

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JEAN VICTOR DALL'OGGIO - 00273185

**ANÁLISE DE COLORAÇÃO DE
CABEAMENTOS VIA VISÃO
COMPUTACIONAL COM
UTILIZAÇÃO DE PSEUDO-CORES**

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JEAN VICTOR DALL’OGLIO - 00273185

**ANÁLISE DE COLORAÇÃO DE
CABEAMENTOS VIA VISÃO
COMPUTACIONAL COM
UTILIZAÇÃO DE PSEUDO-CORES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-CCA)
apresentado à COMGRAD-CCA da Universi-
dade Federal do Rio Grande do Sul como parte
dos requisitos para a obtenção do título de *Ba-
charel em Eng. de Controle e Automação* .

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Heraldo José Amorim

Porto Alegre
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENG. DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

JEAN VICTOR DALL'OGGIO - 00273185

**ANÁLISE DE COLORAÇÃO DE
CABEAMENTOS VIA VISÃO
COMPUTACIONAL COM
UTILIZAÇÃO DE PSEUDO-CORES**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina de TCC do curso *Eng. de Controle e Automação* e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Heraldo José Amorim , UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Heraldo José Amorim , UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Fabiano Disconzi Wildner, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Marcelo Götz, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil

Alceu Heinke Frigeri
Coordenador de Curso
Eng. de Controle e Automação

Porto Alegre, Fevereiro 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por acompanharem essa jornada, compartilhando amor e carinho, além da motivação dos momentos difíceis, a fim de mostrar-me o caminho certo a se seguir.

À bateria Minotrago, pelos momentos de descontração, amizades proporcionadas, competições realizadas e vivências inesquecíveis.

Aos colegas de curso pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante ao longo dessa trajetória e apoio na revisão deste trabalho, principalmente Mateus Z. Sanvitto E Rodrigo D. Cardoso.

RESUMO

Os avanços tecnológicos têm permitido uma utilização cada vez mais ampla da automação industrial para várias funções, especialmente aquelas que exigem reconhecimento de padrões, como operações de inspeção. Uma área em que a aplicação está crescendo é a visão computacional. Entre outras aplicações, sistemas de visão são usados para inspeções em linhas de montagem, onde a alta taxa de produção, combinada com a fadiga do operador, é propensa a falhas. Utilizando uma rotina pré-programada, um sistema de visão pode capturar imagens e comparar elas com padrões, analisando pontos que possam conter erros para alcançar a excelência operacional e entregar um produto final de alta qualidade. O presente trabalho tem como foco a inspeção de cabos usando conceitos de cores falsas. Considerando que cada cabo possui uma cor diferente, o sistema identifica a coloração do cabo, que deve ser colocada corretamente, pela da intensidade de *pixels* em imagens monocromáticas usando iluminação em diferentes espectros. A implementação dessas inspeções envolve a programação em parte do sistema de visão para analisar a cor dos cabos colocados durante a montagem da máquina usando o *software CV-X simulator* da *Keyence*.

Através da implementação do sistema, o objetivo é identificar se a cor de cada cabo analisado corresponde à especificada para cada área de *pixels* analisada nos três canais (RGB). A análise de variância dos 3 espectros identificou maior influência da variação do tempo de abertura do obturador sobre o resultado final para os três espectros analisados, indicando, como no caso do espectro verde, que o brilho tem menor influência nos resultados do experimento proposto, ainda que estatisticamente significativa. Para uma análise da cor marrom, o experimento demonstrou resultados adequados em configurações medianas, ou seja, que a tempo de abertura do obturador fosse parametrizada em 1/60 ms e o brilho em 325 (unidade adimensional). Porém, ao analisar o cabo verde e amarelo apresentado na imagem resultante, observou-se que a cor amarela estava atingindo alta intensidade de *pixels* nas imagens resultantes, causando ruído. Isso indica que a detecção de elementos de diferentes cores e texturas pode necessitar de configurações distintas de brilho e tempo de abertura do obturador, de acordo com a inspeção que se deseja realizar.

Palavras-chave: Visão computacional, Processamento de Imagens coloridas, Automação industrial, Pseudo-cores, Cores falsas.

ABSTRACT

Technological developments have allowed an increasingly broad use of industrial automation for various functions, especially those requiring pattern recognition, such as inspection operations. An area in which utilization is growing is computer vision. Among other applications, vision systems are used for assembly line inspection, where the high production rate, combined with operator fatigue, is prone to failure. Using a pre-programmed routine, a vision system can capture images and compare them to standards, analyzing points that may have errors to achieve operational excellence and deliver a high-quality end product. The present study focuses on cable inspection using false colors concepts. Considering that each cable has a different color, the system identifies the cable coloring, which must be placed correctly, through the pixel intensity of monochromatic images using different spectrum illumination. Implementing these inspections involves programming a part of a vision system to analyze the color of cables placed during the machine assembly using the CV-X simulator software from Keyence.

Through the implementation of the system, the objective is to determine whether the color of each examined cable corresponds to the specified color for each pixel area analyzed in the three channels (RGB). The variance analysis of the 3 spectrum identified a greater influence of the variation in shutter opening time on the final result for all three spectrum analyzed, indicating, as in the case of the green spectrum, that brightness has less influence on the results of the proposed experiment, even though it is statistically significant. For a brown color analysis, the experiment showed suitable results under moderate settings, specifically when the shutter opening time was parameterized at 1/60 ms and the brightness at 325 (dimensionless unit). However, when analyzing the green and yellow cable presented in the resulting image, it was observed that the yellow color was reaching high pixel intensity in the resulting images, causing noise. This indicates that the detection of elements with different colors and textures may require distinct configurations of brightness and shutter opening time, depending on the inspection being conducted.

Keywords: Computer vision, Color image processing, Industrial automation, False color.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Câmara Pinhole.	11
2	Efeito da distorção radial.	12
3	Esquemático processamento de imagem digital.	13
4	Dispersão da luz branca para o espectro de cor.	14
5	Espectro de cores visíveis ao olho humano.	15
6	Diagrama de cromaticidade CIE.	18
7	Interpretação da técnica de fatiamento por intensidades a partir da geometria do objeto capturado.	20
8	Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/30 ms (0,033333 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.	24
9	Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/60 ms (0,0166667 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.	25
10	Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/120 ms (0,00833333 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.	25
11	Imagens monocromáticas com dos espectros vermelho(a), verde(b) e azul(c), com os parâmetros de configuração da câmera em tempo de abertura do obturador em 0.016667 ms e brilho em 500.	26
12	Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro vermelho.	28
13	Gráfico de interações do espectro vermelho.	28
14	Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro verde.	30
15	Gráfico de interações do espectro verde.	30
16	Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro azul.	32
17	Gráfico de interações do espectro azul.	32
18	A imagem contém a captura realizada por sensor de cores reais utilizando <i>flash</i> (a), bem como a coloração em escala dos 3 canais (RGB), apresentada em (b).	34
19	A imagem contém a captura realizada por sensor de cores reais sem a utilização de <i>flash</i> (a), bem como a coloração em escala dos 3 canais (RGB) apresentada em (b).	34

LISTA DE TABELAS

1	Espectro de cores visíveis.	15
2	Análise de variância para o espectro vermelho.....	29
3	Análise de variância para o espectro verde.....	31
4	Análise de variância para o espectro azul.....	33
5	Resultados obtidos.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Parâmetros intrínsecos e extrínsecos de uma câmera	10
2.2	Processamento digital de imagens	12
2.2.1	Processamento de baixo nível	13
2.2.2	Processamento de nível intermediário	13
2.2.3	Processamento de alto nível	14
2.3	Fundamentos de imagens coloridas	14
2.3.1	Luz acromática	16
2.3.2	Luz cromática	16
2.3.3	Modelo de cores	17
2.4	Pseudo-cores	18
2.4.1	Aquisição de imagens	19
2.4.2	Processamento de imagens com Pseudo-cores	19
2.5	Representação	19
3	METODOLOGIA	22
3.1	Sistema de aquisição de imagens	22
3.2	Experimento proposto	23
3.3	Identificação das cores das imagens monocromáticas	26
4	RESULTADOS	27
4.1	Espectro vermelho	27
4.2	Espectro verde	29
4.3	Espectro azul	31
4.4	Comparação com sensor de cores reais	33
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICES	39
	APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS	40

1 INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas automatizados desempenha um papel de extrema importância no impulso tecnológico da sociedade contemporânea. Conseqüentemente, a incorporação de novas tecnologias está se tornando uma prática frequente na esfera industrial, com o propósito de aprimorar a eficiência e a qualidade produtiva (GROOVER, 2010).

Os sistemas de visão representam uma classe de tecnologia que tem sido amplamente implementado na indústria devido à sua capacidade de executar tarefas complexas que requerem atenção e são repetitivas, substituindo a intervenção humana, que tende a ser propensa a erros na execução dessas tarefas quando realizadas por um longo tempo. Com a implementação desses sistemas torna-se possível a captura automatizada de dados, seu processamento e interpretação conforme a finalidade específica. Sistemas de visão computacional desempenham um papel crucial na automação de processos industriais como rastreamento, controle, monitoramento e inspeção, os quais estão amplamente disseminados na indústria. Ao incorporar algoritmos avançados envolvendo aprendizado de máquinas e técnicas de processamento de imagem, a visão computacional permite que sistemas automatizados criem uma imagem e interpretem o ambiente ao seu redor. Isso resulta em melhorias substanciais na precisão, eficiência e consistência dos processos industriais. (MARQUES FILHO, 1999)

Em algumas aplicações mais complexas, é necessário a implementação de sistemas de visão que possam reconhecer e interpretar as cores presentes no objeto de captura. Essa aplicação vai além da interpretação de tons de cinza, sendo necessário o reconhecimento de padrões cromáticos e com isso, implementação de algoritmos mais sofisticados e um poder de processamento elevado (SIOMA, 2023).

O objetivo deste trabalho é explorar a aplicação de sistemas de visão monocromáticos, em conjunto com iluminação e processamento adequado, para aproximar imagens obtidas em tons de cinza para uma imagem colorida. O foco é realizar inspeções direcionadas à verificação da coloração adequada de cabos dispostos em uma região específica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos relacionados a fundamentos e processamentos de imagens coloridas, os quais são utilizados na realização do trabalho. Também serão brevemente revisados conceitos sobre calibração de um sistema óptico e processamento de imagens digital de forma geral.

2.1 PARÂMETROS INTRÍNSECOS E EXTRÍNSECOS DE UMA CÂMERA

A calibração de um sistema de visão, com utilização de câmera como sensor de entrada do sistema, consiste em adquirir dados geométricos digitais e ópticos da câmera, onde um conjunto de pares de pontos bidimensionais em uma imagem, e seus respectivos pontos tridimensionais no sistema de coordenadas do mundo (SCM), sejam conhecidos (IRGANG, 2023). Com isso, é notória a importância da definição de relação das coordenadas de pontos tridimensionais com as coordenadas bidimensionais de imagem do objeto a ser fotografado. Existe uma transformação capaz de relacionar esses pares de pontos, embora o resultado possa apresentar distorções e erros mínimos, através de equações não-lineares, e então, identificar os coeficientes de calibração da câmera.

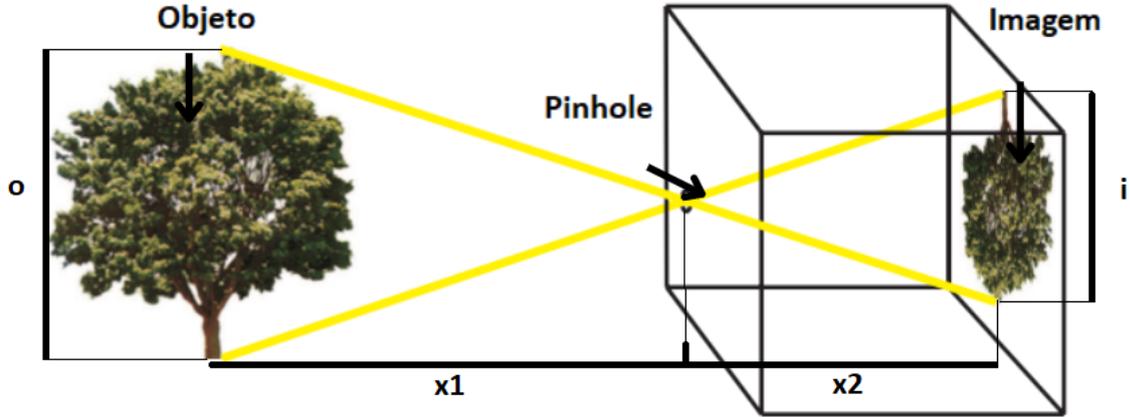
Os parâmetros de calibração podem ser divididos entre extrínsecos e intrínsecos. Os parâmetros extrínsecos são definidos como dados de posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas do mundo. Os parâmetros intrínsecos podem ser determinados como características ópticas e geométricas da câmera utilizada, como por exemplo, distância focal, posição em pixels da projeção ortogonal no centro óptico no plano onde a imagem é projetada, fatores de escala, entre outros (MILESKI, 2017).

O estudo se inicia a partir da utilização de uma câmera pinhole pela facilidade de entendimento do processo de captura de uma imagem. A mesma tem como objetivo captar raios de luz emitidos por um objeto referencial através de um orifício, onde esses raios luminosos projetam a imagem inversa do objeto no fundo da câmera, apresentado na Figura 1. Entretanto, para que a imagem gerada pela câmera seja adequada, o orifício deve ser pequeno, e devido a esse fator, a intensidade dos raios luminosos captados pela câmera, diminuiria, tornando proporcional a dependência dessas variáveis.

Com o objetivo de descrever uma relação geométrica entre o objeto e a imagem visto na Figura 1 a modelagem matemática da representação pode ser realizada através da utilização do conceito matemático de semelhança de triângulos, utilizando as alturas e distâncias do objeto e imagem. A Equação 1 mostra o modelo matemático do sistema de câmera pinhole.

$$\frac{-i}{x_2} = \frac{o}{x_1} \quad (1)$$

Figura 1: Câmera Pinhole.



Fonte: Adaptada de (MARQUES, ET AL, 2007)

Segundo (BREZOLIN, 2022), a projeção da imagem no mesmo plano que o objeto, tendo a mesma distância focal $x2$, faz com que o sinal negativo da equação desapareça. Com a utilização desse ajuste, deve-se adicionar elementos de deslocamento entre o centro da projeção e o centro óptico, c_x e c_y . Com a utilização do sistema de coordenadas em três dimensões, para descrição adequada da matriz de orientação considera-se $y2$ como a largura da imagem projetada. As Equações 2 e 3 representam as coordenadas da imagem, onde f_x e f_y correspondem às distâncias focais nos eixos x e y .

$$i = f_x \frac{o}{x1} + c_x \quad (2)$$

$$y = f_y \frac{y2}{x1} + c_y \quad (3)$$

Com essas relações é possível obter a representação matricial de um ponto $p(x, y, z)$ da imagem projetada, relacionada ao ponto $P(X, Y, Z)$ do objeto, apresentado na Equação 4. A representação do sistema em estados é apresentada pela Equação 5.

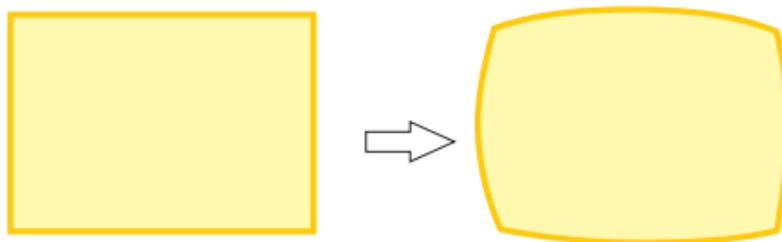
$$p = M \cdot P \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

A fim de resolver o problema de baixa intensidade de luz, utilizam-se lentes, permitindo uma passagem de luz maior. Entretanto, a imagem resultante acaba tendo distorções devido a irregularidades da própria lente. Um exemplo disso são as distorções radiais, provocando a curvatura nas retas situadas nas borda da imagem, como pode ser visto na Figura 2.

A distorção radial de lentes é um fenômeno óptico presente em lentes responsável por causar uma deformação na forma como as imagens são projetadas. Essa distorção ocorre quando os raios de luz não são adequadamente projetados no plano do sensor, resultando em distorções na imagem final. Esse tipo de distorção é mais comum em lentes

Figura 2: *Efeito da distorção radial.*



Fonte: (MARQUES, ET AL, 2007)

grande angular, onde as curvaturas extremas da lente podem fazer com que linhas retas pareçam curvadas na imagem. Existem dois principais tipos de distorção radial:

- Distorção de barril: Nesse tipo, as linhas retas da cena são curvadas para fora, criando uma aparência de barril na imagem, efeito que pode ser visto na Figura 2. Isso é mais evidente nas bordas da imagem e é característico de lentes grande angular.
- Distorção de almofada: Nesse caso, as linhas retas da cena são curvadas para dentro, ao contrário da distorção de barril, criando uma aparência de almofada na imagem. Essa distorção também é mais perceptível nas bordas da imagem e costuma ser encontrada em lentes telefoto.

A distorção radial é considerada uma aberração geométrica e está relacionada ao design e construção óptica da lente. Felizmente, essa distorção pode ser corrigida ou minimizada por meio de técnicas de projeto óptico e, em muitos casos, também pode ser ajustada através de software de edição de imagem e correção de lentes ou com a ajuda de um processamento de imagem adequado.

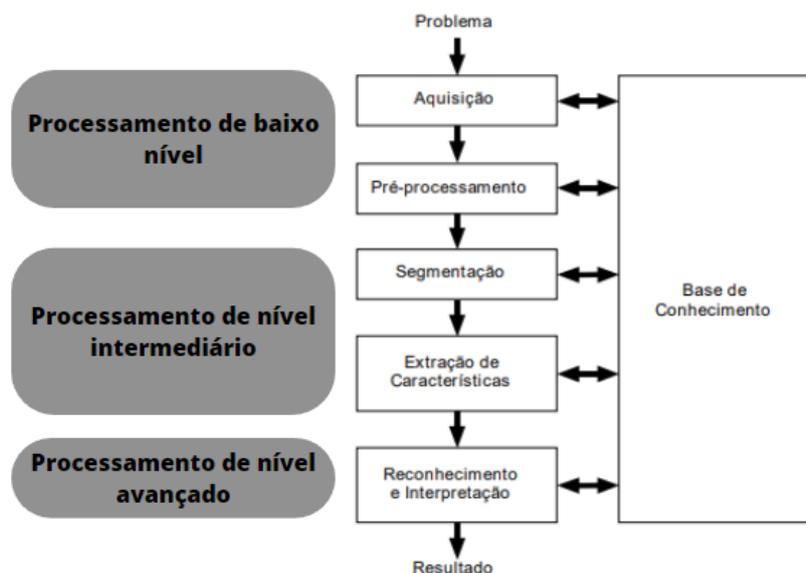
De modo geral, com a utilização de lente, a calibração de câmeras torna-se não-linear, que pode ser resolvido através de uma otimização não-linear, tendo como solução inicial equações lineares. Mais detalhes desse equacionamento foi apresentado por (MARQUES, ET AL, 2007).

2.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Com a análise da estrutura de um sistema de visão artificial, é possível realizar a aquisição, processamento e interpretação de imagens semelhantes a cenas reais. Na Figura 3 é possível visualizar as etapas necessárias para o processamento digital de imagens adequado.

Tendo em mente que as entradas e saídas de um sistema de visão computacional são imagens, de acordo com (MARQUES FILHO, 1999), esse processo pode ser dividido em 3 etapas: baixo nível, onde ocorre a aquisição de dados, ou seja imagens, feita através de um sensor de visão e digitalizador, e o pré-processamento dessa entrada; nível intermediário, responsável pela segmentação e extração de características; alto nível, onde os dados são reconhecidos e interpretados para que a saída possa ser gerada com sucesso.

Figura 3: Esquemático processamento de imagem digital.



Fonte: Adaptada de (MARQUES FILHO, 1999)

2.2.1 Processamento de baixo nível

É realizada a aquisição de imagens, onde é necessário a atuação de um sensor de visão e um digitalizador. Esse sensor será responsável pela conversão da informação óptica obtida para um sinal elétrico. O digitalizador então, transformará a imagem analógica em digital. A imagem digital gerada é composta pela unidade denominada *pixels*, que é um ponto luminoso ao qual se é atribuída uma cor e assim, com um conjunto de *pixels*, é possível se criar uma imagem digital. Nesta etapa também é feito o processo de aquisição de imagens coloridas. (GONZALEZ, 2009)

Para a adequação dessa etapa, deve-se ter em mente a escolha adequada do sensor de visão, junto com um conjunto de lentes e iluminação adequadas, dependendo das condições do ambiente que o sistema será instalado. Além disso é importante verificar a velocidade de aquisição de dados, bem como a resolução, fatores que depende da precisão que o sistema deverá propor.

Os dados da imagem adquirida pelo sistema de visão podem conter ruídos em *pixels*, devido, entre outros motivos, a contraste inadequado, brilho mal configurado e à movimentação do objeto no momento da aquisição da imagem. O pré-processamento é responsável pelo aprimoramento da qualidade da imagem através da atenuação desses efeitos. Essa melhora da imagem é considerada um processo de baixo nível devido à alteração de valores ligados à intensidade de cada pixel da imagem.

2.2.2 Processamento de nível intermediário

É realizada a separação entre os elementos de interesse que tem como objetivo serem obtidos dos demais pontos que foram adquiridos na etapa de processamento de baixo nível. Essa etapa é uma das mais importantes para a realização de inspeções adequadas, visando

que um sistema com segmentação robusta, possui um imenso banco de dados, permitindo uma orientação adequada na busca de soluções otimizadas.

Então, é feita a extração de características da imagem resultante através de descritores que tem como objetivo a precisão na caracterização dos dados obtidos. Essa tarefa depende da implementação adequada do algoritmo de reconhecimento dos dados da imagem processada até então.

Esse processo é responsável pela detecção das cores de cada pixel na imagem fotografada, assunto que será discutido com maior ênfase na próxima seção.

2.2.3 Processamento de alto nível

Por fim, é realizado o reconhecimento dos dados processados até essa etapa e a interpretação dos mesmos para realizar uma comparação com dados de referência e concluir se esses dados são julgados adequados ou não.

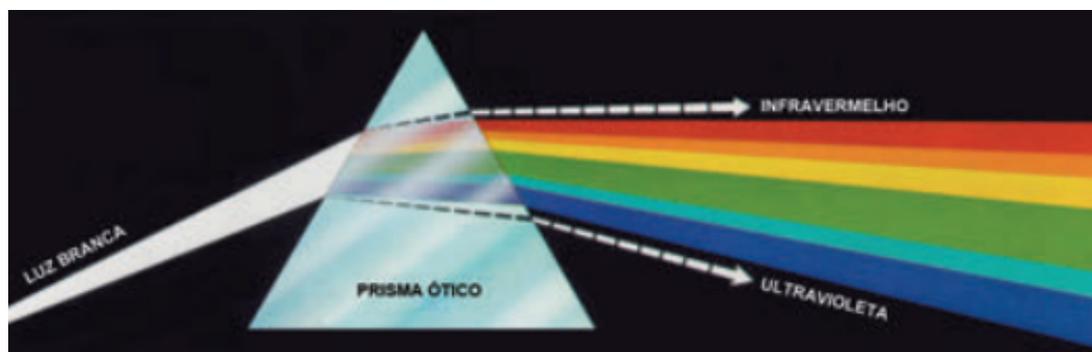
Devido a grande quantidade de ferramentas que dependem do objetivo da aplicação, as informações obtidas até então podem ter grande variação, não seguindo um padrão como demonstrado em processamentos de nível baixo e intermediário.

2.3 FUNDAMENTOS DE IMAGENS COLORIDAS

A identificação de cores é um aspecto crucial na descrição de dados de qualquer objeto, devido à imensa variedade de variações de cores existentes. A visão humana é capaz de perceber uma infinidade de informações a partir dos milhares de tons e intensidades de cores disponíveis, comparado com apenas duas dúzias de intensidades de cinza.

No século XVII, Isaac Newton fez uma descoberta fundamental relacionada à identificação de cores: ao passar um raio de luz solar por um prisma de vidro, Newton observou que a luz emergente do prisma não era branca, mas sim uma sequência contínua de cores, detalhada na Figura 4, que ficou conhecida como espectro visível.

Figura 4: *Dispersão da luz branca para o espectro de cor.*



Fonte: (GONZALEZ, 2009)

Newton observou que a mudança de cores em uma onda propagada era determinada pela variação da frequência e do comprimento de onda da luz. Esses dados são apresentados na Tabela 1

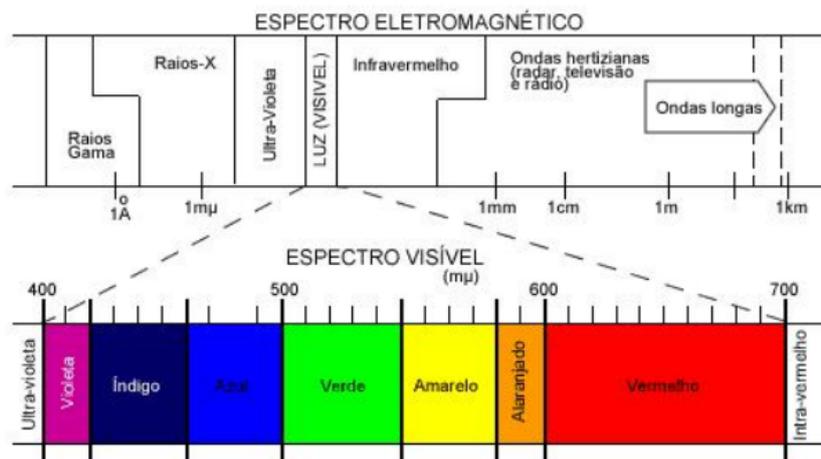
Tabela 1: *Espectro de cores visíveis.*

Cor	Comprimento de onda (μm)	Frequência (Thz)
Violeta	[390,450)	(769,665]
Ciano	[450,455)	(665,659]
Azul	[455,492)	(659,610]
Verde	[492,577)	(610,520]
Amarelo	[577,597)	(520,503]
Laranja	[597,622)	(503,482]
Vermelho	[622,780)	(482,384]

Fonte: (HALLIDAY, 2016)

Notas: (1) Os Intervalos de comprimento de onda e de frequência foram aproximados.

Segundo (REINHARD, 2010), com base nessa análise, chegou-se à conclusão de que a cor violeta representa o limite inferior das ondas visíveis ao olho humano, enquanto o vermelho representa o limite superior. A Figura 5 mostra a divisão do espectro de cores, bem como seus limites superiores e inferiores de acordo com o comprimento de onda de cada cor.

Figura 5: *Espectro de cores visíveis ao olho humano.*

Fonte: (BATISTA, 2013)

O limite inferior do espectro de cores é caracterizado por ondas com um comprimento de cerca de 400 μm , seguidas por ondas ultravioletas, que não podem ser vistas a olho nu. Por outro lado, o limite superior do espectro de cores é representado por ondas com um comprimento de aproximadamente 700 μm , seguidas pelas ondas infravermelhas, também invisíveis ao olho nu.

2.3.1 Luz acromática

A captação de luz pelo olho humano pode ser dividida em 3 cores, vermelho, verde e azul, devido a propriedades de captação de luz do próprio olho humano (ZHAOYI LI et al., 2021). Com isso, foi criado o modelo de cores RGB (red, green, blue), sendo baseado na teoria de cores tricromática, onde a formação de cores é dada por raios de luz onde cada componente varia em intensidade de 0 a 255, onde 0 representa a ausência do componente e 255 representa a máxima intensidade. A combinação máxima de todas as três cores primárias (255, 255, 255) resulta na cor branca, enquanto a ausência de todas as três cores (0, 0, 0) resulta na cor preta. Ao combinar diferentes intensidades de vermelho, verde e azul, é possível criar uma ampla variedade de cores. Por exemplo, para obter a cor amarela, deve-se definir a intensidade de vermelho como 255, a intensidade de verde como 255 e a intensidade de azul como 0. É possível formar cerca de 16 milhões de cores distintas, obtendo então, uma vasta quantidade de dados que podem ser analisados de forma mais abrangente do que imagens em preto e branco.

Quando é feita a captura de imagens monocromáticas, a iluminação utilizada é branca, ou seja, sem presença de coloração. Logo, o único parâmetro variável acaba sendo a quantidade de luz emitida durante a captura.

2.3.2 Luz cromática

Com a utilização da luz cromática, novos parâmetros surgem para a alteração da iluminação, sendo eles radiância, luminância e brilho. A radiância é denominada pela quantidade total de energia que é transportada através da iluminação, com unidade de medida ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$). A luminância é responsável por medir a quantidade de energia que o observador consegue perceber a partir da iluminação. Em imagens policromáticas, o brilho tem como principal função é indicar a quantidade de luz que é refletida ou emitida por cada elemento presente na imagem, sendo crucial para a percepção e caracterização de cores

Para distinguir as cores, é necessário levar em consideração duas características principais: o brilho, matiz e saturação. O brilho indica a intensidade da iluminação utilizada na captura da cor, enquanto a matiz e saturação, juntas formam a cromaticidade, que está relacionada ao comprimento de onda dominante presente na mistura de cores, juntamente com a quantidade de luz branca misturada com ela. Dessa forma, pode-se parametrizar a quantidade das cores primárias para mistura e obtenção de uma cor desejada, denominadas tri-estímulos. Com isso, cada cor primária pode ser definida como um coeficiente tricromático, observado nas equações 6, 7 e 8, onde R, G e B são valores de tri-estímulos de Vermelho, Verde e Azul. Esses valores indicam a contribuição de cada cor primária na mistura para alcançar a cor desejada.

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad (6)$$

$$g = \frac{G}{R + G + B} \quad (7)$$

$$b = \frac{B}{R + G + B} \quad (8)$$

A relação entre as cores primárias é dada pela Equação 9:

$$r + g + b = 1 \quad (9)$$

Segundo (POYNTON, 1996), qualquer comprimento de onda localizado no espectro visível tem seus parâmetros de triestímulo representados em tabelas padronizadas desenvolvidas a partir de resultados experimentais.

Com o objetivo de criar um padrão, a CIE (Commission Internationale de l'Eclairage - Comissão internacional de iluminação) determinou valores específicos de comprimento de onda para as três cores primárias, sendo eles:

- Azul: 435.8 nm;
- Verde: 546.1 nm;
- Vermelho: 700 nm;

Uma metodologia diferente para ser possível distinguir as cores é através do diagrama de cromaticidade da CIE, o qual mostra a composição de determinada cor a partir dos coeficientes tricromáticos entre vermelho (x) e verde (y), apresentado na Figura 6.

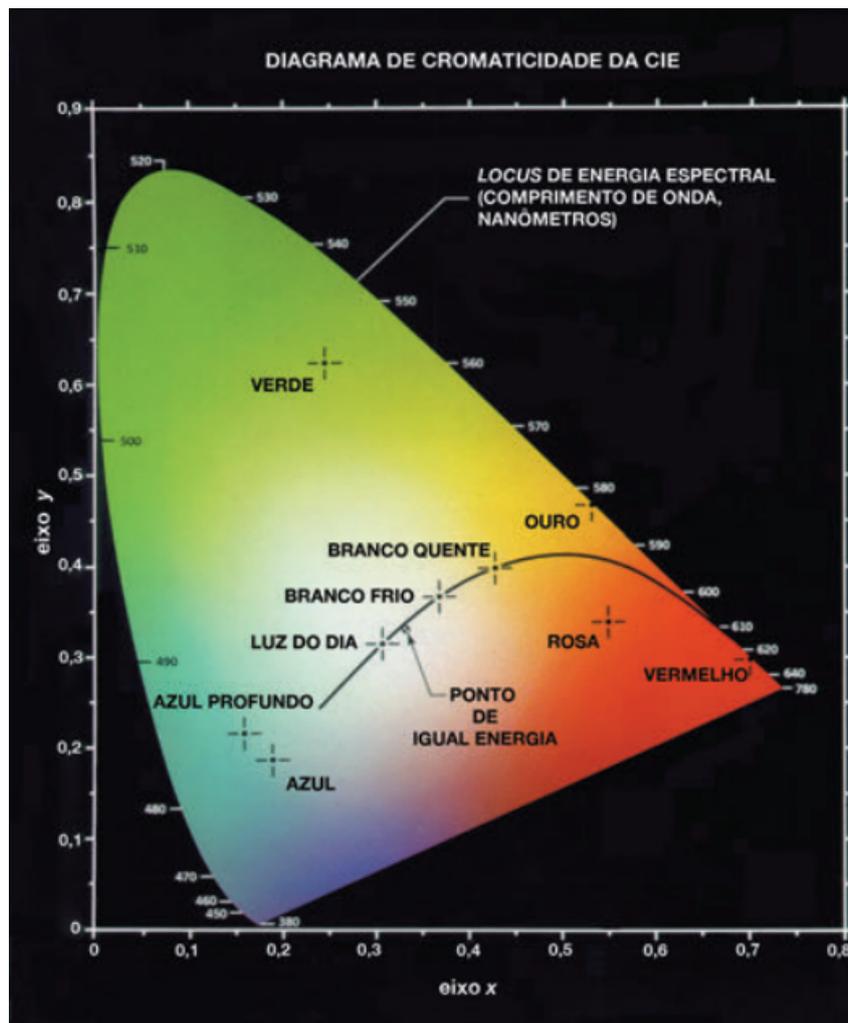
Analisando o diagrama de cromaticidade observa-se que todos os pontos internos representam a mistura de cores no espectro, e que o ponto denominado branco frio é composto por parcelas da mesma intensidade das 3 cores primárias. Também é importante salientar que as fronteiras do diagrama variam de acordo com o comprimento de onda de cada cor do espectro visível especificado anteriormente, variando do violeta até o vermelho.

2.3.3 Modelo de cores

Existem vários modelos de cores com o mesmo objetivo, padronizar a especificação de cores, onde cada um é utilizado de acordo com sua aplicação. Alguns exemplos deles são os modelos RGB(*red, green, blue* - vermelho, verde, azul), CMY(*cyan, magenta, yellow* - ciano, magenta, amarelo), CMYK(*cyan, magenta, yellow, black* - ciano, magenta, amarelo, preto), HSI(*hue, saturation, intensity* - matiz, saturação e intensidade). A definição e utilização de cada modelo é descrita em (INOCÊNCIO, 2020), em função da aplicação do trabalho proposto, a revisão teórica será aprofundada apenas no modelo HSI.

O modelo HSI tem como objetivo a facilidade de descrição e desenvolvimento de algoritmos, visto que o mesmo utiliza das características de matiz, saturação e intensidade, já definidas anteriormente. Isso torna desse modelo extremamente útil para manipulação de cores e edição de imagens, pois permite ajustar cada componente separadamente, o que pode ser mais intuitivo em comparação com os modelos de cores que estão mais diretamente ligados à representação física das cores (como o RGB). O HSI é utilizado principalmente em aplicações gráficas e de processamento de imagens, onde a manipulação precisa das características de cor é importante. Sua principal funcionalidade é separar as informações de intensidade dos dados de cromaticidade, mais detalhes serão descritos na Seção 2.4.

Figura 6: Diagrama de cromaticidade CIE.



Fonte: (GONZALEZ, 2009)

2.4 PSEUDO-CORES

O processamento de imagens coloridas pode ser classificado em duas áreas principais: cores reais e pseudo-cores. Cores reais são representadas em imagens capturadas por sensores de cores reais, como câmeras digitais policromáticas. Nesses casos, cada pixel da imagem é composto por três componentes de cor: vermelho, verde e azul (RGB). Cada componente varia em intensidade de acordo com a quantidade de luz capturada pelo sensor, resultando em uma ampla gama de cores realistas.

Pseudo-cores, também chamadas de cores falsas, são atribuídas com base em análises da intensidade de imagens monocromática, podendo, em certos casos, ser resultado da combinação de intensidades de diferentes imagens monocromáticas. No entanto, é possível atribuir tons e intensidades de cores a essa imagem, criando uma representação visual que simula cores, embora elas não sejam reais no sentido de terem sido capturadas diretamente por um sensor de cores. Isso é feito através de técnicas como mapeamento de cores ou combinação de intensidades em diferentes canais de cor.

Uma vez que o objetivo do trabalho envolve a análise de coloração a partir de

pseudo-cores, as seções seguintes darão prioridade a esse assunto.

2.4.1 Aquisição de imagens

O processamento de pseudo-cores tem como objetivo principal atribuir cores a partir de valores de *pixels* captados em uma escala de cinza. Essa atribuição se baseia, baseada na construção de um algoritmo que permita a aproximação de imagens monocromáticas em imagens coloridas, com a análise da intensidade de cada tonalidade cinza da imagem, a partir de uma iluminação com coloração específica, visto que cada cor tem um comprimento de onda diferente, gerando tonalidades de cinza distintas para cada imagem registrada.

2.4.2 Processamento de imagens com Pseudo-cores

Uma das técnicas mais simples, e ao mesmo tempo eficaz para atribuição de cores a imagens monocromáticas é o fatiamento por intensidades, também chamado de densidade. Essa técnica visa dividir uma imagem em áreas que possuam níveis de intensidade similares, através da definição de um plano de fatiamento, onde os dados são segmentados em camadas distintas, e a cada faixa de intensidade é atribuída uma coloração correspondente, pré-determinada de acordo com a iluminação utilizada. A partir do plano de fatiamento demonstrado no gráfico da Figura 7 é possível separar parte da imagem capturada a partir da sua geometria, atribuindo uma cor ou em função do nível de intensidade para qualquer pixel que estiver abaixo desse plano, e outra cor para qualquer *pixel* que estiver acima do mesmo.

É importante notar a representação da escala de cinza, onde existe um intervalo $[0, L - 1]$, onde a função utilizada de acordo com o eixo de intensidade será representada como preto quando:

$$f(x, y) = 0 \quad (10)$$

E será representada como branco quando:

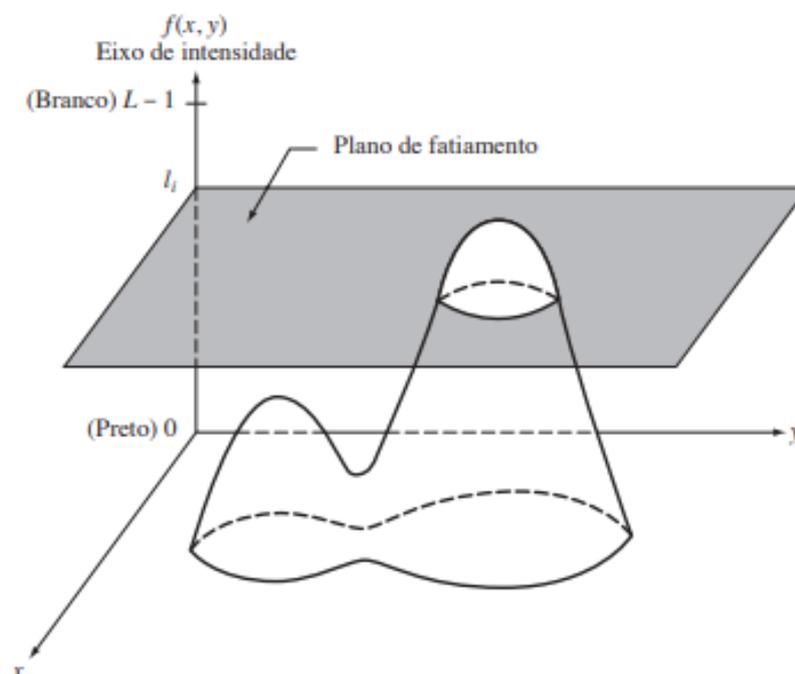
$$f(x, y) = L - 1 \quad (11)$$

Com isso, a partir de vários planos de fatiamento gerados, é possível realizar uma atribuição de cor para cada pixel registrado, e por fim criando uma imagem com cores falsas a partir de uma imagem monocromática. Vale salientar que quando maior for o fatiamento de intensidades, maior será o esforço de processamento e também melhor será o resultado (MARQUES FILHO, 1999).

2.5 REPRESENTAÇÃO

A apresentação de informações visuais desempenha um papel crucial na maioria dos sistemas guiados por elementos conectados à visão computacional. Em muitas aplicações contemporâneas, as representações sintéticas substituíram a observação direta. Uma vantagem dessa tecnologia avançada é a habilidade de proporcionar uma quantidade maior de informações do que aquelas acessíveis ao olho nu sem assistência. Com o crescente avanço

Figura 7: Interpretação da técnica de fatiamento por intensidades a partir da geometria do objeto capturado.



Fonte: (GONZALEZ, 2009)

de tecnologia, é possível encontrar aplicações onde é necessária a análise de diferentes capturas, em espectros diferentes, da mesma imagem para obtenção de diferentes informações. Alguns exemplos disso podem ser encontrados na área medicinal. Através da fusão de imagens em diferentes espectros capturadas por equipamentos de ressonância magnética é possível ressaltar determinadas características, facilitando o diagnóstico médico. Segundo (HE et al., 2010), essas técnicas podem também auxiliar a implementação de sistemas de diagnóstico automatizado. Pseudo-imagens também são usadas na área de segurança: é possível fundir duas ou mais imagens capturadas em diferentes espectros, inclusive o infravermelho. Segundo, (XUE; BLUM, 2003), esse método permite a detecção de armamentos escondidos sob as roupas de uma pessoa.

Nos livros utilizados para aprendizado de anatomia humana, na maior parte dos casos, são utilizadas representações figurativas, onde são desenhadas representações do tecido epitelial, por exemplo, ao invés de apresentar uma imagem real do mesmo, devido a facilidade de interpretação e localização das regiões de interesse de cada componente. Essa comparação equivale ao uso de pseudo-cores para melhor apresentar informações e características do objeto fotografado.

A imagem resultante de uma fusão de fotografias em espectros distintos pode ser vantajosa na apresentação de resultados para quem for interpreta-los, sendo um operador, ou até mesmo ter um resultado de maior precisão em aplicações de aprendizado de máquina, onde as características da região de interesse observada ficam mais claras. No entanto, deve-se ter cuidado com a quantidade de detalhes da imagem final, visto que uma característica obtida na captura de um espectro pode sobrepor as características de outro espectro. Com isso, o resultado do processo de fusão é influenciado pelo grau de correlação espacial local

entre as imagens individuais, caso contrário, a imagem resultante apresentará ruído e distorção (TOET; WALRAVEN, 1996).

Diversos métodos de fusão de imagens existem e são implementados e aperfeiçoados. Cada método tem característica de funcionamento de acordo com a aplicação desejada. A comparação de alguns métodos é apresentada em (LANIR, 2006).

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo será apresentada a abordagem proposta para solução de um problema industrial. A análise de posicionamento de cabos e outros padrões a serem seguidos na montagem de uma máquina em uma linha de produção acabam sendo complexos e cansativos devido a larga escala de produção. Com isso, propõe-se a implementação da inspeção de identificação de coloração do cabeamento em uma posição pré-definida através da busca de área de *pixels* de uma cor pré-determinada através do uso de visão computacional, utilizando do conceito de pseudo-cores, apresentado na Seção 2, para identificação da coloração do cabeamento.

3.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Serão utilizados uma câmera monocromática, lente, controladora e iluminação da empresa *Keyence*. A câmera será fixada junto de sua iluminação em uma posição pré-definida, para que consiga fotografar as peças assim que as mesmas passarem pelo posto de inspeção da linha de produção. O sistema utilizado para implementação será o conjunto *CV – X* da empresa *Keyence*, além do software *CV – X Simulator*, utilizado para a programação da inspeção proposta. O sistema de visão utilizado é robusto e efetivo, o qual é feito para realizar diversas categorias de inspeções, alguns exemplos são busca de área preta e branca, localização de posicionamento de bordas, busca por padrões a partir de uma imagem de referência, e juntamente com elas, busca de área com coloração. Além disso, o sistema foi desenvolvido para majoritariamente ter seu funcionamento em ambientes industriais, sendo resistente a altas temperaturas e colisões.

A câmera utilizada pertence ao modelo *CA-H500CX*, e apresenta estrutura robusta e adequada para longos períodos de funcionamento em ambiente fabril. É uma câmera monocromática com resolução de 5 *megapixels*, onde foi desenvolvida para aplicações de visão computacional no ramo industrial, tornando-se adequada para o experimento proposto.

A implementação da inspeção será realizada a partir do processamento de imagens com pseudo-cores, apresentado na Seção 2.4.2, onde a iluminação utilizada será o modelo *MultiSpectrum*, o qual tem como função emitir 8 *flashes* sequencialmente, cada um com um espectro de cor diferente, sendo elas, amarelo, azul, vermelho extremo, verde, infravermelho, vermelho, ultra-violeta e branco. Por fim, através do processamento de imagem, são obtidas 8 imagens monocromáticas e distintas, devido ao comprimento de onda de cada cor utilizada.

Com o auxílio do controlador *CV-X450F* é feito o processamento das 8 imagens monocromáticas obtidas, e então, é gerada uma imagem policromática através de um algoritmo de *machine learning* implementado no sistema operacional do controlador. A

imagem gerada tem o objetivo de aproximar a coloração do objeto fotografado à uma imagem capturada por uma captura policromática. Como o funcionamento do sistema é realizado através do *software* da empresa *Keyence*, não é possível acessar o código raiz do sistema.

3.2 EXPERIMENTO PROPOSTO

A abordagem experimental proposta é um projeto fatorial de experimentos 2x3, em que a intensidade da iluminação (brilho) e o tempo de abertura do obturador da câmera (tempo que o obturador da câmera leva para abrir e fechar) são avaliados em três níveis. Para identificar qual variável de entrada possui maior influência na identificação de cores, os resultados serão analisados através de uma análise de variância.

Para realização de experimento foi escolhida a coloração marrom. Essa escolha se deve ao cabo marrom ser o único que não é preto e nem composto por mais de uma cor nas amostras avaliadas, e também por essa cor ser de difícil detecção.

A iluminação do sistema utilizado tem a capacidade de atingir 8 espectros de cores diferentes. Porém, para uma análise teórica, a coleta de dados foi feita a partir da obtenção de imagens geradas pelos 3 espectros de cores que compõe o modelo *RGB*. Os mesmos foram escolhidos, de modo que com os valores de intensidade de preto e branco gerados nas capturas feitas pelos espectros vermelho, verde e azul, utilizando o modelo RGB, é possível ter uma estimativa estável da coloração real através da média de intensidade dos *pixels* do cabeamento em cada espectro utilizado.

Para a análise foi especificada uma região de interesse (RI), correspondente a uma área de *pixels* atravessada pelo cabo a ser inspecionado. O cabo é pré posicionado em uma canaleta, o que garante sua posição, permitindo que diferentes amostras sejam analisadas sem necessidade de alteração da RI. Para coleta precisa de dados, para cada 3 capturas realizadas em cada amostra, foi feita uma média simples dos valores obtidos utilizando os espectros de cores vermelho, verde e azul, visto que os valores da média de intensidade dos *pixels* obtidos em uma região delimitada para as 3 capturas foram bem próximos.

Para 3 amostras diferentes, o brilho da iluminação foi variado 3 vezes, e também, tempo de abertura do obturador foi alterada 3 vezes. Com isso obteve-se 27 valores de intensidade de *pixels* para a área pré-definida, para cada espectro de cor utilizado na iluminação, totalizando 81 dados.

Com o auxílio do software *CV-X Simulator*, é possível configurar o tempo de abertura do obturador, tendo valores pré-definidos por padrão de fábrica do equipamento. Para padrões de análise, os parâmetros foram escolhidos de modo que os resultados se aproximassem de resultados adequados, onde a imagem resultante não ficaria nem muito escura nem muito clara. Os tempos de abertura do obturador escolhidos foram:

- Tempo de abertura do obturador 1: 1/120 ms (0,008333 ms) ;
- Tempo de abertura do obturador 2: 1/60 ms (0,016667 ms);
- Tempo de abertura do obturador 3: 1/30 ms (0.033333 ms);

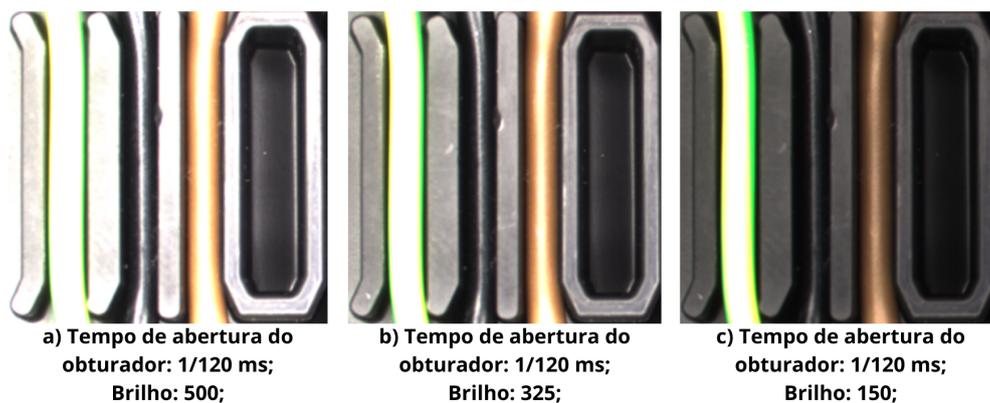
Para alterações na intensidade do brilho, a configuração proposta pelo *software* consta entre variações entre os valores de 1 e 510 (unidades adimensionais). Esses parâmetros contemplam a variação da potência da iluminação, tendo um valor máximo para

segurança do equipamento. Os valores foram definidos visando uma variação constante de 175:

- Brilho 1: 500;
- Brilho 2: 325;
- Brilho 3: 150;

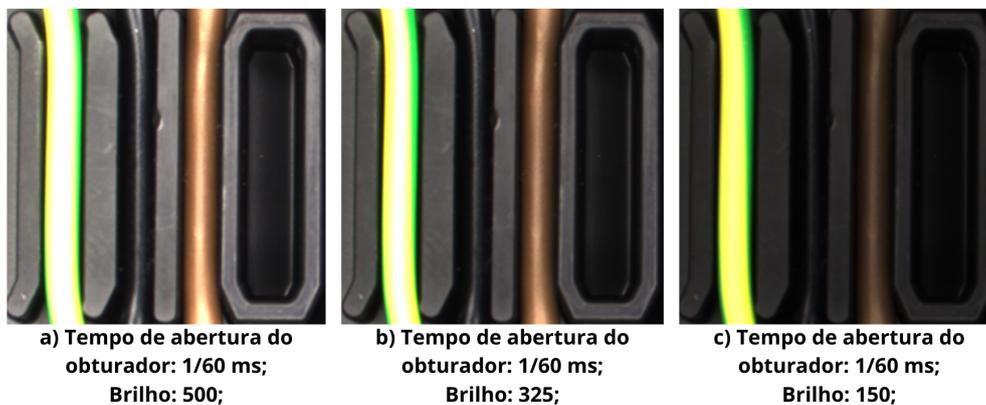
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam as imagens obtidas com as diferentes combinações dos parâmetros avaliados. Apesar da captura ter sido realizada de forma aleatória, esses resultados são apresentados em ordem crescente de tempo de abertura do obturador e decrescente de brilho.

Figura 8: *Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/30 ms (0,033333 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.*



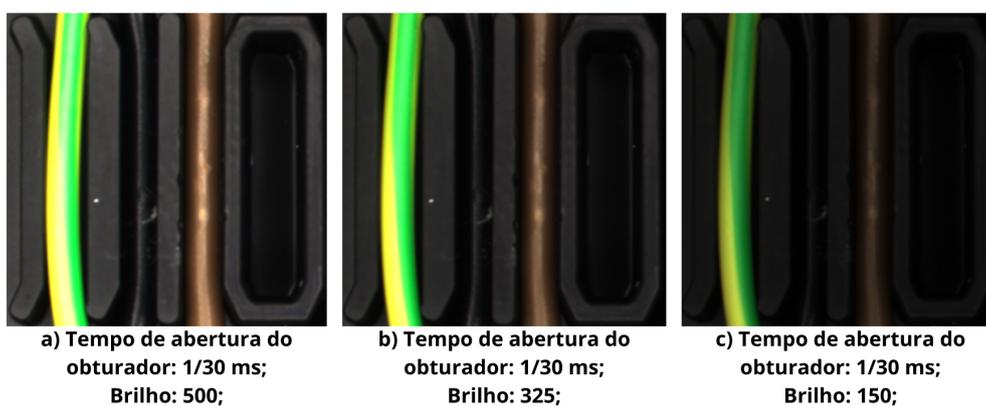
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9: *Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/60 ms (0,0166667 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10: *Imagens resultantes para as configurações de tempo de abertura do obturador em 1/120 ms (0,0083333 ms) e diferentes níveis de brilho, sendo a) 500 , b) 325, c) 150.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 IDENTIFICAÇÃO DAS CORES DAS IMAGENS MONOCROMÁTICAS

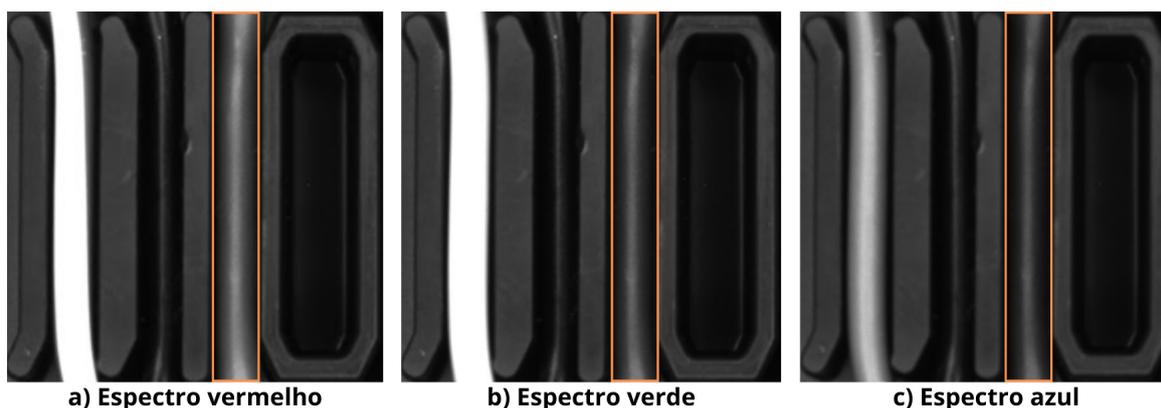
O sistema utilizado apresenta configurações de iluminação com parâmetros pré-definidos e que não podem ser alterados para 8 espectros de cores distintos. O uso da iluminação cromática resulta na captura de uma imagem monocromática para cada iluminação utilizada (espectros vermelho, verde e azul), cuja intensidade irá variar entre os valores de 0 (preto) e 255 (branco) para cada *pixel*. A definição de uma região de interesse (ROI) fixa facilita o processamento das informações. No presente trabalho, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros na identificação do cabo de cor marrom.

A intensidade dos *pixels* do cabo pode ser variável devido à superfície reflexiva do material do próprio cabo. Tendo isso em mente, foi feita a média da intensidade de todos os *pixels* da área pré-determinada, inclusive os que apresentam interferência causada pelo reflexo de luz, com o objetivo de analisar os resultados aproximados ao funcionamento do sistema no mundo real, onde na maior parte das vezes irá existir reflexo no cabeamento, devido ao material do mesmo.

A Figura 11 apresenta um exemplo dos diferentes resultados obtidos para a média da intensidade de *pixels* nas capturas monocromáticas realizadas nos três espectros de cores propostos, onde a região de interesse da inspeção é delimitada pelos retângulos laranja.

A análise contempla somente a cor marrom. No entanto, o cabo de coloração amarelo e verde apresentou forte reflexo nas cores verde e vermelho utilizando configurações em que a cor marrom não se destacava de maneira adequada. Isso indica que os parâmetros utilizados talvez não sejam adequados para esse cabos de coloração diferente.

Figura 11: *Imagens monocromáticas com dos espectros vermelho(a), verde(b) e azul(c), com os parâmetros de configuração da câmera em tempo de abertura do obturador em 0.016667 ms e brilho em 500.*



Fonte: Elaborado pelo autor.

A coleta de dados foi replicada para todas as configurações de iluminação propostas, resultando em 27 valores de intensidade de *pixels* para cada espectro de cor utilizado como iluminação.

4 RESULTADOS

A abordagem experimental adotada consistiu em um projeto fatorial de experimentos no qual dois fatores (tempo de abertura do obturador e intensidade da luz) foram avaliados em três níveis. Os resultados, separados em termos de suas componentes vermelha, verde e azul. A tabela contendo os resultados experimentais é apresentada no apêndice A. Visando avaliar as influências dos parâmetros nos resultados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com auxílio do software *Minitab*. Também se buscou identificar que configuração dos parâmetros tem melhor desempenho quando comparada a uma imagem capturada por um sensor de cores reais. O sistema utilizado forneceu resultados separados por cores em oito canais; no entanto, por questões de praticidade, a análise será conduzida em função do espectro RGB. O eixo vertical dos gráficos que serão apresentados nesta Seção correspondem a média dos valores de intensidade de *pixels* obtidos para cada configuração utilizada.

Alguns resultados observados na Tabela 5, no apêndice A, apresentam grandes variações de resultados obtidos utilizando as mesmas configurações de brilho e tempo de abertura do obturador, porém, com amostras distintas. Essa variação acontece devido a variação de posição do cabeamento marrom na canaleta, visto que o cabo não está totalmente encaixado na canaleta, permanecendo torto com o plano horizontal da imagem, o que tem como resultado uma menor área de reflexo na amostra 1.

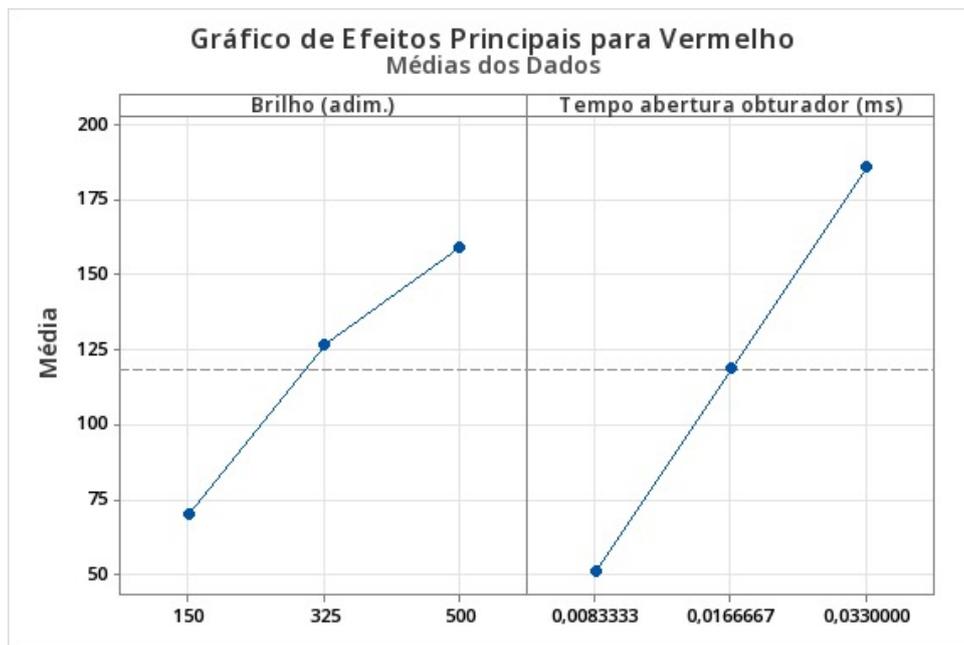
4.1 ESPECTRO VERMELHO

A análise foi feita com o objetivo de demonstrar a média dos resultados a partir dos efeitos separados de cada parâmetro alterável, brilho e tempo de abertura do obturador, e também os resultados obtidos através da interação entre essas configurações.

Na Figura 12, os valores médios de intensidade de *pixel* para os valores principais do parâmetro tempo de abertura do obturador tem um comportamento semelhante a uma reta, enquanto o comportamento da intensidade de *pixel* em função do brilho não indica relação linear, com menor crescimento para o brilho entre 325 e 500. Esse comportamento, somado à maior variação da intensidade de *pixel* em função do tempo de abertura do obturador, indica que essa variável possui maior influência nos resultados finais do que o brilho no espectro vermelho.

Apresentado na Figura 13, o gráfico de interações para o espectro vermelho apresenta a interação entre os parâmetros de brilho e tempo de abertura do obturador em função dos resultados obtidos de intensidade de *pixels*. Os pontos que apresentam menor brilho (150) e maior tempo (1/30 ms) apresentam a média de intensidade de *pixels* em torno de 125, valor semelhante ao utilizar o brilho em 325 e tempo de abertura do obturador em 1/60 ms. Esses valores são superiores ao valor de intensidade obtido quando é utilizada a

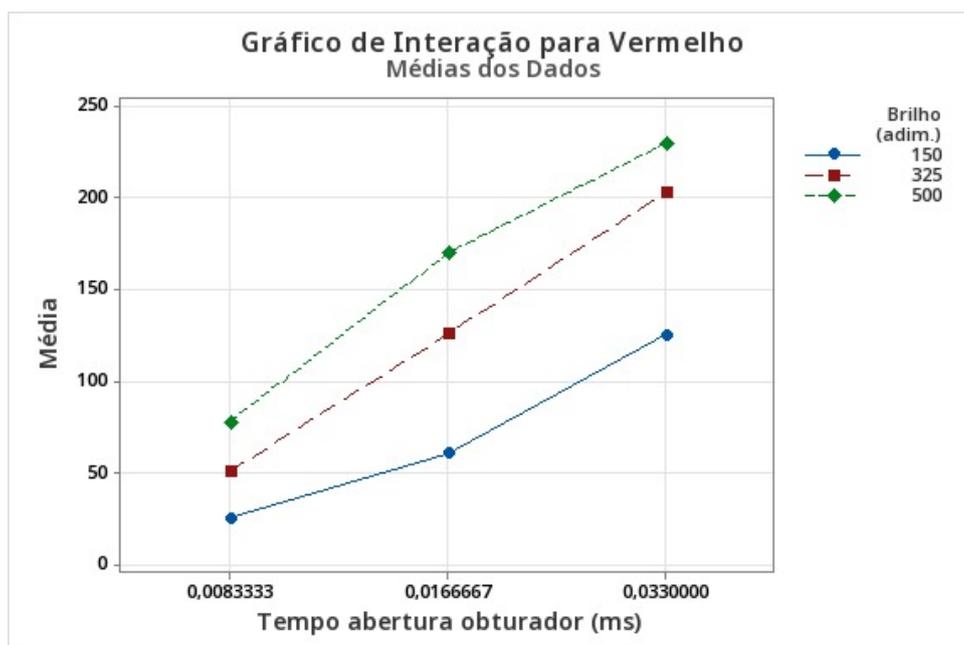
Figura 12: Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

configuração de maior brilho (500) e menor tempo (1/120 ms), indicando também que o parâmetro de tempo de abertura do obturador tem maior influência no resultado que o brilho.

Figura 13: Gráfico de interações do espectro vermelho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da utilização da ferramenta *Minitab*, os resultados obtidos para os cálculos realizados para a análise de variância do experimento são apresentados na Tabela 2.

Levando em conta que o nível de significância (α) do experimento foi fixado em 0,05, um parâmetro apresentará influência significativa quando o resultado do teste p (p -value) for menor que 0,05. Se o valor de p for menor ou igual a 0,05, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, os valores do resultado de intensidade dos *pixels* são influenciados de forma estatisticamente significativa pela variável. Para o parâmetro de interação tempo*brilho, o valor de p é 0,238, afirmando que a hipótese nula pode ser assumida para essa interação entre brilho e tempo de abertura do obturador. Uma indicação dessa baixa influência da interação entre os diferentes parâmetros é que as curvas da Figura 13 apresentam comportamento semelhante.

Tabela 2: Análise de variância para o espectro vermelho.

Fonte	GL	Seq. SS	Contribuição	Adj. SS	Adj MS	F	p
Tempo (ms)	2	81495	61,60%	81495	40747,3	67,56	0
Brilho (adim.)	2	36277	27,42%	36277	19138,6	30,07	0
Tempo*brilho	4	3670	2,77%	3670	917,4	1,52	0,238
Erro	18	10857	8,21%	10857	603,2		
Total	26	132298	100%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

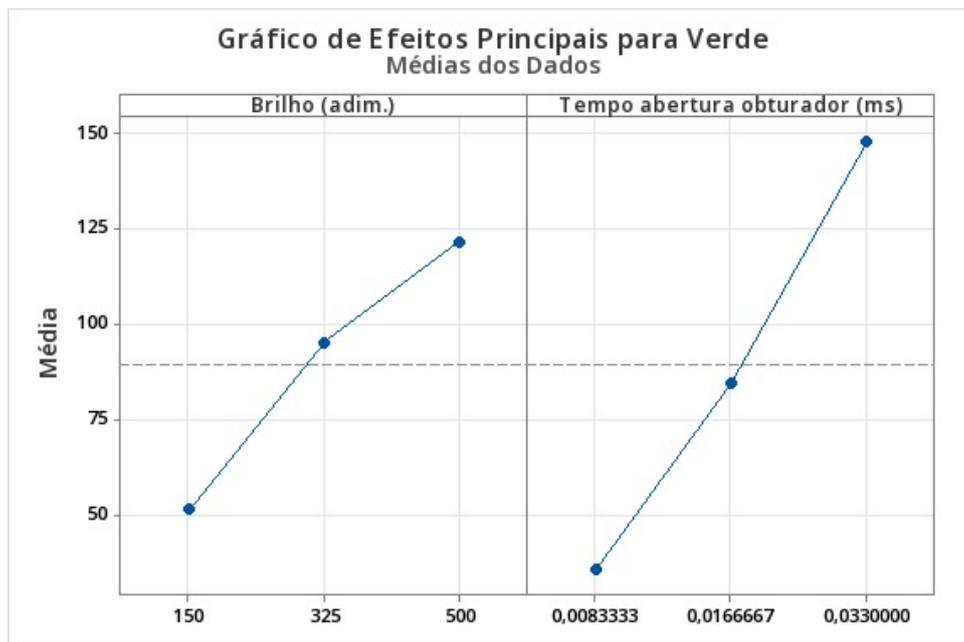
O resultado da análise de variâncias feito pela ferramenta *Minitab* apresenta em porcentagens e valores de contribuição para cada configuração estipulada. Com as resultantes de contribuição, apresentadas na Tabela 2, a contribuição do parâmetro de tempo de abertura do obturador é de 61,60% e a do brilho de 27,42%. Esses valores confirmam a representação do gráfico apresentado na Figura 12, que mostra que a alteração das configurações de tempo de abertura do obturador tem maior impacto que as alterações nos valores de intensidade do brilho. Segundo a ANOVA, a interação entre tempo*brilho contribui com o resultado em 2,77%. O erro de 8,21% apresentado na Tabela 2 corresponde a contribuições que os cálculos da análise de variâncias não identificaram a partir dos dados inspecionados.

4.2 ESPECTRO VERDE

Na análise do espectro verde, o formato do gráfico dos efeitos principais do parâmetro de brilho, ilustrado na Figura 14, assemelha-se ao gráfico do espectro vermelho. Entre as configurações de 325 e 500, observa-se uma diminuição na taxa de crescimento dos valores de intensidade de *pixel*. No entanto, para o tempo de abertura do obturador, houve um aumento na taxa de crescimento, indicando uma influência mais significativa nos resultados finais em comparação ao espectro vermelho.

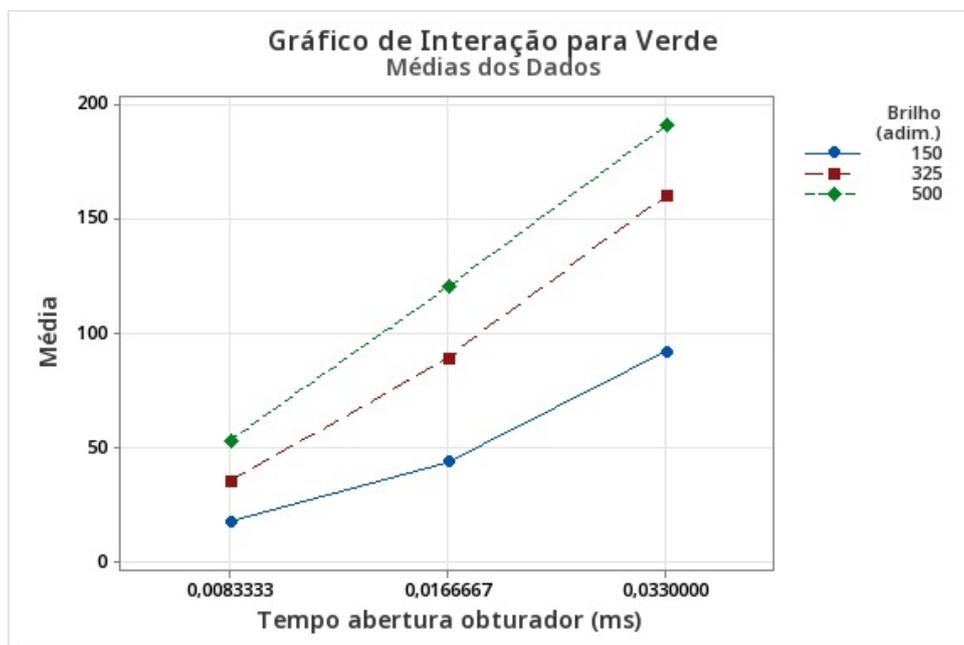
O gráfico de interações apresentado na Figura 15 apresenta a média de intensidade em torno de 90, para as configurações de menor brilho e tempo de abertura do obturador, sendo esse valor de média semelhante ao resultado obtido utilizando o brilho em 325 e tempo de abertura do obturador em 1/60 ms. De forma semelhante ao espectro vermelho, essas configurações apresentam médias superiores ao valor de intensidade obtido ao utilizar maior brilho (500) e menor tempo de abertura do obturador, em torno de 55. De forma similar, para o espectro verde, o tempo de abertura do obturador tem maior influência na média de intensidade de *pixels* que o brilho.

Figura 14: Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro verde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15: Gráfico de interações do espectro verde.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da análise de variância do experimento, destacados na Tabela 3, são semelhantes aos observados no espectro vermelho. O valor p para o parâmetro de tempo de abertura do obturador é inferior a 0,05, levando à rejeição da hipótese nula. Entretanto, para o parâmetro de tempo*brilho, o valor de p é de 0,212, indicando que a hipótese nula pode ser mantida para a interação entre os dois fatores.

Tabela 3: Análise de variância para o espectro verde.

Fonte	GL	Seq. SS	Contribuição	Adj. SS	Adj MS	F	p
Tempo (ms)	2	56647	61,38%	56647	28323,3	52,91	0
Brilho (adim.)	2	22527	24,41%	22527	11263,7	21,04	0
Tempo*brilho	4	3472	3,76%	3472	868,1	1,62	0,212
Erro	18	9635	10,44%	9635	535,3		
Total	26	92281	100%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados referentes às porcentagens e valores de contribuição para cada configuração estipulada são apresentados na Tabela 3. A contribuição do parâmetro de brilho é de 24,41%, enquanto a do tempo de abertura do obturador é de 61,38%. Ao observar a taxa de variância associada ao brilho, percebe-se que as alterações nos parâmetros de brilho no espectro verde têm uma contribuição menor para o experimento em comparação às modificações nos valores de tempo de abertura do obturador. Esses resultados comprovam as observações feitas na análise do gráfico de efeitos principais, conforme ilustrado na Figura 14. O erro de 10,44% apresentado na Tabela 3 corresponde a contribuições que os cálculos da análise de variâncias não identificam a partir dos dados inspecionados.

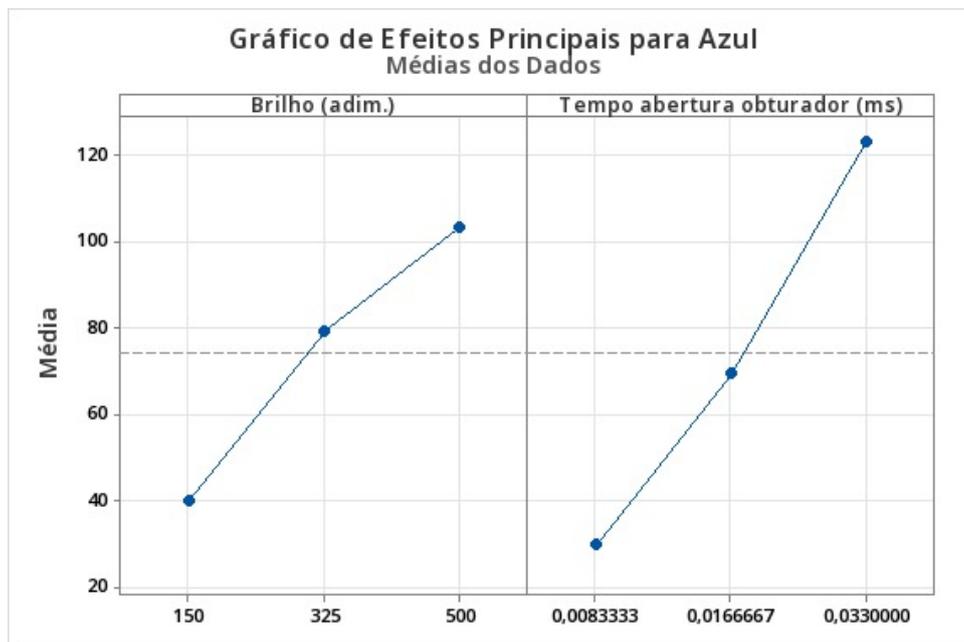
4.3 ESPECTRO AZUL

Ao analisar o espectro azul, conforme evidenciado na Figura 16, é possível notar uma semelhança no formato da taxa de variação dos efeitos principais ao alterar o brilho, convergindo aos gráficos de efeitos principais nos espectros vermelho e verde. Além disso, o gráfico do tempo de abertura do obturador apresenta uma taxa de variação semelhante ao gráfico de efeitos principais para o tempo de abertura do obturador no espectro verde, caracterizado por um aumento na taxa de variação da média de intensidade dos *pixels* entre os tempos de obturador de 1/60 ms e 1/30 ms. Esse resultado sugere uma contribuição mais significativa do tempo de abertura do obturador para o experimento, conseqüentemente indicando uma menor influência da intensidade do brilho.

O gráfico de interações apresentado na Figura 17 demonstra o valor em torno de 68 para o valor do brilho configurado em 150, sendo o menor valor de brilho do experimento, e tempo de abertura do obturador parametrizado em 1/30 ms, sendo o maior tempo de abertura do obturador. Ao analisar o valor médio, onde o tempo de abertura do obturador foi configurado em 1/60 ms e o brilho em 325, percebe-se que o valor da média de intensidade de *pixels* se localiza em torno de 72, um aumento não muito significativo a fins de resultados de contribuição maior. Ao analisar a média de utilizando as configurações de menor tempo de abertura do obturador (1/120 ms) com a utilização do maior brilho definido, o valor obtido aparece em torno de 45, sendo também, inferior as configurações analisadas anteriormente. Isso conclui que a alteração nas configurações de tempo de abertura do obturador tem maior contribuição nos resultados finais, quando comparada a alteração dos parâmetros de brilho.

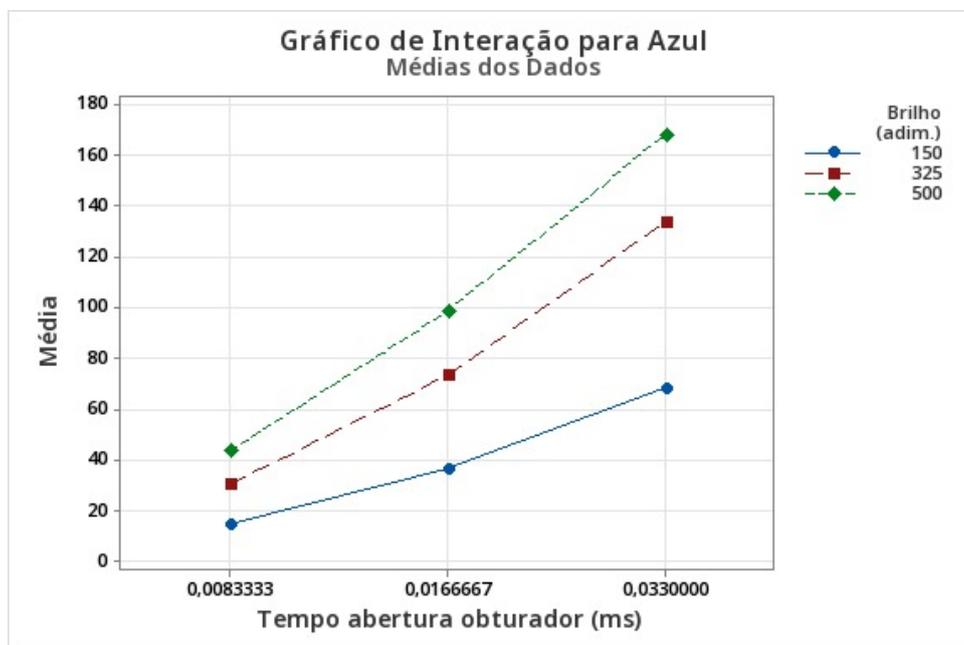
A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a análise de variância do experimento, apresentando resultados semelhantes aos espectros vermelho e verde, onde valor p do parâmetro de tempo de abertura do obturador é menor que 0,05, rejeitando a hipótese

Figura 16: Gráfico Efeitos principais gerados pelo espectro azul.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17: Gráfico de interações do espectro azul.



Fonte: Elaborado pelo autor.

nula. Para o parâmetro de interação entre tempo*brilho, o valor de p é 0,077, sendo um resultado próximo do que seria considerado estatisticamente significativo. Apesar de não poder ser considerada significativa nas condições adotadas (nível de significância de 0,05), essa interação teria influência significativa caso fosse utilizado um $\alpha = 0,1$.

Os resultados apresentados de porcentagens e valores de contribuição para cada

Tabela 4: Análise de variância para o espectro azul.

Fonte	GL	Seq. SS	Contribuição	Adj. SS	Adj MS	F	p
Tempo (ms)	2	39793	57,37%	39793	19896,6	50,08	0
Brilho (adim.)	2	18416	26,55%	18416	9207,9	23,18	0
Tempo*brilho	4	4003	5,77%	4003	1000,8	2,52	0,077
Erro	18	7152	10,31%	7152	397,3		
Total	26	69364	100%				

Fonte: Elaborado pelo autor.

configuração estipulada são apresentados na Tabela 4, onde a contribuição do parâmetro do brilho é de 26,55% e a do tempo de abertura do obturador de 57,37%. Também, com o resultado obtido para taxa de variância do brilho, é possível notar que a interação entre os parâmetros do tempo*brilho no espectro azul tem menor contribuição para o experimento quando comparadas as contribuições individuais dos fatores utilizados, tempo de abertura do obturador e brilho, afirmando o que foi apresentado na análise do gráfico de efeitos principais na Figura 16.

O erro de 10,31% apresentado na Tabela 4 corresponde a contribuições que os cálculos da análise de variâncias não identificaram a partir dos dados inspecionados.

4.4 COMPARAÇÃO COM SENSOR DE CORES REAIS

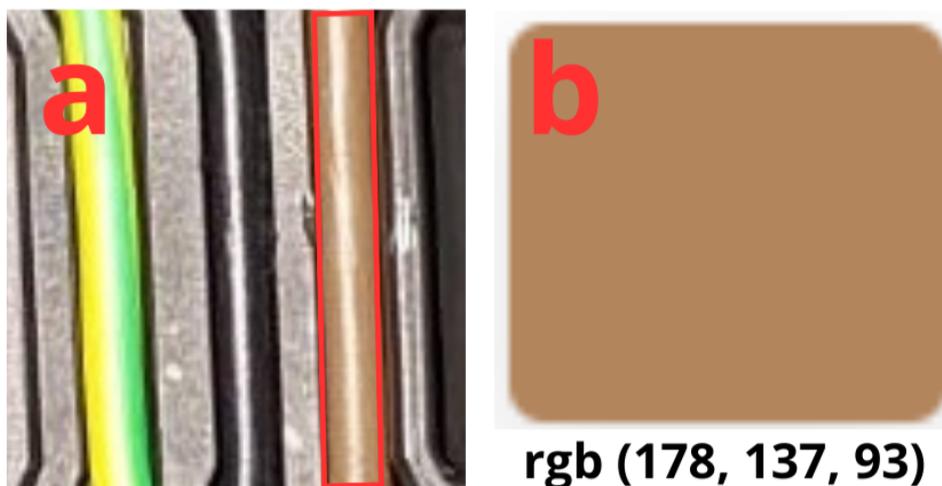
Com o intuito de encontrar a melhor configuração para o sistema, foram capturadas duas imagens com a utilização de um sensor de cores reais, sendo que uma imagem foi fotografada com utilização de flash, e a outra apenas com a iluminação ambiente. A partir das fotografias obtidas, com o auxílio de uma calculadora RGB, é possível identificar a uma média de intensidade de *pixels* para os 3 canais (RGB), para a área pré-definida para realização do experimento.

Para analisar a imagem de captura utilizada com *flash*, o sensor de cores reais foi fixado de modo que a distância entre as amostras não fosse tão distinta quando comparado ao posicionamento da câmera monocromática utilizada para o experimento. Na Figura 18 é apresentado a imagem obtida, bem como uma análise da intensidade de *pixels* que compõe a região de interesse proposta no retângulo vermelho. A região de interesse teve posicionamento similar à área de interesse que foi proposta com a utilização da câmera monocromática. Os resultados de intensidade de *pixels* foram de 178 para o canal vermelho, 137 para o canal verde e 93 para o azul.

Foi realizada uma análise de uma captura realizada sem a utilização do *flash* do sensor de cores reais, apresentada na Figura 19. Os valores de intensidade de *pixels* foram de 137 para o canal vermelho, 108 para o canal verde e 93 para o azul.

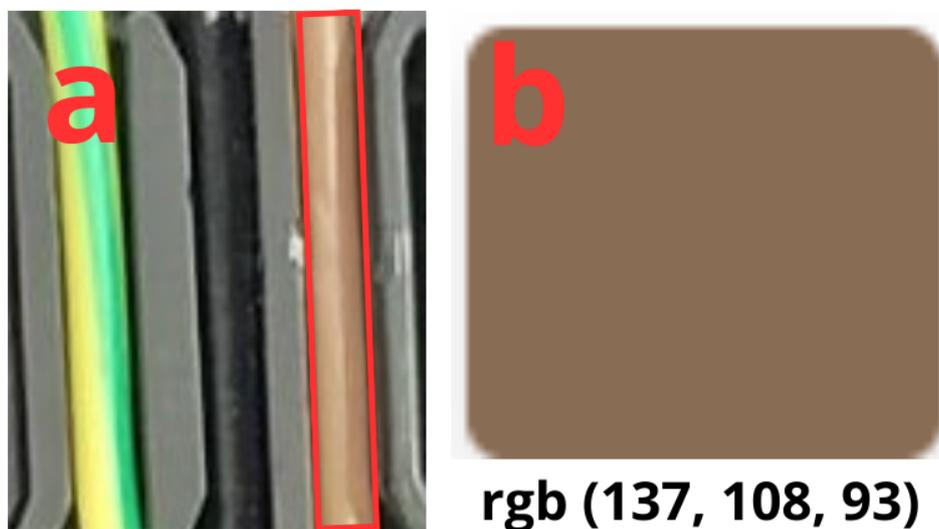
Comparado as duas imagens, bem como o resultado apresentado em função dos 3 canais (RGB), é possível observar que a intensidade de *pixels* no canal azul é semelhante entre as duas imagens. Além disso, para o canal vermelho, os valores de intensidade apresentaram aumento de cerca de 40, e para o canal verde, de cerca de 30. Esse resultado indica que, para o espectro azul, a alteração do brilho causado pela iluminação do sensor de cores não tem efeito significativo no resultado final da composição da cor. Além disso, o aumento dos valores nos canais vermelho e verde, são referentes ao ruído causado pelo reflexo da iluminação na parte central do cabeamento.

Figura 18: A imagem contém a captura realizada por sensor de cores reais utilizando *flash* (a), bem como a coloração em escala dos 3 canais (RGB), apresentada em (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19: A imagem contém a captura realizada por sensor de cores reais sem a utilização de *flash* (a), bem como a coloração em escala dos 3 canais (RGB) apresentada em (b).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar os valores de intensidade média de *pixels* apresentados na Figura 18, e comparando com todos os valores apresentados nos gráficos de interação realizados em todos os espectros vermelho, verde e azul, respectivamente, nas Figuras 13, 15 e 17, a melhor configuração para obtenção de resultados similares aos realizados pela captura feita por um sensor real, foi a configuração utilizando brilho em 500 e tempo de abertura do obturador em 1/60 ms. No entanto, é importante ressaltar que essa maior similaridade

pode ter maior relação com o reflexo que com a identificação da cor real.

Para a captura realizada sem *flash*, apresentada na Figura 19, o processo de comparação para os valores de intensidade média de *pixels* foi feito com a intenção de obter a melhor configuração da câmera monocromática. Entre as configurações avaliadas, a melhor representação seria obtida com brilho em 325 e tempo de abertura do obturador em 1/60 ms. No entanto, mesmo essa configuração apresentaria valores relativamente distantes nos espectros verde e azul.

É importante salientar a utilização do *flash* na captura do sensor de cores reais, pois o mesmo consegue, apesar de causar ruído reflexivo na parte central do cabo, reduzir ruídos causados por iluminações externas, que podem ocorrer com frequência dependendo do ambiente onde as imagens são capturadas. Para escolha final, é crucial a realização de uma análise para verificar as iluminações externas que podem causar resultados indesejados na inspeção da coloração do cabeamento.

A configuração utilizada não se limita aos parâmetros testados. É possível gerar uma função para obter os parâmetros que permitiriam a identificação das cores em cada espectro. O problema é que os parâmetros ideais muito provavelmente seriam diferentes para cada espectro. Neste caso, a definição dos parâmetros ótimos poderia se beneficiar do uso de métodos de *machine learning* para que a configuração da câmera se torne adequada.

5 CONCLUSÃO

Com a utilização de um sistema de visão robusto e eficiente para trabalhos contínuos no meio industrial, o trabalho proposto cumpriu as metas desejadas. A configuração dos parâmetros de brilho e tempo de abertura do obturador devem ser escolhidas adequadamente de acordo com a coloração que se deseja realizar a inspeção. Para uma análise da cor marrom, o experimento demonstrou resultados adequados em configurações medianas, ou seja, que a tempo de abertura do obturador fosse parametrizada em 1/60 ms e o brilho em 325 (unidade adimensional). Porém, ao analisar o cabo verde e amarelo apresentado na imagem resultante, observou-se que a cor amarela estava atingindo alta intensidade de *pixels* nas imagens resultantes, causando ruído. Isso indica que a detecção de elementos de diferentes cores e texturas pode necessitar de configurações diferentes.

A estabilidade da coloração do cabeamento requer um ambiente de iluminação controlado, onde o ruído causado pelo reflexo do cabo, pode ser reduzido com a diminuição da intensidade da iluminação e também o tempo de abertura do obturador. O ideal para uma inspeção estável seria a criação de um filtro para ruídos externos indesejados, como luzes de janelas abertas, ou até mesmo implementação de algoritmos de *machine learning* para realizar atenuação quando necessário.

A análise de variância dos 3 espectros identificou maior influência da variação do tempo de abertura do obturador sobre o resultado final para os três espectros analisados, indicando, como no caso do espectro verde, que o brilho tem menor influência nos resultados do experimento proposto, ainda que estatisticamente significativa.

Embora o assunto do trabalho seja referente a análise apenas da coloração do cabeamento a partir do uso de pseudo-cores, a pesquisa teórica realizada mostrou amplo crescimento do assunto, onde a utilização de pseudo-cores e até mesmo fusão de capturas está em crescimento em diferentes campos de trabalho, por exemplo, no ramo de segurança, segundo (XUE; BLUM, 2003) e também no ramo da saúde, segundo (HE et al., 2010).

Como trabalhos futuro pretende-se realizar testes de validação para outras colorações, e também a implementação em *software* aberto para a inspeção desejada, com o objetivo de criar filtros e adequações utilizando conceitos de *machine learning* para estabilidade e redução de ruído na captura das imagens em cada espectro utilizado.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, F. R. R. *Infravermelho próximo como ferramenta auxiliar na identificação de madeiras na arte sacra*. Curitiba, 2013. P. 43.
- BREZOLIN, E. D. *Identificação de características dimensionais em peças planas através da visão computacional*. Porto Alegre, 2022. P. 38.
- GONZALEZ, R. E. A. *Digital Image Processing*. São Paulo: Pearson Education International, 2009. P. 644. ISBN 978-85-8143-586-2.
- GROOVER, M. P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. Estados Unidos: John Wiley Sons, Inc, 2010. P. 1024. ISBN 978-0470467008.
- HALLIDAY, D. E. A. *Fundamentos de Física - Óptica e Física Moderna - Volume 4*. Rio de Janeiro: LTC, 2016. P. 448. ISBN 9788521630388.
- HE, C. et al. Multimodal medical image fusion based on IHS and PCA. *Procedia Engineering*, v. 7, p. 280–285, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705810010398>>.
- INOCÊNCIO, M. V. E. A. Equalização e segmentação de imagens usando informações de cores. *Colloquium Exactarum*. ISSN: 2178-8332, v. 49, n. 1, p. 20–38, 2020. Disponível em: <<https://revistas.unoeste.br/index.php/ce/article/view/3501>>.
- IRGANG, A. L. *Projeto de uma plataforma educacional de mira assistida baseada em visão computacional*. Porto Alegre, 2023. P. 46.
- LANIR, J. E. A. Comparing Multispectral Image Fusion Methods for a Target Detection Task. In: 2006 9th International Conference on Information Fusion. [S.l.: s.n.], 2006. P. 1–5.
- MARQUES FILHO, O. E. A. *Processamento digital de imagens*. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. P. 331. ISBN 8574520098.
- MARQUES, ET AL. *Um sistema de calibração de câmera*. 2007. F. 75. Tese (Mestrado em Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Matemática, Universidade Federal do Alagoas, Maceió.
- MILESKI, Y. R. *Aplicação de sistemas de visão no referenciamento de peças em centros de usinagem CNC*. Porto Alegre, 2017. P. 48.
- POYNTON, C. A. *A Technical Introduction to Digital Video*. [S.l.]: John Wiley Sons, 1996. P. 301. ISBN 0-471-12253-X.
- REINHARD, E. E. A. *High Dynamic Range Imaging*. Massachussets: Elsevier, 2010. P. 641. ISBN 978-0-12-374914-7.

- SIOMA, A. Vision System in Product Quality Control Systems. *Applied Sciences*, v. 13, n. 2, 2023. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/751>>.
- TOET, A.; WALRAVEN, J. New false color mapping for image fusion. *Optical Engineering*, v. 35, n. 3, p. 650–658, 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/1.600657>>.
- XUE, Z.; BLUM, R. Concealed weapon detection using color image fusion. In: SIXTH International Conference of Information Fusion, 2003. Proceedings of the. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 622–627.
- ZHAOYI LI, P. et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality. *AAAS Science Advances*, Piscataway, NJ, v. 7, n. 5, 2021. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/sciadv.abe4458>>.

Apêndices

Apêndice A - RESULTADOS OBTIDOS

Tabela 5: *Resultados obtidos.*

Amostra	Tempo de abertura obturador (ms)	Brilho	Vermelho	Verde	Azul
1	1/30	500	217,37	169,09	144,07
1	1/30	325	170,45	119,07	97,26
1	1/30	150	80,41	56,74	46,89
2	1/30	500	248,08	221,27	200,02
2	1/30	325	230,21	195,33	165,53
2	1/30	150	147,42	107,09	88,74
3	1/30	500	223,57	181,76	160,47
3	1/30	325	207,69	166,26	138,25
3	1/30	150	147,30	112,03	69,84
1	1/60	500	206,34	149,99	123,12
1	1/60	325	155,74	111,32	91,82
1	1/60	150	72,76	53,03	43,94
2	1/60	500	136,04	92,21	75,59
2	1/60	325	97,52	67,85	55,81
2	1/60	150	47,98	34,37	28,62
3	1/60	500	167,10	118,70	96,91
3	1/60	325	123,86	88,61	72,55
3	1/60	150	61,13	45,09	37,37
1	1/120	500	96,72	66,99	54,80
1	1/120	325	63,53	44,70	36,42
1	1/120	150	31,35	21,79	18,04
2	1/120	500	60,28	40,69	33,31
2	1/120	325	39,38	27,39	22,53
2	1/120	150	19,82	14,40	12,03
3	1/120	500	76,15	52,43	42,62
3	1/120	325	49,46	35,05	33,19
3	1/120	150	24,64	18,14	15,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Notas: (1) Os valores apresentados nas colunas Vermelho, Verde e Azul correspondem às médias do valor de intensidade de *pixels* de 3 imagens capturadas com as mesmas configurações.