregado. Em sistemas baseados em arranjos bidimensionais de sensores, não há necessidade de movimento mecânico, sendo a resolução espacial determinada diretamente pela densidade de sensores nas direções horizontal e vertical. Esse processo é ilustrado na Figura 4, que mostra uma imagem analógica projetada sobre um sensor matricial e sua correspondente imagem digital após a aplicação da amostragem espacial e da quantização dos níveis de intensidade.

Figura 4 – Aquisição de imagens por arranjo de sensores.



(a) imagem contínua projetada sobre um sensor matricial; (b) imagem resultante após amostragem espacial e quantização.

Fonte: [Gonzalez e Woods \(2008, p. 54\)](#)

De modo geral, a qualidade de uma imagem digital está diretamente relacionada ao número de amostras espaciais e à quantidade de níveis de quantização adotados, além das características do conteúdo visual da cena observada.

2.2.3 Representação matricial de imagens coloridas

Do ponto de vista computacional, como visto anteriormente, uma imagem digital é representada como uma matriz bidimensional composta por pixels. No caso de imagens coloridas, cada pixel não é descrito por um único valor, mas por um conjunto de valores associados aos canais de cor que compõem o modelo adotado, como, por exemplo, no modelo RGB (*Red, Green, Blue*).

Nesse modelo, uma imagem colorida pode ser entendida como a combinação de três imagens monocromáticas correspondentes aos canais vermelho (R), verde (G) e azul (B). Cada canal armazena a intensidade da respectiva componente de cor em todas as posições espaciais da imagem. Essa decomposição é ilustrada na Figura 5, que apresenta uma imagem colorida original e suas respectivas componentes RGB, exibidas separadamente em tons de cinza.

Figura 5 – Decomposição de uma imagem colorida no modelo RGB.



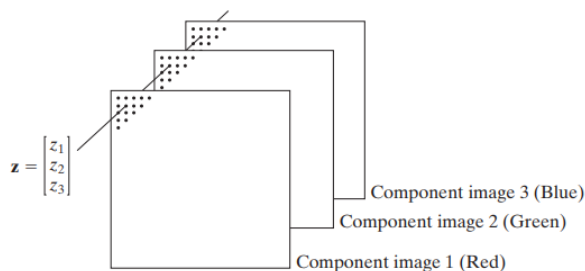
(a) imagem colorida original; (b) componentes da cor vermelho; (c) componentes da cor verde; (d) componentes da cor azul.

Fonte: [Gonzalez e Woods \(2008, p. 441\)](#)

A separação em canais de cores evidencia que cada componente contribui de forma distinta para a formação da imagem final, além de permitir o acesso independente às informações cromáticas, o que é fundamental para tarefas de processamento e análise de imagens.

Matematicamente, cada pixel de uma imagem RGB pode ser representado como um vetor tridimensional, cujos elementos correspondem às intensidades dos canais R, G e B naquela posição espacial. Assim, a imagem pode ser descrita como três matrizes bidimensionais de mesma dimensão, uma para cada canal de cor. A Figura 6 ilustra esse conceito, mostrando como os valores correspondentes de um mesmo pixel nos canais vermelho, verde e azul são agrupados para formar um vetor de cor.

Figura 6 – Representação vetorial de um pixel em uma imagem RGB a partir das componentes vermelho, verde e azul.



Fonte: [Gonzalez e Woods \(2008, p. 92\)](#)

Essa representação matricial e vetorial é amplamente utilizada em bibliotecas de visão computacional, pois permite a manipulação direta e eficiente dos valores de cor, além de servir como base para conversões entre diferentes modelos de cor e para a extração de informações cromáticas específicas.

2.2.4 Relação entre sinais visuais e auditivos

Ao interpretar imagens como sinais digitais, torna-se possível estabelecer uma analogia conceitual com o domínio do áudio. Enquanto uma imagem pode ser descrita como um sinal bidimensional $f(x, y)$, o som é representado como um sinal unidimensional no tempo.

Essa diferença de dimensões não impede, contudo, que técnicas de processamento de sinais sejam aplicadas de forma análoga em ambos os domínios. No contexto deste trabalho, essa equivalência estrutural é fundamental, pois viabiliza a tradução de atributos visuais extraídos da representação matricial da imagem em estímulos sonoros, permitindo a conversão de informação espacial em informação temporal. Dessa forma, a interpretação da imagem como um sinal digital constitui a base teórica que sustenta a proposta de sonificação cromática apresentada.

2.3 MODELOS DE COR

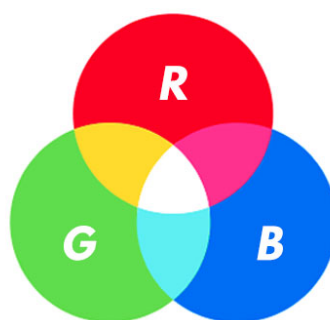
2.3.1 Modelo RGB

O modelo RGB (*Red, Green, Blue*) é um sistema de representação aditivo, no qual as cores são formadas pela combinação de luzes vermelha, verde e azul em diferentes intensidades. Essa abordagem tem origem no funcionamento da visão humana, já que os cones presentes na retina são sensíveis a essas três faixas do espectro visível. Em sua implementação prática, como em monitores, televisores, câmeras digitais e projetores, cada componente é normalmente representado por valores que variam de 0 a 255 (em sistemas de 8 bits por canal). Conforme representado

na Figura 7 A cor branca resulta da combinação máxima dos três canais, enquanto a cor preta corresponde à ausência de luz. Sua principal vantagem é a compatibilidade direta com dispositivos emissores de luz e a possibilidade de representar uma ampla gama de cores.

No entanto, trata-se de um modelo que depende do dispositivo, o que significa que a mesma combinação numérica pode gerar tonalidades diferentes em monitores distintos, além de não ser adequado para reprodução física em papel sem conversão para outros sistemas (LOPES, 2013).

Figura 7 – Padrão de cor RGB



Fonte: Nicolau (2020).

2.3.1.1 Representação Hexadecimal

Uma outra forma de representar cores em uma imagem digital é através do formato hexadecimal de cores (HEX). Esse formato não constitui um modelo de cor distinto, mas sim uma forma alternativa de expressar os mesmos valores RGB por meio de uma codificação textual compacta, baseada no sistema de numeração hexadecimal (base 16).

Na codificação hexadecimal, cada componente de cor do RGB, originalmente representado por um valor inteiro no intervalo [0,255], é convertido para um número de dois dígitos na base 16. A cor é então expressa no formato:

$$HEX = \#RRGGBB \quad (2.3)$$

onde RR , GG e BB correspondem, respectivamente, às intensidades dos canais vermelho, verde e azul em notação hexadecimal. Por exemplo, a cor branca, representada em RGB por (255,255,255), é codificada como #FFFFFF, enquanto a cor preta, (0,0,0), é representada por #000000.

A conversão de um valor RGB para hexadecimal não altera a informação cromática, tratando-se apenas de uma mudança de base numérica. Formalmente, para cada

canal $C \in R, G, B$, a conversão é dada por:

$$C_{hex} = hex(C) \quad (2.4)$$

em que C é o valor inteiro do canal na base decimal, e C_{hex} sua representação correspondente na base hexadecimal com dois dígitos. O valor final resulta da concatenação das três representações individuais.

A representação hexadecimal é amplamente utilizada em aplicações web, linguagens de marcação e folhas de estilo (CSS), por oferecer uma forma mais compacta de especificar as cores no espaço RGB. Nesse formato, cada par de dígitos hexadecimais corresponde à intensidade de um dos canais de cor primários, conforme definido nas especificações do padrão sRGB (standart RGB) adotado na maioria dos ambientes digitais ([Mozilla Developers, 2025](#)).

No contexto deste trabalho, esse formato é utilizado para exibir ao usuário uma representação textual adicional da cor selecionada, complementando os valores numéricos dos modelos RGB/BGR e HSL.

2.3.2 Modelo BGR

O modelo BGR (*Blue, Green, Red*) é uma variação estrutural do conhecido modelo RGB, na qual a ordem dos canais de cor é invertida. Embora conceitualmente equivalente ao RGB, o BGR é utilizado como padrão em determinadas bibliotecas computacionais, sobretudo na biblioteca *OpenCV* (*Open Source Computer Vision Library*), utilizada neste trabalho.

No *OpenCV*, imagens coloridas são representadas internamente no formato BGR por razões históricas e de compatibilidade com sistemas, dispositivos e formatos gráficos amplamente utilizados à época do desenvolvimento da biblioteca ([MALIK, 2015](#)). Dessa forma, ao carregar uma imagem ou capturar um quadro de vídeo por meio do *OpenCV*, os valores de cor são armazenados na ordem “Azul–Verde–Vermelho”, diferentemente do padrão RGB.

Do ponto de vista matemático e perceptual, o modelo BGR não introduz qualquer diferença na representação da cor em relação ao RGB, uma vez que os mesmos três canais e intervalos de valores são utilizados. A distinção reside apenas na organização dos dados na memória, sendo necessária apenas a reordenação dos canais sempre que se deseja converter a imagem para outros espaços de cor.

Neste trabalho, o uso do modelo BGR é adotado diretamente por ser o formato nativo da biblioteca *OpenCV*, utilizada para a captura, leitura e manipulação das imagens. Essa escolha evita conversões desnecessárias e garante maior eficiência computacional, além de manter fidelidade à forma como os dados são efetivamente

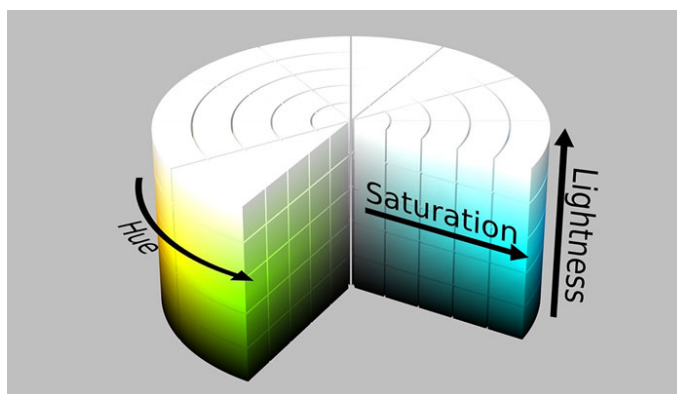
processados no código. Sempre que necessário, os valores BGR são reinterpretados ou reordenados para viabilizar conversões para outros modelos de cor, especialmente para o HSL, que é utilizado na etapa de mapeamento cromático-sonoro.

2.3.3 Modelo HSL

O modelo HSL (*Hue, Saturation, Lightness*) é um espaço de representação de cores projetado para oferecer uma interpretação mais intuitiva da informação cromática quando comparado a modelos puramente aditivos, como o RGB. Ao invés de representar a cor diretamente por intensidades físicas da luz, o HSL organiza a informação em três dimensões perceptualmente mais significativas: matiz, saturação e luminosidade.

O matiz (*hue*) é definido como um ângulo em um círculo cromático, onde valores como 0° correspondem ao vermelho, 120° ao verde e 240° ao azul. A saturação (*saturation*) indica a intensidade ou pureza da cor, variando de tons acinzentados a cores vivas, enquanto a luminosidade (*lightness*) determina a claridade, indo do preto absoluto ao branco puro (Duplod, 2023), conforme ilustrado pela Figura 8.

Figura 8 – Padrão de cor HSL.



Fonte: Nicolau (2020).

Para a proposta deste trabalho, o modelo HSL mostrou-se mais adequado na etapa de mapeamento sonoro, pois separa a informação cromática em três dimensões semanticamente interpretáveis: matiz, saturação e luminosidade. Essa separação permite associar cada atributo visual a um parâmetro auditivo distinto, tornando a conversão entre cor e som mais intuitiva e estruturada. Assim, embora a imagem seja inicialmente capturada no formato digital do dispositivo, a etapa de tradução sonora utiliza a conversão para HSL como base para o processo de sonificação.

2.3.3.1 Conversão de RGB/BGR para HSL

A conversão de uma cor do espaço RGB (ou BGR) para o espaço HSL é realizada por meio de um conjunto de operações matemáticas que envolvem normalização,

identificação dos canais dominantes e cálculo condicional da matiz. Inicialmente, os valores dos canais de cor são normalizados para o intervalo contínuo $[0,1]$:

$$R' = \frac{R}{255}, G' = \frac{G}{255}, B' = \frac{B}{255} \quad (2.5)$$

Em seguida, definem-se os valores máximo e mínimo entre os canais normalizados, bem como a variação cromática (Δ):

$$C_{max} = \max(R', G', B') \quad (2.6)$$

$$C_{min} = \min(R', G', B') \quad (2.7)$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min} \quad (2.8)$$

A luminosidade (L) é calculada como a média entre o maior e o menor valor dos canais:

$$L = \frac{C_{max} + C_{min}}{2} \quad (2.9)$$

A saturação (S) depende da variação cromática e da luminosidade, sendo definida como:

$$S = \begin{cases} 0, & \Delta = 0 \\ \frac{\Delta}{1 - |2L - 1|}, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.10)$$

No código utilizado neste trabalho, a fim de facilitar a visualização e os cálculos, tanto a saturação quanto a luminosidade são normalizadas, de modo que fiquem inseridas no intervalo $[0,1]$:

$$S' = \frac{S}{255}, L' = \frac{L}{255} \quad (2.11)$$

A matiz é determinada a partir do canal dominante, de forma condicional:

$$H = \begin{cases} 0, & \text{se } \Delta = 0 \\ \left(60 \cdot \frac{G' - B'}{\Delta} + 360 \right) \bmod 360, & \text{se } C_{max} = R' \\ \left(60 \cdot \frac{B' - R'}{\Delta} + 120 \right) \bmod 360, & \text{se } C_{max} = G' \\ \left(60 \cdot \frac{R' - G'}{\Delta} + 240 \right) \bmod 360, & \text{se } C_{max} = B' \end{cases} \quad (2.12)$$

O valor final da matiz é expresso em graus no intervalo $[0,360]$.

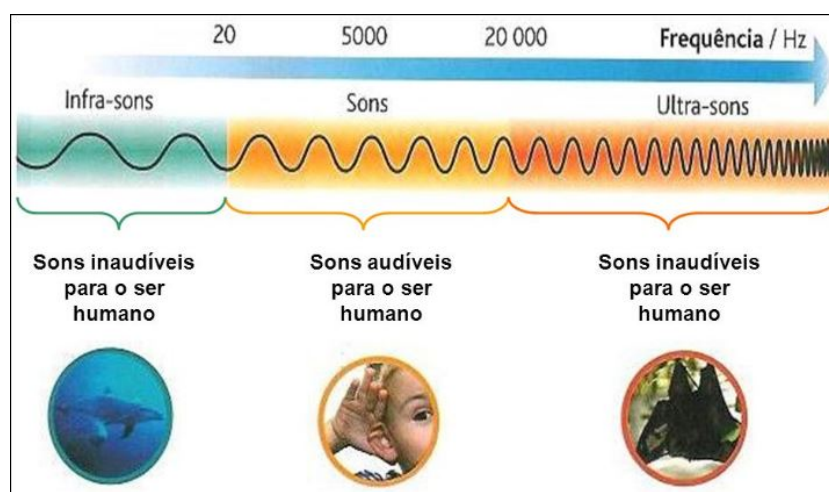
No caso específico do modelo BGR, utilizado por bibliotecas como o *OpenCV*, a conversão para HSL segue exatamente as mesmas equações, sendo necessária apenas a reordenação prévia dos canais para o formato RGB, sem alteração da base matemática do modelo.

2.4 FUNDAMENTOS DO SOM

O som é uma onda mecânica longitudinal que se propaga em meios materiais (como ar, água ou sólidos) por meio da vibração das partículas que compõem o meio (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Diferentemente das ondas eletromagnéticas, o som necessita de um meio físico para se propagar, uma vez que é resultado da variação de pressão causada pela compressão e rarefação das partículas.

O espectro audível humano compreende frequências que variam, em média, de 20 hertz (Hz) a 20 quilohertz (kHz), embora essa faixa possa se reduzir com a idade ou devido a fatores de saúde (ROSSING; MOORE; WHEELER, 2002). Sons abaixo de 20 Hz são denominados infrassons, enquanto aqueles acima de 20 kHz são conhecidos como ultrassons, conforme ilustrado pela Figura 9. A frequência está diretamente associada à altura percebida do som: sons de maior frequência são percebidos como mais agudos (mais “altos”), enquanto sons de menor frequência são percebidos como mais graves (mais “baixos”).

Figura 9 – Divisão de frequências sonoras audíveis e inaudíveis para o ser humano.



Fonte: Porto (2020).

Os principais parâmetros físicos do som incluem a frequência, a amplitude e o timbre. A frequência (f) é definida como o número de ciclos completos de oscilação por segundo e é expressa em hertz (Hz). O seu inverso é o período (T), que representa o

tempo necessário para completar um ciclo:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.13)$$

A amplitude de uma onda sonora está relacionada à sua intensidade e, portanto, à *loudness* percebida, embora esta última também dependa da sensibilidade do ouvido humano em diferentes frequências. O timbre, por sua vez, é a característica que permite distinguir dois sons de mesma frequência fundamental e amplitude, sendo determinado pela composição espectral e pela forma de onda.

A intensidade sonora (I) pode ser quantificada como a potência acústica por unidade de área (W/m^2). Contudo, para representar a ampla faixa de intensidades audíveis pelo ser humano, utiliza-se uma escala logarítmica denominada nível de intensidade sonora, expressa em decibéis (dB):

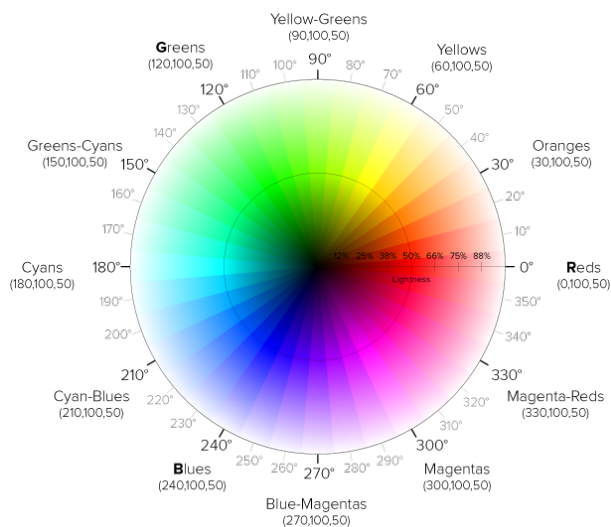
$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (2.14)$$

onde $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} W/m^2$ é a intensidade de referência correspondente ao limiar de audição para um ouvido humano jovem e saudável (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Essa escala reflete melhor a percepção auditiva, que é aproximadamente logarítmica, de modo que aumentos iguais em dB representam multiplicações iguais na intensidade física do som.

2.4.1 Mapeamento entre cores e notas musicais

Uma analogia relevante para a compreensão do mapeamento entre cores e sons pode ser estabelecida a partir da organização dos elementos nos domínios visual e auditivo. A Figura 10 apresenta o círculo cromático HSL que ilustra as cores de forma contínua ao longo de um ciclo fechado. Essa organização reflete a natureza contínua do espectro visível, no qual variações no comprimento de onda resultam em transições graduais entre as cores.

Figura 10 – Círculo cromático HSL.



Fonte: [3CON14](#) (s.d.)

De forma complementar, a Figura 11 ilustra a organização das notas musicais ao longo de uma escala, apresentando sua correspondência com valores de frequência e identificação no padrão MIDI. Nesse contexto, as notas são organizadas de forma linear crescente em frequência, sendo cada uma associada a um valor específico em Hertz (Hz), o que permite sua representação precisa no domínio computacional.

Figura 11 – A escala cromática padrão definida pelo semitom.

Position on the staff	Piano key	Name	MIDI	Frequency	Name	MIDI	Frequency	
		C6	84	1046.5	(Black keys)			
		B5	83	987.77	Bb5	A#5	82	932.33
		A5	81	880.00	Ab5	G#5	80	830.61
		G5	79	783.99	Gb5	F#5	78	739.99
		F5	77	698.46				
		E5	76	659.26	Eb5	D#5	75	622.25
		D5	74	587.33	Db5	C#5	73	554.37
		C5	72	523.25				
		B4	71	493.88	Bb4	A#4	70	466.16
		A4	69	440.00	Ab4	G#4	68	415.30
		G4	67	392.00	Gb4	F#4	66	369.99
		F4	65	349.23				
		E4	64	329.63	Eb4	D#4	63	311.13
		D4	62	293.67	Db4	C#4	61	277.18
		C4	60	261.63				
		B3	59	246.94	Bb3	A#3	58	233.08
		A3	57	220.00	Ab3	G#3	56	207.65
		G3	55	196.00	Gb3	F#3	54	185.00
		F3	53	174.61				
		E3	52	164.81	Eb3	D#3	51	155.56
		D3	50	146.83	Db3	C#3	49	138.59
		C3	48	130.81				
		B2	47	123.47	Bb2	A#2	46	116.54
		A2	45	110.00	Ab2	G#2	44	103.83
		G2	43	97.999	Gb2	F#2	42	92.499
		F2	41	87.307				
		E2	40	82.407	Eb2	D#2	39	77.782
		D2	38	73.416	Db2	C#2	37	69.296
		C2	36	65.406				

Fonte: [Chen](#) (2016)

Embora as representações apresentadas nas Figuras 10 e 11 possuam nature-

zas distintas (sendo uma circular e outra linear) ambas compartilham uma característica fundamental: a divisão do espaço perceptual em 12 elementos principais. No caso do círculo cromático, cada setor representa uma faixa de matiz (*hue*), enquanto, na escala musical, cada nota corresponde a uma frequência específica dentro de uma oitava.

Essa correspondência estrutural possibilita o estabelecimento de um mapeamento entre os dois domínios. Ao associar cada uma das 12 regiões do círculo cromático (Figura 10) a uma das 12 notas musicais apresentadas na Figura 11, torna-se possível traduzir variações cromáticas em variações sonoras de forma organizada e consistente. Além disso, a utilização de frequências definidas permite que o sistema produza sinais auditivos bem delimitados, facilitando a distinção entre diferentes cores.

Dessa forma, a relação entre as cores e as notas musicais não se baseia apenas em uma analogia visual, mas também em uma correspondência estrutural entre conjuntos discretos organizados em seus respectivos domínios. Essa abordagem constitui um dos fundamentos conceituais do processo de sonificação adotado neste trabalho, sendo posteriormente formalizada na etapa de modelagem e implementação do sistema.

2.5 COMUNICAÇÃO MULTIMODAL E SONIFICAÇÃO

A comunicação multimodal refere-se ao uso combinado de diferentes modalidades sensoriais (como visão, audição, tato e até olfato) para transmitir ou ampliar informações. Essa abordagem é particularmente relevante quando um canal sensorial está indisponível ou quando se deseja potencializar a compreensão por meio de redundância sensorial. No contexto computacional, a multimodalidade é utilizada em interfaces que integram recursos visuais, auditivos e táteis para ampliar a experiência do usuário e tornar a informação mais acessível.

Dentro desse escopo, a sonificação é definida como o processo de transformar dados em sons com o objetivo de comunicar informações ou facilitar a interpretação (HERMANN; HUNT; NEUHOFF, 2011). Diferente de um simples efeito sonoro estético, a sonificação segue princípios científicos para mapear variáveis de dados a parâmetros sonoros como frequência, amplitude, timbre, ritmo e espacialização. Trata-se, portanto, de uma forma de *data mapping* auditivo, que pode complementar ou substituir a visualização tradicional de dados.

Existem diferentes técnicas de mapeamento sonoro, que variam de acordo com o tipo de dado e o objetivo comunicativo. O mapeamento categórico atribui sons distintos a categorias discretas. Um exemplo seria usar timbres diferentes para representar diferentes classes de dados em um gráfico. Já o mapeamento híbrido combina elementos das abordagens direta e categórica, permitindo uma representação mais

rica e multifacetada de informações ([HERMANN; HUNT; NEUHOFF, 2011](#)).

A integração da sonificação em um contexto multimodal amplia as possibilidades de comunicação e percepção, permitindo que dados sejam explorados por múltiplos sentidos. Tal abordagem é especialmente promissora em áreas como acessibilidade, educação, análise de dados complexos e artes digitais interativas.

2.6 PERCEPÇÃO HUMANA E PSICOFÍSICA

A psicofísica é o campo da ciência que estuda as relações quantitativas entre estímulos físicos e as sensações que eles produzem, investigando como características mensuráveis do mundo físico são traduzidas em percepções subjetivas ([BERNARDINO, 2019](#)). No contexto da percepção visual e auditiva, a psicofísica busca entender como o sistema sensorial humano codifica, processa e interpreta informações provenientes da luz e do som.

A percepção visual começa na retina, onde fotorreceptores chamados cones e bastonetes convertem a energia luminosa em impulsos elétricos. Os cones, sensíveis a diferentes faixas do espectro visível, são responsáveis pela visão em cores, enquanto os bastonetes atuam na visão escotópica, sensível a baixos níveis de luminosidade ([PURVES et al., 2012](#)). A percepção auditiva, por sua vez, ocorre quando ondas sonoras fazem vibrar o tímpano e a cadeia ossicular, transmitindo energia para a cóclea, onde células ciliadas convertem essas vibrações em sinais elétricos que seguem pelo nervo auditivo até o córtex auditivo ([YOST, 2013](#)).

A sinestesia é um fenômeno neurológico no qual a estimulação de um sentido provoca experiências automáticas e involuntárias em outro sentido, como perceber cores ao ouvir sons (sinestesia som-cor) ou associar números a cores (grafema-cor) ([WARD, 2013](#)). Embora rara, a sinestesia fornece pistas importantes sobre a conectividade e a integração sensorial no cérebro, sugerindo que, em certas condições, os circuitos que processam estímulos de modalidades diferentes podem interagir de maneira mais direta.

Relacionado à sinestesia, o conceito de correspondências crossmodais descreve associações consistentes, mas não necessariamente sinestésicas, entre diferentes modalidades sensoriais. Por exemplo, há uma tendência generalizada de associar sons agudos a cores mais claras ou saturadas e sons graves a cores mais escuras ([SPENCE; STEFANO, 2022](#)).

3 METODOLOGIA

A implementação da solução proposta neste trabalho foi conduzida com foco na clareza, na simplicidade e na possibilidade de reutilização/customização do código. Desde o início, identificou-se a necessidade de desenvolver um código de fácil entendimento, de modo que sua lógica pudesse ser acompanhada não apenas pelos autores, mas também por futuros leitores e desenvolvedores. Para isso, a aplicação foi estruturada de forma modular, separando as principais etapas do processamento como: captura da cor, tratamento e exibição dos dados, mapeamento cromático-sonoro e geração do sinal sonoro audível.

Essa modularização permite que melhorias e ajustes sejam implementados em partes específicas do código sem comprometer o funcionamento do sistema como um todo, além de facilitar adaptações futuras do programa para outras finalidades ou contextos de uso.

A linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento do protótipo foi o Python. Essa escolha se justifica, em primeiro lugar, pela sua sintaxe clara e de alto nível, que favorece a legibilidade do código e reduz a complexidade da programação dos algoritmos.

Para o processamento das imagens e a extração das informações cromáticas, foi utilizada a biblioteca *cv2*, uma interface do *OpenCV* para Python. Essa biblioteca é empregada em aplicações de visão computacional e oferece funções otimizadas para leitura, exibição e manipulação de imagens. No contexto deste trabalho, a *cv2* é responsável por tarefas como carregamento de arquivos de imagem, conversão entre diferentes espaços de cor (por exemplo, BGR para HSL) e acesso aos valores de cor em cada pixel ou região de interesse.

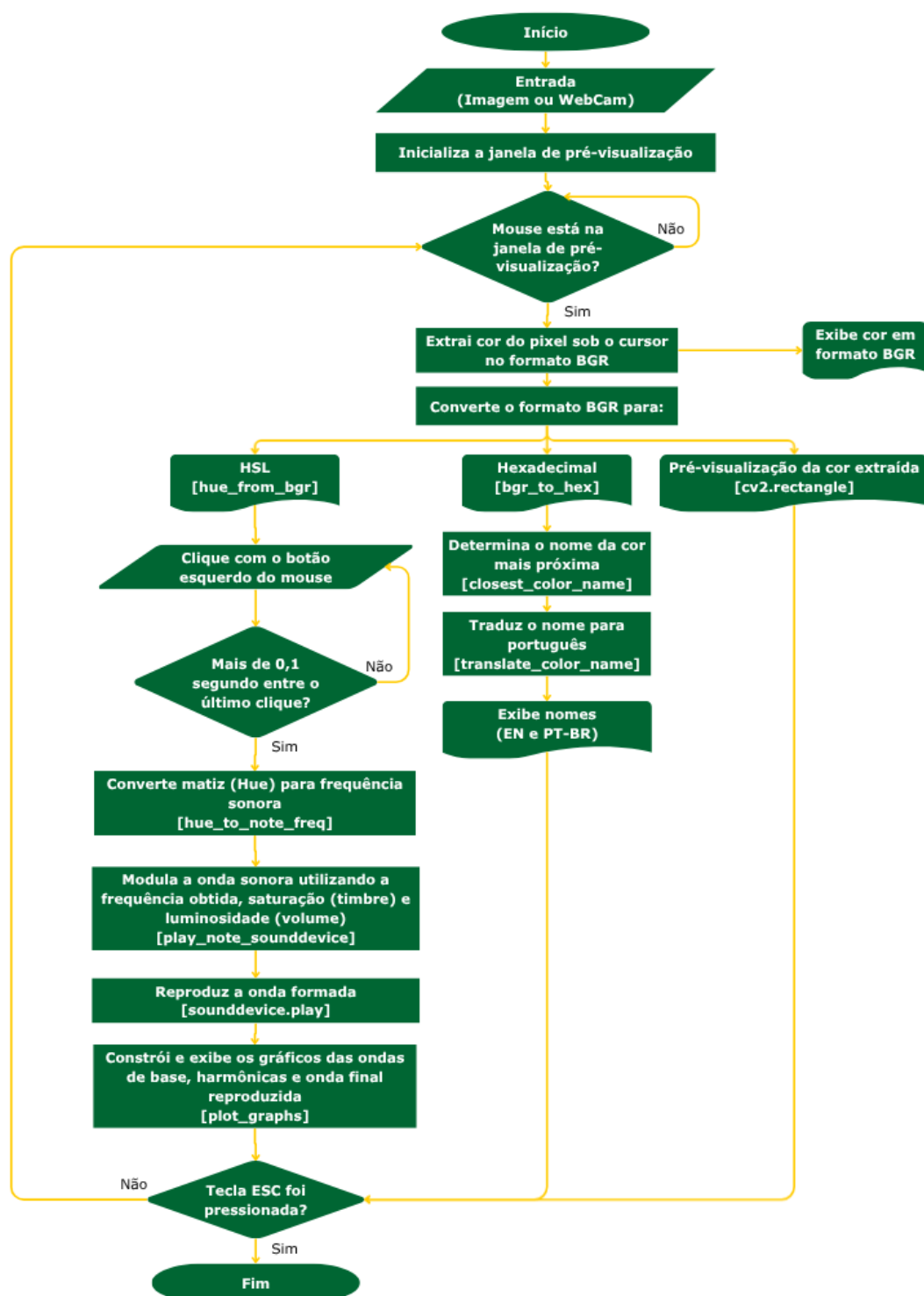
Já a biblioteca *NumPy* foi empregada como base para o tratamento matemático dos dados numéricos associados às cores. O *NumPy* fornece estruturas de dados eficientes, como *arrays* multidimensionais, além de um conjunto extenso de funções para operações vetorizadas, normalização, cálculo de médias, máximos, mínimos e transformações numéricas em geral. No contexto deste projeto, essa biblioteca é utilizada para organizar e manipular os valores dos componentes de cor (por exemplo, os canais R, G e B) e para implementar as funções de mapeamento que convertem esses valores em parâmetros sonoros, como frequência e intensidade.

Além destas, foi utilizada também a biblioteca *Matplotlib* para construir os gráficos que exibem as formas de onda utilizadas na criação da forma de onda resultante, modulada a partir dos parâmetros extraídos. Já a biblioteca *Sounddevice* reproduz o sinal sonoro da onda criada. O código fonte do sistema implementado neste trabalho

está disponível em: <https://github.com/caiofalcheti/TG_INFO_Bia_Caio>

Na Figura 12, apresenta-se o fluxograma geral do funcionamento do programa, onde é possível visualizar melhor a modularização do projeto, resumindo, visualmente o percurso da captura da cor até a geração do som. Abaixo de algumas etapas, encontram-se, entre colchetes, a função ou comando utilizados no código para realizar a ação descrita.

Figura 12 – Fluxograma de funcionamento do código.



Fonte: Elaboração própria.

A primeira etapa do fluxo corresponde à entrada, que, dependendo do código executado, pode ser realizada a partir de diferentes fontes. Atualmente, há duas versões do código. A primeira utiliza imagens estáticas referenciadas em uma pasta “*images*”

como fonte, e a outra utiliza a captura direta do vídeo através de uma câmera do tipo webcam. Essa flexibilidade permite que o usuário escolha a forma de interação mais adequada ao contexto, além de facilitar testes em tempo real com diferentes cenários.

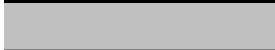
Em seguida, o sistema recebe o arquivo da imagem ou a imagem da webcam e prepara o sinal para o processamento, inicializando uma janela de pré-visualização da fonte de entrada. Na sequência, é realizada uma verificação se o cursor está inserido nesta janela. Caso positivo, ocorrerá a etapa de extração da cor do pixel sob o cursor, em que o programa identifica o valor BGR correspondente à posição selecionada na imagem. Esta operação é realizada com o auxílio da biblioteca *cv2*, que permite acessar diretamente os valores numéricos de cada componente de cor. Apesar da implementação utilizar o formato BGR devido à biblioteca *OpenCV*, as equações são equivalentes às do modelo RGB, sendo apenas necessária a reordenação dos canais.

Após a captura inicial, o sistema converte a cor obtida para HSL e Hexadecimal a partir das funções "*bgr_to_hsl*" e "*bgr_to_hex*", respectivamente. A primeira função utiliza as equações 2.7 a 2.12, descritas na fundamentação teórica, para realizar a conversão. Já a segunda função, apenas realiza uma conversão simples de base decimal para base hexadecimal, seguindo o padrão da equação 2.3.

Os valores HSL e HEX, e uma representação visual da cor selecionada, são exibidos no menu lateral da janela de pré-visualização. Além destes, também são exibidos neste menu o nome da cor selecionada em inglês e em português.

A identificação do nome da cor capturada é realizada por meio da função "*closest_color_name*", que recebe como entrada o valor hexadecimal da cor obtida em tempo real. Inicialmente, esse valor é convertido para o espaço de cores RGB, permitindo a comparação direta com a base de cores de referência apresentada na Tabela 1. Essa tabela apresenta uma simplificação da tabela de cores utilizada no sistema desenvolvido, composta por cores nomeadas derivadas do padrão CSS Color Module Level 3 (3CON14, s.d.). A tabela completa encontra-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 1 – Versão resumida da tabela de cores CSS3 utilizadas no sistema proposto.

Código Hexadecimal	Nome em inglês	Representação
#000000	black	
#C0C0C0	silver	
#808080	gray	
#FFFFFF	white	
#800000	maroon	
#FF0000	red	
#800080	purple	
#FF00FF	fuchsia	
#008000	green	
#00FF00	lime	
#808000	olive	
#FFFF00	yellow	
#000080	navy	
#0000FF	blue	
#008080	teal	
#00FFFF	aqua	

Fonte: Adaptado de [WORLD WIDE WEB CONSORTIUM \(2022\)](#).

Para isso, em cada cor da base, a partir da codificação Hexadecimal, é calculada uma medida de diferença em relação à cor capturada. Essa comparação é feita componente a componente (vermelho, verde e azul), utilizando uma métrica baseada na distância entre os valores de cada canal. A função percorre todas as cores disponíveis na tabela e seleciona aquela que apresenta a menor diferença, assumindo que esta é a melhor representação semântica da cor analisada.

A métrica utilizada pode ser descrita pela Equação 3.1:

$$D = (R - R_i)^2 + (G - G_i)^2 + (B - B_i)^2 \quad (3.1)$$

em que B , G , R , representam os valores da cor capturada e B_i , G_i , R_i correspondem aos valores da i -ésima cor da base de referência.

O valor D representa a diferença entre as cores, sendo que quanto menor o valor obtido, maior a similaridade entre elas. Ao final do processo, a função retorna o nome da cor cuja distância calculada é mínima. Dessa forma, o sistema é capaz de associar automaticamente uma cor capturada a um nome padronizado, mesmo quando não há correspondência exata entre os valores.

Após a identificação do nome da cor em inglês, o sistema realiza sua tradução para o português por meio da função “*translate_color_name*”. Essa função, utiliza

técnicas de processamento textual, combinando um conjunto de traduções diretas, baseadas em um dicionário de cores conhecidas, com uma abordagem de decomposição semântica, na qual termos compostos são separados em componentes menores (como “dark”, “light” e o nome base da cor) e traduzidos individualmente.

Para prosseguir o fluxo, é necessário que o usuário realize a ação de clicar com o botão esquerdo do mouse, após posicionar o cursor sobre a seção da imagem que deseja converter em sinal sonoro. Quando essa ação é realizada, antes de se iniciar o processamento da conversão sonora, é realizada uma verificação simples que verifica se não foi realizado um clique com o botão esquerdo há menos de um décimo de segundo, visto que, essa ação pode comprometer o resto do fluxo do programa.

Após a etapa de verificação e obtenção dos parâmetros cromáticos, o sistema realiza a conversão da matiz (*hue*) em uma frequência sonora por meio da função “*hue_to_note_freq*”. Esse processo consiste em mapear o valor contínuo da matiz, definido no intervalo de 0 a 360 graus, para um conjunto discreto de notas musicais previamente estabelecidas.

Inicialmente, o valor de *hue* é normalizado dividindo-se por 360, de forma a convertê-lo para o intervalo [0,1]. Em seguida, esse valor normalizado é multiplicado pelo número total de notas disponíveis, permitindo determinar a posição correspondente dentro da escala musical. Matematicamente, esse processo pode ser descrito por:

$$i = \text{int} \left(\frac{H}{360} \cdot N \right) \quad (3.2)$$

onde *H* representa a matiz da cor, *N* o número de frequências consideradas e *i* é o índice que corresponde à posição de uma frequência dentro de um vetor discreto de notas musicais implementado no sistema.

Esse procedimento pode ser interpretado como uma discretização do espectro cromático, na qual o círculo de cores é dividido em regiões associadas a diferentes frequências sonoras. Tal abordagem permite estabelecer uma correspondência estruturada entre o domínio visual e o auditivo, ambos organizados em estruturas periódicas.

Nos protótipos desenvolvidos, foram adotados conjuntos de frequências distribuídas em diferentes faixas tonais consecutivas, permitindo uma representação detalhada das variações cromáticas. Inicialmente, foi implementado um sistema com um conjunto de 12 frequências, projetando cada uma das 12 cores do círculo cromático em 12 notas musicais diferentes. Posteriormente, visando trazer maior diferenciação entre tons, bem como, cobrir uma faixa auditiva mais confortável, uma segunda versão do código foi criada utilizando um conjunto de 36 frequências, distribuídas em três “Oitavas Musicais”. A comparação entre os conjuntos de frequência adotados está presente na seção de

“Resultados” deste trabalho.

O valor resultante é utilizado como índice para definição da frequência, conforme pode ser visto pela Tabela 2. A tabela representa o mapeamento do código para alocação de 36 frequências e notas musicais, abrangendo 3 oitavas distintas. Para a versão com 12 notas, adota-se a mesma tabela, porém, considerando apenas os valores dispostos nas colunas da 4ª oitava, modificando seu intervalo de índices de [12,23] para [0,11].

Tabela 2 – Mapeamento de índices do vetor em frequências e notas musicais para 36 frequências.
Fonte: Adaptado de [MixButton \(2025\)](#)

3ª Oitava			4ª Oitava			5ª Oitava		
Índice	Nota	Frequência (Hz)	Índice	Nota	Frequência (Hz)	Índice	Nota	Frequência (Hz)
0	C 3	130	12	C 4	261	24	C 5	523
1	C #3	138	13	C #4	277	25	C #5	554
2	D 3	146	14	D 4	293	26	D 5	587
3	D #3	155	15	D #4	311	27	D #5	622
4	E 3	164	16	E 4	329	28	E 5	659
5	F 3	174	17	F 4	349	29	F 5	698
6	F #3	185	18	F #4	369	30	F #5	739
7	G 3	196	19	G 4	392	31	G 5	784
8	G #3	207	20	G #4	415	32	G #5	830
9	A 3	220	21	A 4	440	33	A 5	880
10	A #3	233	22	A #4	466	34	A #5	932
11	B 3	246	23	B 4	494	35	B 5	987

A frequência f determinada é, então, inserida como parâmetro na função “*play_note_sounddevice*”, juntamente com os valores de saturação e luminosidade obtidos anteriormente. Essa função cria uma forma de onda senoidal pura mais a segunda e a terceira harmônica, conforme as equações:

$$x(t) = \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (3.3)$$

$$h_1(t) = \sin(2\pi \cdot f \cdot 2 \cdot t) \quad (3.4)$$

$$h_2(t) = \sin(2\pi \cdot f \cdot 3 \cdot t) \quad (3.5)$$

Em seguida, as ondas são somadas, porém, utilizando a saturação S como fator de modificação das amplitudes da onda base e dos harmônicos, conforme a equação:

$$y(t) = x(t) \cdot (1 - S) + h_1(t) \cdot (0.6 \cdot S) + h_2(t) \cdot (0.3 \cdot S) \quad (3.6)$$

Os fatores que acompanham os produtos foram determinados empiricamente pelos autores do código, de modo que os harmônicos não modifiquem bruscamente a forma de onda base e que também produzam sinais sonoros considerados agradáveis.

Por fim, a amplitude da onda resultante será modificada utilizando-se do fator de luminosidade L , respeitando a equação a seguir.

$$z(t) = y(t) \cdot (0.05 + 0.04 \cdot L) \quad (3.7)$$

Desta maneira, a luminosidade atuará como o “volume” da onda sonora. Contudo, os fatores que acompanham o valor da luminosidade foram definidos com o intuito de evitar o silêncio total, quando o fator da luminosidade é nulo e, também, o “clipping”, que pode ocorrer quando a intensidade sonora excede a capacidade máxima do equipamento que reproduz o som. Além de evitar o “clipping”, o fator que acompanha a variável de luminosidade também considera a avaliação empírica dos autores do código, de modo a reproduzir um sinal sonoro de volume confortável.

A onda senoidal resultante é, então, reproduzida utilizando a função “*sounddevice.play*”, com uma taxa de amostragem de 44100 Hz, padrão utilizado pela indústria musical (WATKINSON, 1994).

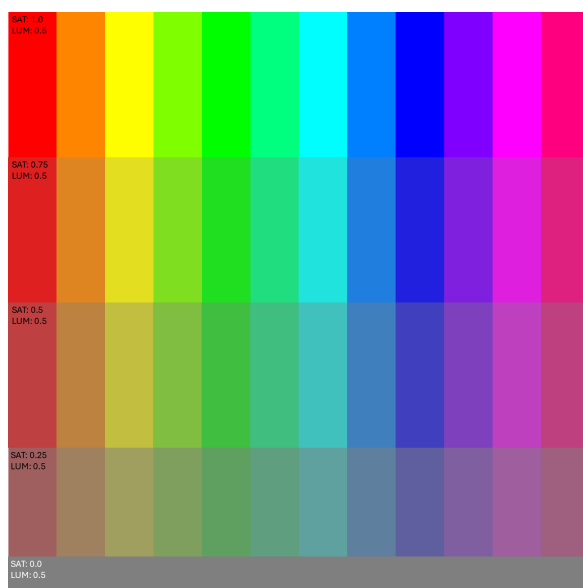
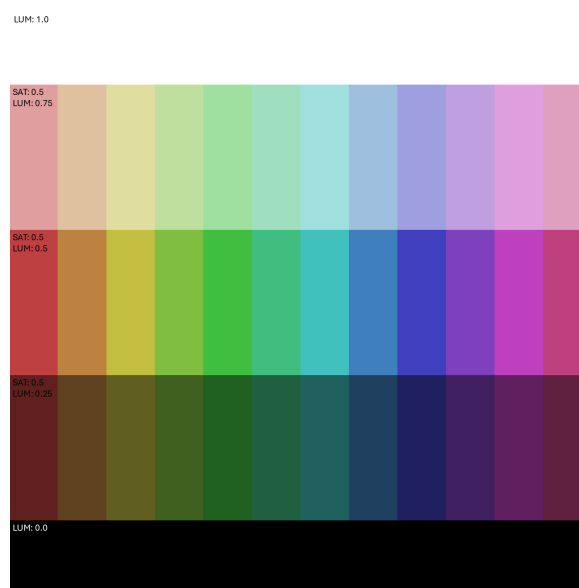
Depois de reproduzir o sinal sonoro, a função “*plot_graphs*” é chamada para construir e exibir, em uma nova janela, na parte superior, o sinal da onda senoidal no domínio do tempo, juntamente com as harmônicas que foram somadas a ela e, abaixo, o sinal sonoro resultante dessa operação.

Após a reprodução da onda criada e a exibição dos sinais, o processo de conversão de cor em sinal sonoro audível está finalizado. No entanto, após fechar a janela com a representação gráfica dos sinais, o programa seguirá processando as cores abaixo do cursor do usuário, aguardando um próximo clique para a execução de um novo sinal audível. O código só é finalizado quando o usuário pressionar a tecla “ESC” do teclado.

Para realizar testes de funcionamento do programa com maior exatidão, facilitando ao usuário a percepção de variação dos sinais criados, duas imagens foram criadas com escalas cromáticas com cores variando da matiz de 0° até 330°, em incrementos de 30°.

Além dos intervalos de matiz, cada imagem foi criada de maneira a fixar um dos fatores restantes, saturação ou luminosidade, enquanto o outro é variado em 0.25 unidades, no intervalo [0,1], ilustradas pelas imagens da Figura 13.

Figura 13 – Escalas cromáticas criadas para testar o funcionamento do programa.

(a) escala cromática com luminosidade fixada em 0.5 e saturação variando no intervalo $[0,1]$;(b) escala cromática com saturação fixada em 0.5 e luminosidade variando no intervalo $[0,1]$.

Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

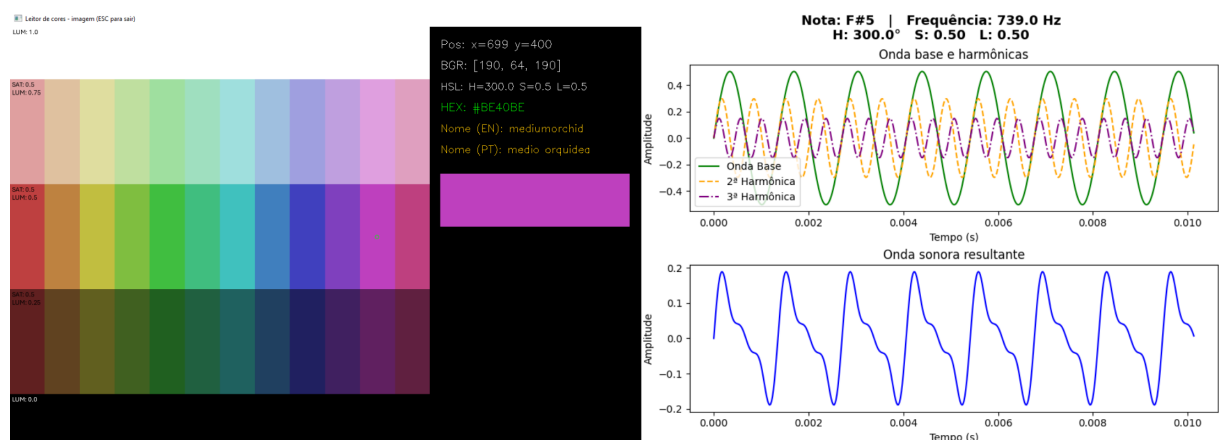
Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos a partir da execução e dos testes realizados com as duas versões desenvolvidas do sistema de conversão de cores em sinais sonoros, uma considerando apenas 12 cores e 12 frequências, centralizadas na 4ª Oitava, e outra considerando 36 cores e 36 frequências distintas, compondo a 3ª, 4ª e 5ª Oitavas. São descritos os cenários de teste considerados, os tipos de entrada utilizados e o comportamento observado do sistema diante de diferentes condições de captura e estratégias de mapeamento cromático-sonoro.

4.1 FUNCIONAMENTO GERAL DO SISTEMA

As versões desenvolvidas do código apresentaram funcionamento consistente, sendo capazes de converter informações cromáticas em sinais sonoros audíveis. O sistema operou corretamente tanto com imagens estáticas, fornecidas como arquivos de entrada, quanto com fluxo contínuo de imagens obtidas por meio de uma câmera do tipo webcam, visto que, em suas execuções, não foram encontrados problemas de processamento ou falhas na execução. Além disso, com ambos os métodos de entrada, não foram percebidas inconsistências na performance da aplicação.

Em ambos os casos, a imagem capturada ou carregada foi processada para extração dos valores de matiz (*Hue*), saturação (*Saturation*) e luminosidade (*Lightness*) no modelo HSL. Esses valores foram então mapeados para parâmetros sonoros, resultando na geração e reprodução de sinais acústicos em tempo real, conforme visto na Figura 14.

Figura 14 – Interface do sistema em execução utilizando uma imagem estática como entrada, para a versão considerando 36 cores/frequências.



Fonte: Elaboração própria.

4.2 CENÁRIOS DE TESTES

Foram realizados dois conjuntos principais de testes, diferenciados pelo tipo de entrada utilizada no sistema. O primeiro conjunto consistiu em testes com as duas imagens estáticas ilustradas pelas Figuras 13 (a) e 13 (b), criadas por meio de um software, nas quais foram elaboradas escalas cromáticas especificamente programadas para variar isoladamente os parâmetros de matiz, saturação e luminosidade. Essa abordagem permitiu uma análise controlada do comportamento do sistema frente a alterações individuais em cada componente do modelo de cor.

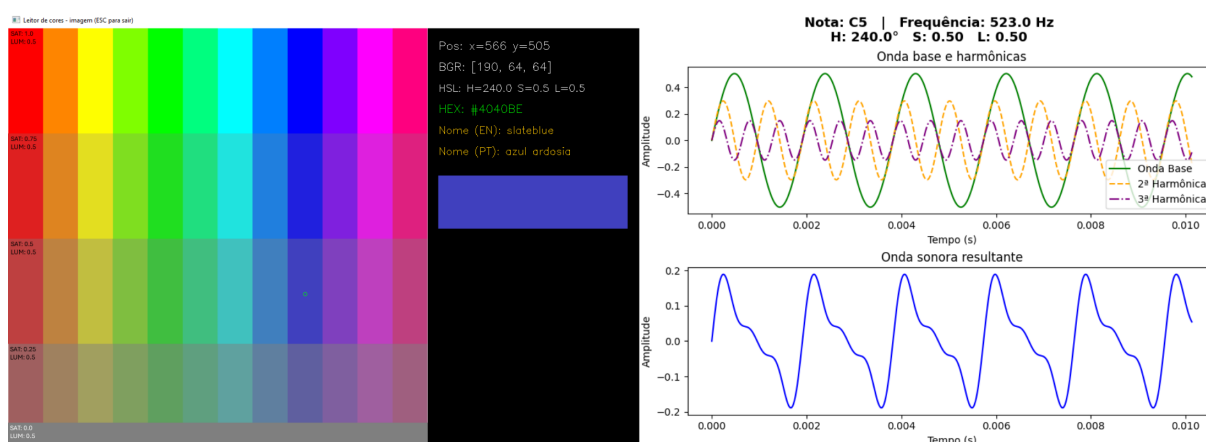
O segundo conjunto de testes envolveu a captura de imagens em tempo real por meio de uma webcam, utilizando objetos físicos coloridos submetidos a diferentes condições de iluminação. Esse cenário possibilitou avaliar o desempenho do sistema em situações mais próximas do uso real, considerando variações ambientais e possíveis interferências externas na percepção das cores.

Os testes com imagens estáticas permitiram avaliar o comportamento do sistema em condições controladas, enquanto os testes com a webcam possibilitaram observar sua resposta em cenários mais próximos de aplicações reais.

4.2.1 Testes com imagens

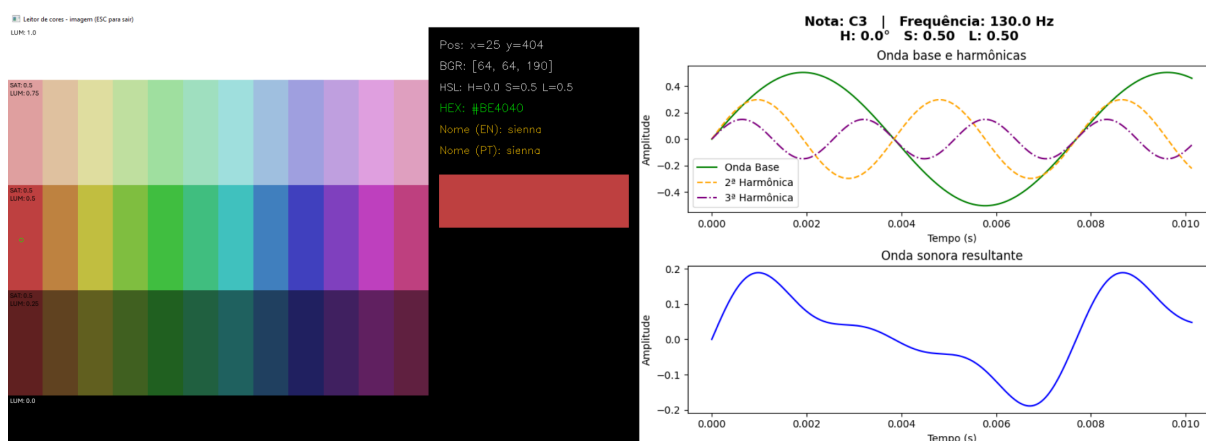
Nos testes realizados com imagens estáticas, observou-se que o sistema foi capaz de diferenciar claramente cores distintas, modulando e reproduzindo sinais sonoros diferentes para cada região cromática analisada. Conforme pode ser visto nas Figuras 15 e 16, que apresentam a captura de tela do sistema, para as cores Azul Ardósia e Sienna com as formas de onda dos sinais sonoros reproduzidos.

Figura 15 – Captura do funcionamento do sistema para cor Azul Ardósia (#4040BE).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Captura do funcionamento do sistema para cor Sienna (#BE4040).

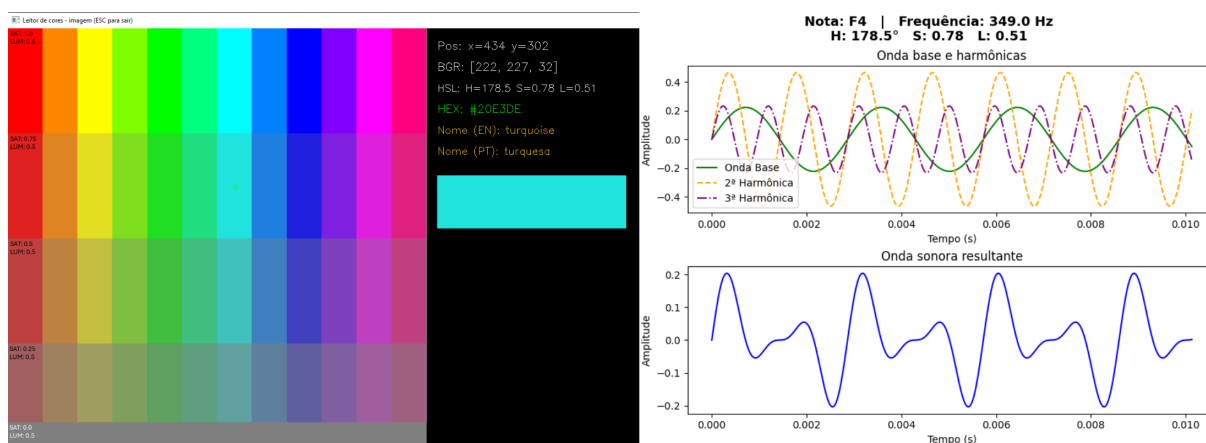


Fonte: Elaboração própria.

As variações de matiz resultaram em mudanças perceptíveis nas notas musicais reproduzidas, visto que, há uma grande intervalo entre as frequências de onda mapeadas, enquanto alterações em saturação e luminosidade refletiram-se em modificações no timbre e na intensidade do som. Essa separação funcional dos parâmetros mostrou-se coerente com o modelo adotado.

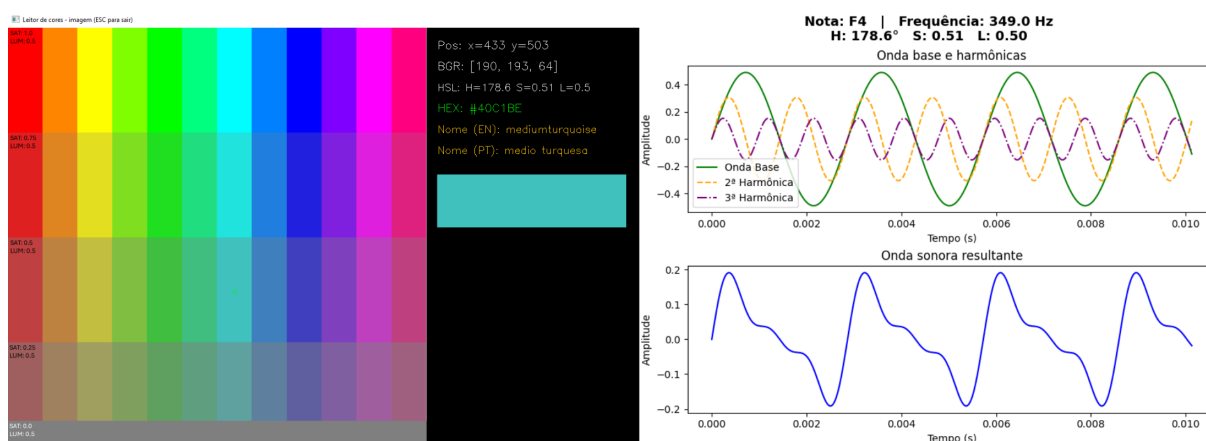
Ao comparar a Figura 15 com a Figura 16, nota-se que as formas de onda geradas para cores distintas apresentam diferenças, confirmando que o método empregado não apenas reproduz sons diferentes, mas gera sinais acústicos efetivamente distintos.

Figura 17 – Captura do funcionamento do sistema para cor Turquesa (#20E3DE).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Captura do funcionamento do sistema para cor Médio Turquesa (#40C1BE).

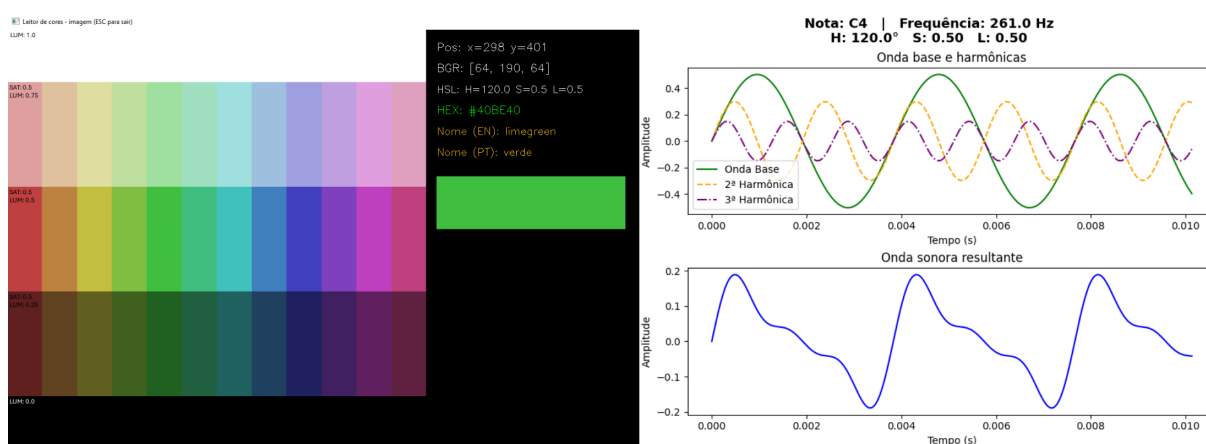


Fonte: Elaboração própria.

Comparando, agora, cores similares, com mesma matiz e luminosidade, mas com saturações diferentes, como é visto nas Figuras 17 e 18, é possível notar que a frequência sonora e a amplitude máxima da onda resultante é a mesma. No entanto, verifica-se que a forma de onda resultante é completamente diferente, visto que, a influência dos harmônicos é maior na cor obtida na Figura 17, por apresentar uma saturação maior quando comparada a saturação da cor da Figura 18.

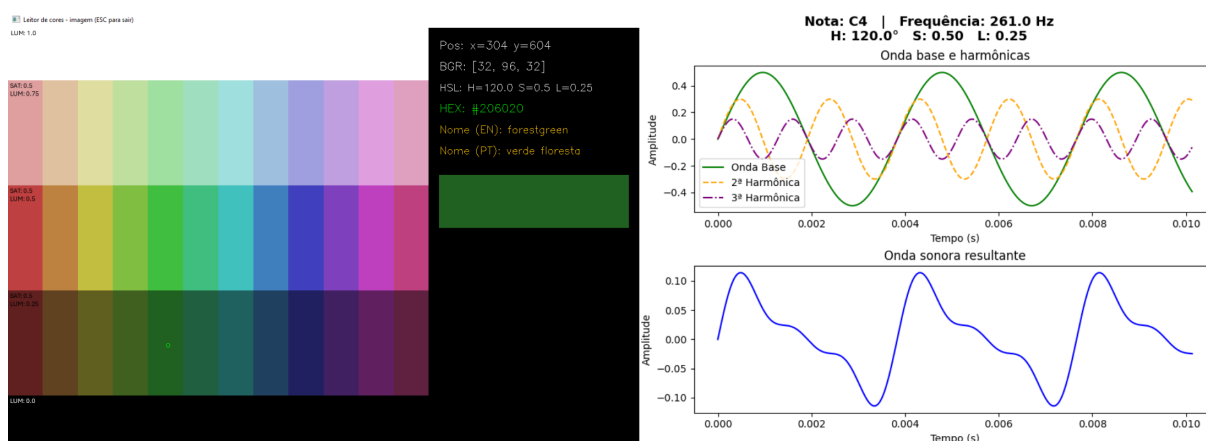
Ao comparar cores de mesma matiz e saturação, porém, com variação na luminosidade, o comportamento notado é que a nota musical e o timbre são exatamente iguais, como visto nas Figuras 19 e 20. A única diferença notada é na amplitude da onda resultante.

Figura 19 – Captura do funcionamento do sistema para cor Verde (#40BE40).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Captura do funcionamento do sistema para cor Verde Floresta (#206020).



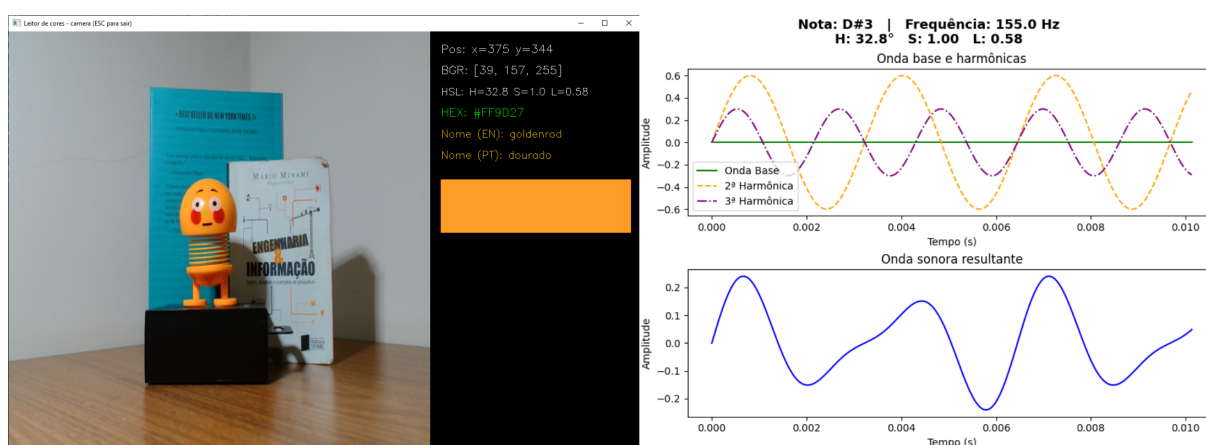
Fonte: Elaboração própria.

Do ponto de vista empírico, a diferenciação sonora foi considerada clara pelos autores, indicando que, em condições controladas, o método é eficaz para a distinção auditiva de cores e tons cromáticos.

4.2.2 Testes com captura de webcam

Nos testes realizados com a captura de imagens em tempo real por meio de uma webcam, o sistema também apresentou funcionamento adequado, realizando a conversão contínua das informações cromáticas capturadas em sinais sonoros.

Figura 21 – Interface do sistema em execução utilizando captura de webcam como entrada.

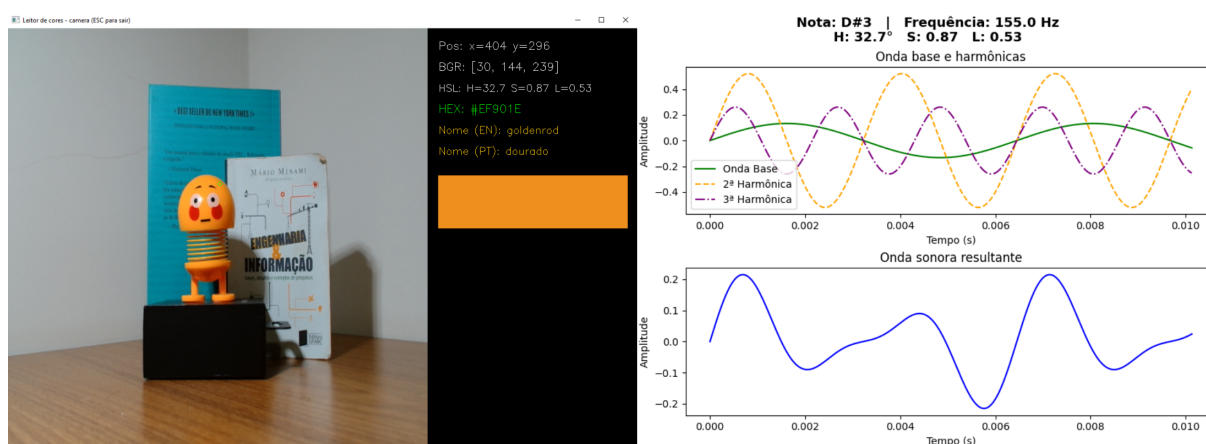


Fonte: Elaboração própria.

Entretanto, observou-se maior variabilidade nos valores extraídos do modelo HSL, especialmente nos componentes de saturação e luminosidade. Essa variação pode ser atribuída a limitações do dispositivo utilizado, à atualização constante dos quadros da imagem e às condições de iluminação do ambiente. Como consequência, um mesmo objeto de cor aparentemente uniforme pode gerar variações sonoras perceptíveis ao longo do tempo e em diferentes posições da imagem.

Esse comportamento pode ser observado ao comparar a Figura 21 com a Figura 22, onde, apenas movimentando um pouco o cursor de seleção, mas ainda mantendo sobre o mesmo objeto, é possível perceber uma variação nos parâmetros de entrada, modificando suavemente a onda sonora gerada.

Figura 22 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam como entrada com uma pequena variação do cursor em relação à Figura 21.



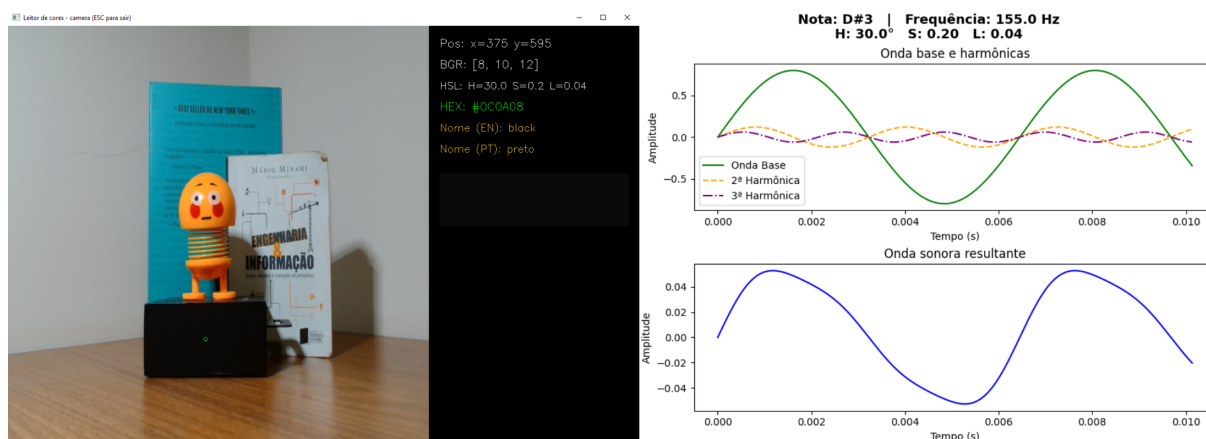
Fonte: Elaboração própria.

Apesar dessas limitações, o sistema manteve a capacidade de distinguir cores significativamente diferentes, indicando que a abordagem é viável, embora mais sensível às condições de aquisição do sinal visual.

4.3 COMPORTAMENTO PARA TONS PRÓXIMOS AO BRANCO E AO PRETO

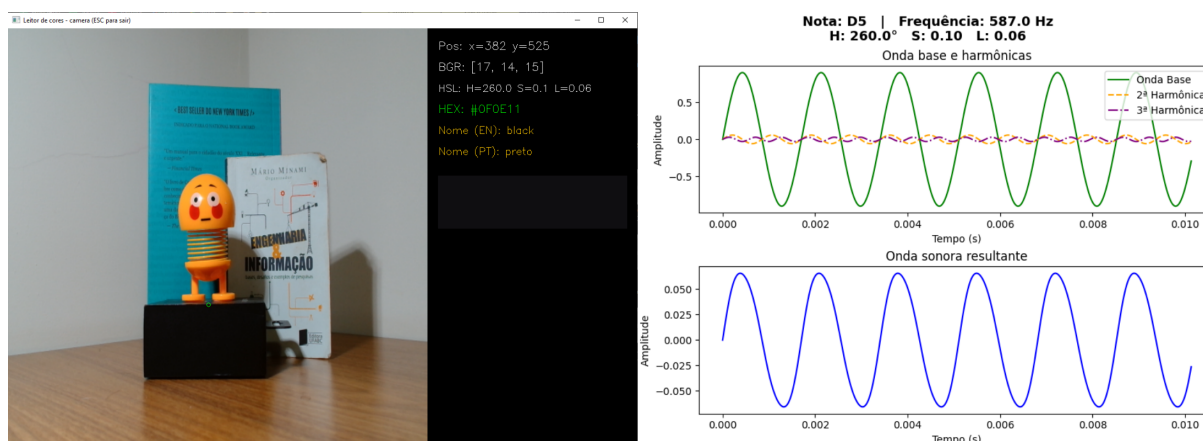
Um comportamento específico foi observado para tons próximos ao branco e ao preto. Embora, do ponto de vista perceptual humano, determinados objetos aparentam ser completamente brancos ou pretos, os valores de matiz extraídos podem ter alta variação, como pode ser observado nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam sobre a cor Preta com matiz baixo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Captura do sistema em execução utilizando captura de webcam sobre a cor Preta com matiz alta.



Fonte: Elaboração própria.

Nesse contexto, por mais que a frequência sonora determinada seja completamente diferente, a luminosidade torna-se o fator dominante para a geração do som. Valores de luminosidade próximos de zero resultam em sons de intensidade muito baixa, associados empiricamente ao preto, enquanto valores próximos de um resultam em sons de maior intensidade, associados ao branco.

No modelo proposto, portanto, sons muito graves podem ser considerados representações de “preto”, e sons muito agudos, de “branco”. A nota musical associada fornece um nível adicional de detalhamento, indicando variações cromáticas sutis, como um “branco-amarelado” ou um “preto-azulado”. Esse comportamento reforça o papel da luminosidade como parâmetro dominante nessas regiões cromáticas.

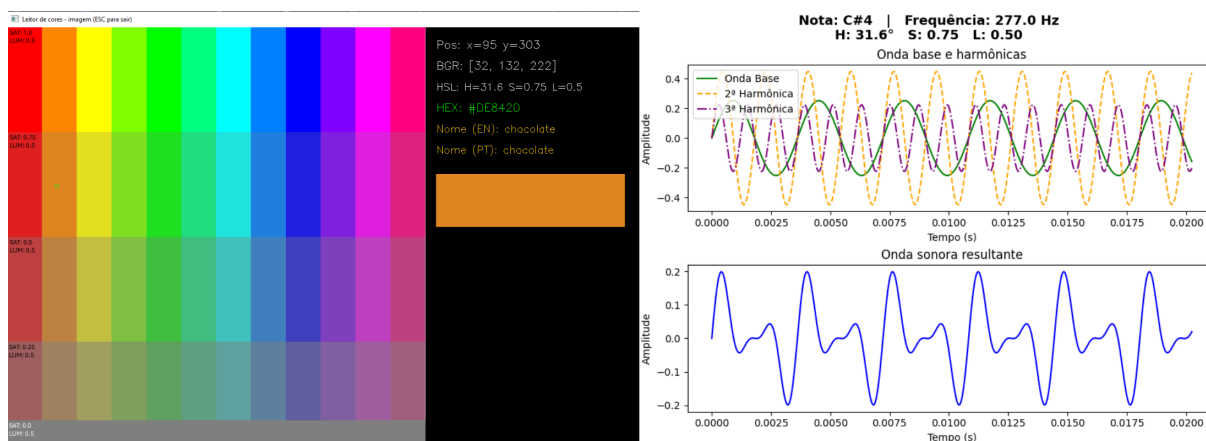
4.4 COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE MAPEAMENTO CROMÁTICO-SONORO

A comparação entre os modelos de mapeamento cromático-sonoro foi realizada com o objetivo de avaliar o impacto da quantidade de frequências sonoras na representação das cores e na percepção auditiva do sistema. Para isso, foram implementadas duas abordagens distintas: uma baseada em 12 frequências sonoras, correspondentes a uma única oitava musical, e outra baseada em 36 frequências, distribuídas ao longo de três oitavas.

No modelo com 12 frequências, foi possível associar uma nota musical distinta a cada cor básica do círculo cromático. Esse mapeamento apresentou coerência conceitual e simplicidade interpretativa. Todavia, para cores próximas entre si, especialmente próximas aos limiares de transição entre notas, a diferenciação sonora mostrou-se limitada. Empiricamente, essa limitação dificultou a distinção sonora entre cores muito semelhantes.

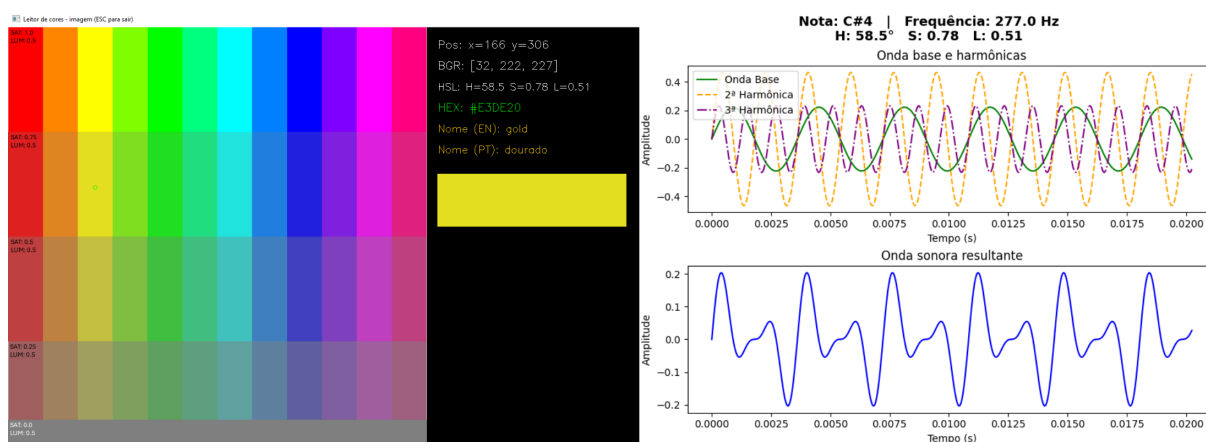
Isso pode ser visto nas Figuras 25 e 26, onde cores visualmente distintas, por apresentarem um intervalo de matizes próximo, de aproximadamente 27° , acabaram sendo mapeadas com a mesma frequência e nota musical.

Figura 25 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 12 frequências para cor Chocolate (#DEB420).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 12 frequências para cor Dourado (#E3DE20).



Fonte: Elaboração própria.

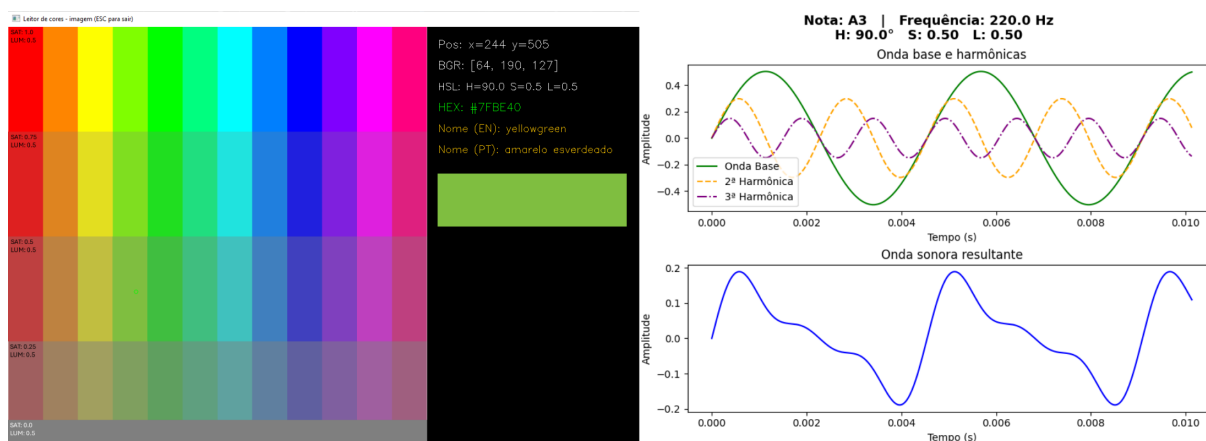
Já o modelo com 36 frequências apresentou maior resolução sonora, permitindo distinguir tonalidades cromáticas próximas de forma mais eficaz, uma vez que havia um número maior de notas disponíveis para alocação.

Entretanto, esse aumento de resolução introduziu um efeito distinto: cores cromaticamente distantes puderam ser mapeadas para a mesma nota, porém, em oitavas diferentes.

Esse comportamento é visualizado nas Figuras 27 e 28, onde cores distintas foram mapeadas para a mesma nota musical “Lá”. Contudo, a cor da primeira imagem foi atribuída com a nota “Lá” na terceira oitava (A3) e a seguinte foi atribuída com a

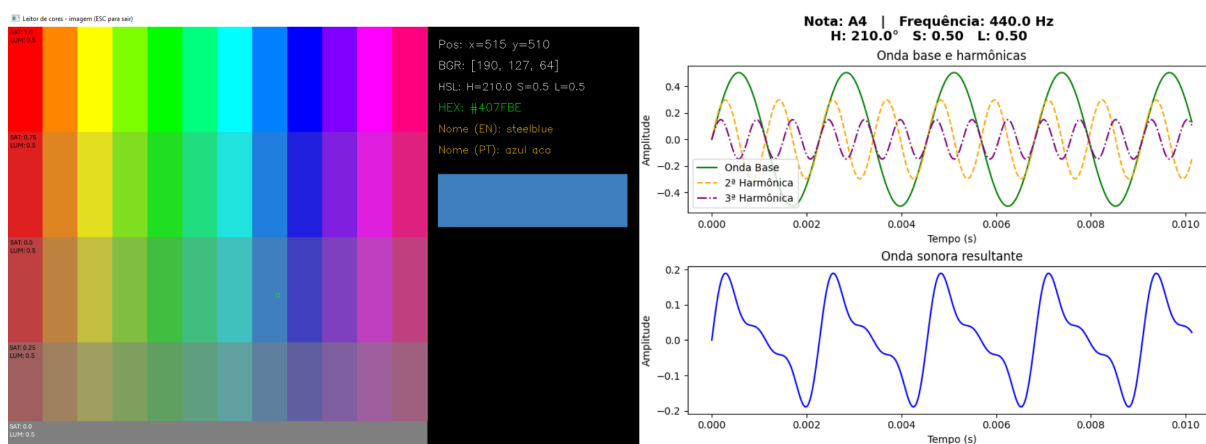
notá “Lá” na quarta oitava (A4). Nota-se que, por mais que representem a mesma nota musical, apresentando a mesma forma de onda, a frequência da onda da Figura 28, de 440 Hertz, é duas vezes maior que a frequência da Figura 27.

Figura 27 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 36 frequências para cor Amarelo Esverdeado (#7FBE40).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Captura do funcionamento do sistema com mapeamento para 36 frequências para cor Azul Aço (#407FBE).



Fonte: Elaboração própria.

Do ponto de vista empírico, essa diferença de oitava ainda permite distinguir os sons reproduzidos, visto que, há uma clara distinção da estridência das notas, quanto mais próxima do limite superior da matiz, embora exista a possibilidade de confusão para usuários com menor capacidade de distinção sonora.

A comparação entre os dois modelos de mapeamento ressaltou que abordagens com menor número de frequências favorecem simplicidade e interpretabilidade, enquanto abordagens com maior número de frequências aumentam a capacidade de discriminação de tons, ao custo de maior complexidade perceptual.

5 CONCLUSÕES

O sistema proposto neste trabalho foi implementado com sucesso, sendo capaz de capturar informações cromáticas em tempo real por meio de uma câmera e convertê-las em sinais sonoros audíveis. A partir da interação do usuário com a imagem, por meio do posicionamento do cursor, o sistema extrai os valores de cor do pixel selecionado, realiza a conversão para o modelo HSL e executa o mapeamento para parâmetros sonoros, permitindo a reprodução imediata do som correspondente à cor observada.

Os resultados obtidos demonstram que a associação entre matiz e frequência sonora é perceptível e coerente, possibilitando distinguir diferentes cores por meio da variação de altura do som. Além disso, a utilização da saturação, como parâmetro de modulação do timbre, e da luminosidade, como controle de amplitude, mostrou-se interessante para enriquecer a representação sonora, tornando-a mais expressiva e informativa. Na prática, cores mais saturadas produzem sons com maior complexidade harmônica, enquanto cores mais claras resultam em sons mais intensos, o que contribui para uma experiência auditiva mais intuitiva.

Outro aspecto relevante do sistema desenvolvido é a sua capacidade de apresentar informações complementares ao usuário, como os valores numéricos de cor, o código hexadecimal, a identificação aproximada do nome da cor e a visualização gráfica das componentes da onda sonora gerada. Esses recursos permitem não apenas a utilização do sistema como ferramenta interativa, mas também sua aplicação em contextos educacionais, facilitando a compreensão da relação entre sinais visuais e auditivos.

Durante o desenvolvimento do projeto, diferentes estratégias de mapeamento foram exploradas, especialmente no que se refere à discretização da matiz em notas musicais. Inicialmente, foi implementado um modelo com 12 notas, correspondente a uma única oitava musical, o que permitia uma associação básica entre cores e frequências. Entretanto, essa abordagem mostrou-se limitada, uma vez que uma grande variedade de cores era mapeada para um conjunto reduzido de sons, dificultando a distinção auditiva entre tonalidades próximas.

Posteriormente, o sistema foi expandido para utilizar 36 notas, aumentando a resolução do mapeamento e permitindo uma diferenciação mais refinada entre cores. Essa evolução representou um ganho significativo na capacidade de discriminação sonora, embora ainda apresentasse limitações em cenários com variações cromáticas mais sutis. Essa evolução evidencia uma importante relação entre resolução de mapeamento e percepção auditiva: enquanto um número reduzido de notas simplifica a interpretação, ele também limita a expressividade do sistema; por outro lado, um número maior de frequências aumenta a riqueza de representação, mas pode exigir maior

esforço cognitivo por parte do usuário para distinguir sons semelhantes. Dessa forma, a escolha do número de notas não é única, mas depende do contexto de aplicação e do perfil do usuário.

Nesse sentido, destaca-se como uma das principais contribuições deste trabalho a natureza flexível e personalizável do sistema desenvolvido. A estrutura modular do código permite alterar facilmente os parâmetros de mapeamento, como o número de notas, a faixa de frequências utilizadas e as relações entre atributos visuais e sonoros. Isso possibilita adaptar o comportamento do sistema para diferentes objetivos, como simplificação para usuários iniciantes ou maior detalhamento para aplicações artísticas e experimentais.

Essa característica levanta uma discussão relevante entre padronização e personalização no contexto da sonificação. Por um lado, a definição de um mapeamento fixo e padronizado pode facilitar a aprendizagem e a consistência na interpretação dos sons, especialmente em aplicações voltadas à acessibilidade. Por outro lado, a possibilidade de personalização permite explorar diferentes formas de representação sensorial, ajustando o sistema às preferências individuais do usuário ou a objetivos específicos de uso. O sistema proposto busca equilibrar essas duas abordagens, oferecendo uma estrutura base consistente, mas ao mesmo tempo flexível o suficiente para permitir adaptações.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas. A qualidade da captura de cor depende diretamente das condições de iluminação e do dispositivo utilizado, o que pode introduzir variações na interpretação cromática. Além disso, o mapeamento discreto da matiz pode fazer com que cores muito próximas sejam associadas à uma mesma frequência, reduzindo a precisão da representação sonora. Ainda assim, os resultados obtidos indicam que a proposta é viável e apresenta potencial significativo para aplicações em acessibilidade, educação e arte multimodal.

Cabe destacar que o presente trabalho se concentrou no desenvolvimento e validação de uma metodologia específica de tradução cromático-sonora, estruturada a partir de escolhas de mapeamento bem definidas entre parâmetros visuais e auditivos. No entanto, essa abordagem não se propõe como única ou definitiva, mas sim como uma das possíveis formas de estabelecer a correspondência entre cor e som. Diferentes estratégias de mapeamento podem ser exploradas, variando desde associações lineares até modelos mais complexos baseados em percepção humana, aprendizado de máquina ou adaptação ao usuário. Nesse sentido, o método desenvolvido neste trabalho deve ser compreendido como uma base estruturada e replicável, capaz de orientar novas investigações e experimentações no campo da sonificação aplicada à informação visual.

A partir dessa perspectiva, destacam-se amplas possibilidades de aplicação e continuidade do estudo. Trabalhos futuros podem expandir a metodologia proposta para contextos reais, explorando sua utilização em soluções voltadas à acessibilidade, especialmente para pessoas com deficiência visual, bem como em aplicações de entretenimento, arte digital e educação multissensorial. Além disso, a proposta contribui para o desenvolvimento de tecnologias voltadas à inclusão, ao permitir que informações tradicionalmente restritas ao domínio visual sejam reinterpretadas por meio de outros sentidos. Dessa forma, o trabalho não apenas apresenta uma solução técnica, mas também abre caminho para novas abordagens de interação humano-computador, nas quais a informação é distribuída de maneira mais democrática entre diferentes canais perceptivos.

REFERÊNCIAS

- 3CON14. *12 cores em CSS*. s.d. Online. Disponível em: <<https://3con14.biz/css/unidades,-color/12-cores-en-css.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 22.
- ABBOUD, S. et al. Eyemusic: introducing a “visual” colorful experience for the blind using auditory sensory substitution. *Restorative Neurology and Neuroscience*, v. 32, n. 2, p. 247–257, 2014. Disponível em: <<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24398719/>>. Citado na página 1.
- BERNARDINO, L. G. *O que é psicofísica? Uma breve introdução*. 2019. Eu Percebo. Disponível em: <<https://eupercebo.unb.br/2019/09/10/o-que-e-psicofisica/>>. Citado na página 18.
- CHEN, J. *Elements of Human Voice*. 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Music-scale-The-standard-chromatic-scale-defined-by-the-semitone_fig54_306313901>. Citado na página 16.
- Duplod. *O que é o modelo de cores HSL e HSB?* 2023. Disponível em: <<https://www.duplod.com.br/modelo-de-cores-hsl-e-hsb/>>. Citado na página 12.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital Image Processing*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2008. Disponível em: <<https://cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital%20Image%20Processing%203rd%20ed.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 5, 6, 7, 8 e 9.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física: Mecânica*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 1. Disponível em: <<https://archive.org/details/halliday-resnick-walker-fundamentos-de-fisica-decima-edicao-volume-1-mecanica>>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 14 e 15.
- HERMANN, T.; HUNT, A.; NEUHOFF, J. G. (Ed.). *The Sonification Handbook*. 1. ed. Berlin: Logos Verlag, 2011. Disponível em: <<http://sonification.de/handbook>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 17 e 18.
- LOPES, J. M. B. *Cor e Luz*. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2013. Disponível em: <<https://disciplinas.ist.utl.pt/~leic-cg.daemon/textos/livro/Cor.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 10.
- MALIK, S. *Why does OpenCV use BGR color format?* 2015. LearnOpenCV. Disponível em: <<https://learnopencv.com/why-does-opencv-use-bgr-color-format/>>. Citado na página 11.
- MixButton. *Music Note to Frequency Chart*. 2025. Disponível em: <<https://mixbutton.com/music-tools/frequency-and-pitch/music-note-to-frequency-chart>>. Citado na página 25.
- Mozilla Developers. <hex-color>. 2025. MDN Web Docs. Disponível em: <<https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/Reference/Values/hex-color>>. Citado na página 11.

NASSAU, K. *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*. 2. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2001. Citado na página 3.

NICOLAU, V. *O que são os padrões HEX, RGB e HSL de cores?* 2020. Tecnoblog. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-sao-os-padroes-hex-rgb-e-hsl-de-cores>>. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 12.

PORTO, M. *Psicoacústica: como a percepção influencia a produção musical*. 2020. Música & Mercado. Disponível em: <<https://musicaemercado.org/psicoacustica-como-a-percepcao-influencia-a-producao-musical/>>. Citado na página 14.

PURVES, D. et al. *Neuroscience*. 5. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2012. Disponível em: <<https://archive.org/details/dale-purves-et-al-eds-neuroscience-z-lib-org>>. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 18.

ROSSING, T. D.; MOORE, F. R.; WHEELER, P. A. *The Science of Sound*. 3. ed. San Francisco: Addison-Wesley, 2002. Citado na página 14.

SPENCE, C.; STEFANO, N. D. Coloured hearing, colour music, colour organs, and the search for perceptually meaningful correspondences between colour and sound. *i-Perception*, v. 13, n. 3, 2022. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/20416695221092802>>. Citado na página 18.

TERTO, S. S. M. et al. Aspectos temporais auditivos: produção de conhecimento nacional. *Revista CEFAC*, v. 13, n. 5, p. 926–934, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rcefac/a/fWqFYycG4Hnj6bCsC7TqMsN/>>. Citado na página 1.

WARD, J. Synesthesia: Where have we been? where are we going? In: *The Oxford Handbook of Synesthesia*. Oxford: Oxford University Press, 2013. Citado na página 18.

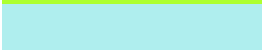
WATKINSON, J. *The Art of Digital Audio*. 2. ed. Oxford: Focal Press, 1994. Citado na página 26.

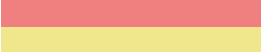
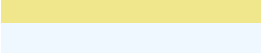
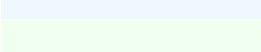
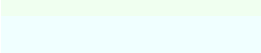
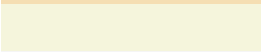
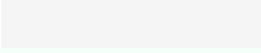
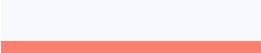
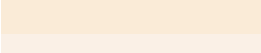
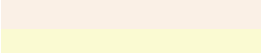
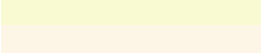
WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. *CSS Color Module Level 3*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.w3.org/TR/2022/REC-css-color-3-20220118/>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 45.

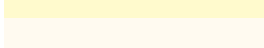
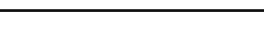
APÊNDICE A – APÊNDICE 1

Tabela 3 – Cores padronizadas CSS3, seus códigos hexadecimais e representação visual.

Código Hexadecimal	Nome em inglês	Representação
#000000	black	
#000080	navy	
#00008B	darkblue	
#0000CD	mediumblue	
#0000FF	blue	
#006400	darkgreen	
#008000	green	
#008080	teal	
#008B8B	darkcyan	
#00BFFF	deepskyblue	
#00CED1	darkturquoise	
#00FA9A	mediumspringgreen	
#00FF00	lime	
#00FF7F	springgreen	
#00FFFF	aqua	
#191970	midnightblue	
#1E90FF	dodgerblue	
#20B2AA	lightseagreen	
#228B22	forestgreen	
#2E8B57	seagreen	
#2F4F4F	darkslategray	
#32CD32	limegreen	
#3CB371	mediumseagreen	
#40E0D0	turquoise	
#4169E1	royalblue	
#4682B4	steelblue	
#483D8B	darkslateblue	
#48D1CC	mediumturquoise	
#4B0082	indigo	
#556B2F	darkolivegreen	
#5F9EA0	cadetblue	
#6495ED	cornflowerblue	
#66CDAA	mediumaquamarine	
#6A5ACD	slateblue	

Código Hexadecimal	Nome em inglês	Representação
#6B8E23	olivedrab	
#708090	slategray	
#778899	lightslategray	
#7B68EE	mediumslateblue	
#7CFC00	lawngreen	
#7FFF00	chartreuse	
#7FFFD4	aquamarine	
#800000	maroon	
#800080	purple	
#808000	olive	
#808080	gray	
#87CEEB	skyblue	
#87CEFA	lightskyblue	
#8A2BE2	blueviolet	
#8B0000	darkred	
#8B008B	darkmagenta	
#8B4513	saddlebrown	
#8FBC8F	darkseagreen	
#90EE90	lightgreen	
#9370DB	mediumpurple	
#9400D3	darkviolet	
#98FB98	palegreen	
#9932CC	darkorchid	
#9ACD32	yellowgreen	
#A0522D	sienna	
#A52A2A	brown	
#A9A9A9	darkgray	
#ADD8E6	lightblue	
#ADFF2F	greenyellow	
#AFEEEE	paleturquoise	
#B0C4DE	lightsteelblue	
#B0E0E6	powderblue	
#B22222	firebrick	
#B8860B	darkgoldenrod	
#BA55D3	mediumorchid	
#BC8F8F	rosybrown	
#BDB76B	darkkhaki	
#C0C0C0	silver	

Código Hexadecimal	Nome em inglês	Representação
#C71585	mediumvioletred	
#CD5C5C	indianred	
#CD853F	peru	
#D2691E	chocolate	
#D2B48C	tan	
#D3D3D3	lightgray	
#D8BFD8	thistle	
#DA70D6	orchid	
#DAA520	goldenrod	
#DB7093	palevioletred	
#DC143C	crimson	
#DCDCDC	gainsboro	
#DDA0DD	plum	
#DEB887	burlywood	
#E0FFFF	lightcyan	
#E6E6FA	lavender	
#E9967A	darksalmon	
#EE82EE	violet	
#EEE8AA	palegoldenrod	
#F08080	lightcoral	
#F0E68C	khaki	
#F0F8FF	aliceblue	
#F0FFF0	honeydew	
#F0FFFF	azure	
#F4A460	sandybrown	
#F5DEB3	wheat	
#F5F5DC	beige	
#F5F5F5	whitesmoke	
#F5FFFA	mintcream	
#F8F8FF	ghostwhite	
#FA8072	salmon	
#FAEBD7	antiquewhite	
#FAF0E6	linen	
#FAFAD2	lightgoldenrodyellow	
#FDF5E6	oldlace	
#FF0000	red	
#FF00FF	magenta	
#FF1493	deeppink	

Código Hexadecimal	Nome em inglês	Representação
#FF4500	orangered	
#FF6347	tomato	
#FF69B4	hotpink	
#FF7F50	coral	
#FF8C00	darkorange	
#FFA07A	lightsalmon	
#FFA500	orange	
#FFB6C1	lightpink	
#FFC0CB	pink	
#FFD700	gold	
#FFDAB9	peachpuff	
#FFDEAD	navajowhite	
#FFE4B5	moccasin	
#FFE4C4	bisque	
#FFE4E1	mistyrose	
#FFEBCD	blanchedalmond	
#FFEFD5	papayawhip	
#FFF0F5	lavenderblush	
#FFF5EE	seashell	
#FFF8DC	cornsilk	
#FFFACD	lemonchiffon	
#FFF0F0	floralwhite	
#FFFAFA	snow	
#FFFF00	yellow	
#FFFFE0	lightyellow	
#FFFFFF0	ivory	
#FFFFFFF	white	

Fonte: Adaptado de [WORLD WIDE WEB CONSORTIUM \(2022\)](#)