



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

Daíres Macedo Félix de Menezes

**Análise de sistemas de visão computacional para inspeção automática de linhas de
produção**

Cabo de Santo Agostinho- PE

2025

Daíres Macedo Félix de Menezes

Análise de sistemas de visão computacional para inspeção automática de linhas de produção

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Rural de Pernambuco, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Alberto Barbosa Simão Ferreira.

Cabo de Santo Agostinho- PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação Sistema
Integrado de Bibliotecas da UFRPE Bibliotecário(a): Ana
Catarina Macêdo – CRB-4 1781

M541a Menezes, Daíres Macedo Félix de.

Análise de sistemas de visão computacional para inspeção automática de linhas de produção / Daíres Macedo Félix de Menezes. – Cabo de Santo Agostinho, 2024.

71 f.

Orientador(a): Felipe Alberto Barbosa Simão Ferreira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Visão por computador. 2. Processamento de imagens. 3. Métodos de linha de montagem . 4. Controle de qualidade - Métodos óticos 5. Automação industrial. I. Ferreira, Felipe Alberto Barbosa Simão, orient. II. Título

CDD 621.3

DAÍRES MACEDO FÉLIX DE MENEZES

Análise de sistemas de visão computacional para inspeção automática de linhas de produção

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovada em: 02/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

Felipe Alberto Barbosa Simão Ferreira - Doutor
UFRPE-UACSA

Ania Lussón Cervantes - Doutora
UFRPE-UACSA

Fernando Gonçalves de Almeida Neto - Doutor
UFRPE-UACSA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me deram todo o suporte necessário para que eu chegasse até aqui. Foram eles que acompanharam minha dedicação aos estudos, desde o momento em que decidi ingressar na universidade até a realização do sonho de me formar. Juntos, vivemos as emoções dessa caminhada, e sei que suas lágrimas de alegria ao me ver conquistar mais uma vitória representam todo o amor e o apoio que sempre me ofereceram. A jornada foi desafiadora, especialmente por ter sido marcada por duas fases de problemas de saúde, mas com o apoio e o amor incondicional deles, fui capaz de superar todos os obstáculos. Dedico este trabalho a eles como uma forma de retribuição, para orgulhá-los de quem me tornei, e tenho a certeza de que usarei a formação que conquistei para garantir, sempre que necessário, a qualidade de vida que eles tanto merecem.

RESUMO

O uso de sensores inteligentes se aplica em diversas áreas, como o controle de nível, para evitar transbordamentos de líquidos, e no monitoramento de vibrações, para indicar quando máquinas precisam de manutenção. Na visão computacional, os problemas da indústria que são solucionados giram em torno da inspeção de qualidade e classificação. Por exemplo, a indústria de embalagens precisa garantir uniformidade de tamanhos e formatos, a indústria automotiva busca garantir a uniformidade de pneus, enquanto a eletrônica enfrenta desafios com soldas, que podem ser inspecionadas com sistemas de visão. No setor logístico, a leitura de códigos de barras permite uma separação de itens mais rápida e automática. Este trabalho aborda o uso de sistemas de visão computacional para a inspeção automática de linhas de produção, com foco na aplicação no ramo alimentício. Foi explorado um vasto material bibliográfico sobre os conceitos fundamentais de processamento de imagem, destacando as diferenças entre análise de imagem e visão computacional. Elementos como cores, texturas, iluminação, contraste e brilho foram analisados por sua importância na qualidade das imagens digitais. Foram discutidas também as principais técnicas de análise de imagem, operações lógicas e aritméticas, além da presença de ruídos e métodos eficazes para sua remoção ou redução por meio de filtros. O estudo comparou as tecnologias 2D e 3D existentes, explicando seus princípios ópticos e funcionais. Além disso, foi apresentado o software da SICK *Sensor Intelligence*, utilizado no estudo de caso de inspeção 3D de caixas empacotadoras de 50 pacotes do produto lámen. O sistema foi aplicado para garantir a conformidade na quantidade e organização dos pacotes na linha de produção, com o objetivo de automatizar o processo e reduzir as reclamações dos clientes, que impactavam negativamente tanto a credibilidade da empresa quanto suas métricas de satisfação. Nesse estudo, o uso da triangulação a laser foi aplicado, devido à sua baixa interferência causada por diferentes cores (refletividade) do material inspecionado e pela necessidade de analisar as discrepâncias em três dimensões, já que as ocorrências de erro no empacotamento exigiam uma análise precisa. O estudo demonstrou que o uso da tecnologia 3D para inspeção foi extremamente eficaz, atingindo uma eficiência superior a 95%, mostrando-se uma solução bem-sucedida para o controle de qualidade e automação industrial.

Palavras-chave: visão computacional; processamento de imagem; linhas de produção; tecnologia 2d; tecnologia 3d.

ABSTRACT

The use of smart sensors applies to various fields, such as level control to prevent liquid overflow and vibration monitoring to indicate when machines require maintenance. In computer vision, industrial problems addressed revolve around quality inspection and classification. For example, the packaging industry needs to ensure uniformity in sizes and shapes, the automotive industry strives to guarantee tire consistency, while the electronics industry faces challenges with solder joints, which can be inspected using vision systems. In the logistics sector, barcode scanning allows for faster and more automated item separation. This paper discusses the use of computer vision systems for automatic inspection of production lines, focusing on applications in the food industry. A comprehensive bibliographic review was conducted on the fundamental concepts of image processing, highlighting the differences between image analysis and computer vision. Elements such as colors, textures, lighting, contrast, and brightness were analyzed for their importance in the quality of digital images. The main image analysis techniques, logical and arithmetic operations, as well as the presence of noise and effective methods for its removal or reduction using filters, were also discussed. The study compared existing 2D and 3D technologies, explaining their optical and functional principles. Additionally, the software from SICK Sensor Intelligence was presented, which was used in the case study for 3D inspection of 50-package packing boxes of ramen product. The system was applied to ensure compliance with the quantity and organization of packages on the production line, aiming to automate the process and reduce customer complaints, which negatively impacted both the company's credibility and its satisfaction metrics. In this study, laser triangulation was applied due to its low interference caused by different colors (reflectivity) of the inspected material and the need to analyze discrepancies in three dimensions, as packaging errors required precise analysis. The study demonstrated that the use of 3D inspection technology was highly effective, achieving an efficiency rate of over 95%, proving to be a successful solution for quality control and industrial automation.

Keywords: computer vision; image processing; production lines; 2d technology; 3d technology.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
A/D	<i>Analog to Digital</i> (Analogico para Digital)
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (Dispositivo de Carga Acoplada)
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> (Semicondutor de Óxido de Metal Complementar)
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
DOF	<i>Depth of Field</i> (Profundidade de Campo)
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
HSI	<i>Hue, Saturation, Intensity</i> (Tonalidade, Saturação e Intensidade)
IA	Inteligência Artificial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
OCR	<i>Optical Character Recognition</i> (Reconhecimento Óptico de Caracteres)
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> (vermelho, verde e azul)
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i> (Identificação da Rádio Frequência)
ToF	<i>Time of Flight</i> (Tempo de vôo)
WD	<i>Working Distance</i> (Distância de Trabalho)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO GERAL.....	9
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	10
2.1 O QUE É PROCESSAMENTO DE IMAGEM	10
2.2 DIFERENÇAS ENTRE ANÁLISE DE IMAGEM E VISÃO COMPUTACIONAL	11
2.3 CONCEITOS DE CORES E TEXTURA NA IMAGEM DIGITAL.....	13
2.4 ILUMINAÇÃO, CONTRASTE E BRILHO.....	16
2.5 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM	20
2.5.1 Operações Lógicas e Aritméticas	21
2.5.2 Ruídos e Filtros	26
3 SENSORES ÓPTICOS	28
3.1 TECNOLOGIAS 2D	29
3.1.1 Componentes e Funcionamento	30
3.1.2 Otimização de Imagem.....	33
3.2 TECNOLOGIAS 3D	38
3.3 SOFTWARE DOS SENSORES ÓPTICOS SICK.....	44
4 ESTUDO DE CASO: INSPEÇÃO 3D DE CAIXA COMPLETA	52
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E OBJETIVO.....	52
4.2 METODOLOGIA.....	55
4.2.1 Lógica de Teste de Laboratório.....	56
4.2.2 Resultado do Teste em Laboratório.....	63
4.3 TESTE EM LINHA DE PRODUÇÃO	63
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
5 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIA.....	70

1 INTRODUÇÃO

A Hannover Messe, sediada na Alemanha, é a maior feira internacional de tecnologia industrial. Desde 1947, expõe novas tendências e inovações para o ambiente industrial, visando superar desafios globais (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI), 2023). O termo Indústria 4.0 foi dito pela primeira vez na edição da feira realizada em 2011, quando foi anunciado um estudo em conjunto de vários especialistas, nomeado como “*Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0*”. O estudo teve sua versão final apresentada na mesma feira em 2013 (Recommendations [...], 2013).

Nos últimos 20 anos, a indústria passou por uma transformação significativa com a integração de tecnologias digitais e automação avançada. O início dos anos 2000 viu o surgimento da Internet das Coisas (IoT) e da digitalização de processos industriais, marcando uma transição para fábricas mais inteligentes e conectadas. A partir de 2010, a combinação de inteligência artificial, análise de dados e robótica avançada começou a remodelar as operações fabris, levando ao conceito da Indústria 4.0. Esta nova era é caracterizada pela interconexão de máquinas, sistemas ciberfísicos e automação inteligente, permitindo uma produção mais eficiente, flexível e adaptativa, com foco na prevenção de falhas e na tomada de decisões em tempo real.

As fábricas se encontram em uma busca incessante pelo alinhamento entre produção, economia e satisfação do cliente (Oliveira; Rocha, 2006). A indústria automatizada eleva a produção a níveis que seriam impossíveis para seres humanos, mas ainda está sujeita a falhas decorrentes de erros em processos ou ferramentas. Esses erros, analisados a partir do seu impacto, geram grandes projetos de melhoria dentro do ambiente industrial. Novos sistemas automatizados, implementação de sensores, controladores ou outra inovação tecnológica podem garantir a qualidade no processo produtivo, seja gerando dados de inspeção ou exercendo o papel de correção de falhas (Gonzales; Woods, 2010).

As empresas adotam sistemas de verificação e melhoria contínua visando as certificações da Organização Internacional de Normalização - ISO, que não são obrigatórias, mas somam valor na qualidade e cumprimento de padrões internacionais. Além disso, proporcionam uma maior satisfação do cliente, possibilitando a melhoria de produtos e serviços. Hoje, uma das ferramentas fortemente utilizadas no ambiente industrial é a inspeção visual a

partir de sensores que possuem o processamento digital de imagens como princípio de funcionamento. Os sensores são capazes de obter informações visuais superiores à visão humana, visto que diferentemente dos seres humanos cobrem quase todo o espectro eletromagnético (Gonzales; Woods, 2010).

O processamento de imagens na indústria utiliza sensores de visão de Duas Dimensões (2D) e de Três Dimensões (3D), que podem incorporar Inteligência Artificial (IA). Esses sistemas são capazes de inspecionar formas, volumes, medidas de ângulo e distância, além de realizar identificação de códigos Reconhecimento Óptico de Caracteres (OCR), códigos de barras e outros. No ramo automotivo, por exemplo, pode ser aplicado à inspeção e classificação de peças da carroceria ou, na montagem, com um sistema de guiamento de robô por visão, somando precisão de posicionamento ao processo. A verificação do enchimento de caixas com bens de consumo, o dimensionamento de produtos no processamento de produtos alimentícios, medição de volume e espessura, contagem e posicionamento de objetos são outros exemplos de aplicações (Chin; Harlow, 1982).

Neste trabalho, será explorado um estudo de caso que exemplifica a aplicação prática do processamento de imagem nas indústrias. Será relatada a aplicação na indústria de bens de consumo, focada na verificação do enchimento de caixas empacadoras do produto lámen através de sistemas automatizados de inspeção visual. Além desse, outras aplicações no ramo industrial serão abordadas ao longo do desenvolvimento desse trabalho. Esses exemplos não apenas ilustram a variedade de aplicações do processamento de imagem, mas também destaca sua importância na melhoria da eficiência e na garantia da qualidade em diferentes setores industriais.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o processamento de imagem na indústria, especialmente quando aplicado como solução automática nas linhas de produção utilizando sensores de visão.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender os conceitos fundamentais de processamento de imagem.
- Analisar técnicas de análise de imagem.
- Examinar a aplicação de sensores ópticos.

- Avaliar os componentes e funcionamento das tecnologias 2D.
- Explorar a otimização da imagem em sistemas 2D.
- Investigar tecnologias 3D aplicadas na indústria.
- Estudar casos de aplicação de sensores ópticos de visão.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

O processamento de imagem é um campo amplo e multifacetado, fundamental para a extração de informações relevantes a partir de dados visuais. Ele abrange uma série de conceitos e técnicas que transformam imagens digitais em uma forma compreensível e analisável para sistemas computacionais. A interpretação correta de imagens depende de vários fatores, como a diferença entre análise de imagem e visão computacional, bem como a compreensão de elementos como cor, textura, iluminação, contraste e brilho. Esses elementos, quando combinados com técnicas de análise eficazes, permitem que sistemas de visão computacional sejam capazes de reconhecer padrões, identificar objetos e tomar decisões baseadas em informações visuais. Este capítulo aborda esses conceitos essenciais, fornecendo uma visão aprofundada das bases que sustentam o processamento de imagens em diversos contextos industriais e tecnológicos.

2.1 O QUE É PROCESSAMENTO DE IMAGEM

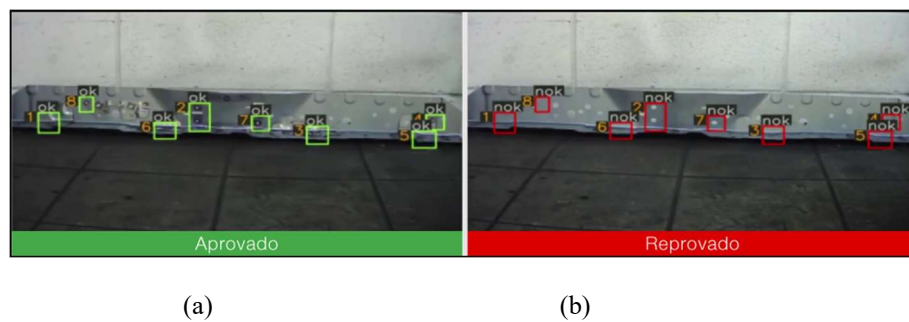
O processamento de imagem é uma área de estudo essencial para o desenvolvimento de novas tecnologias. É importante reconhecer seu amplo leque de aplicações e a capacidade de resolver problemas com diferentes níveis de complexidade. Esse campo de estudo é composto, também, por análise de imagem e visão computacional. Delimitar esses conceitos pode ser desafiador, pois o início e o fim de cada um deles variam conforme a perspectiva dos diferentes autores. A delimitação conceitual adotada neste estudo segue as definições apresentadas por Gonzales e Woods (2010), em *Processamento Digital de Imagens*, por considerar que estas fornecem uma estrutura adequada para a análise do tema.

De acordo com esses autores, o processamento de imagem refere-se ao uso de algoritmos para realizar operações em imagens digitais, como mostrado na Figura 1, com o objetivo de melhorar a qualidade da imagem ou extrair informações significativas. Isso pode incluir operações como filtragem, correção de cores, ajuste de contraste e segmentação, que

preparam as imagens para análise e interpretação. Utiliza-se quando for necessário melhorar a qualidade das imagens ou realçar características específicas para tornar a análise subsequente mais eficaz (Gonzales; Woods, 2010).

No setor industrial, o processamento de imagem é utilizado para inspeção automática de produtos. Um exemplo é a verificação de peças fabricadas, como circuitos eletrônicos, em que algoritmos de processamento de imagem identificam defeitos como soldas defeituosas ou componentes ausentes, garantindo a qualidade do produto final. Na Figura 1, é possível observar que a imagem reprovada destaca áreas da peça onde deveriam haver pontos de solda, mas estão ausentes. Em contrapartida, na imagem aprovada, os pontos de solda estão corretamente posicionados, assegurando a conformidade com os padrões de qualidade.

Figura 1 – Ilustração do Processamento de imagem usado para extrair informações de verificação da aplicação de porcas e pontos de solda, aprovado (a) e reprovado (b).



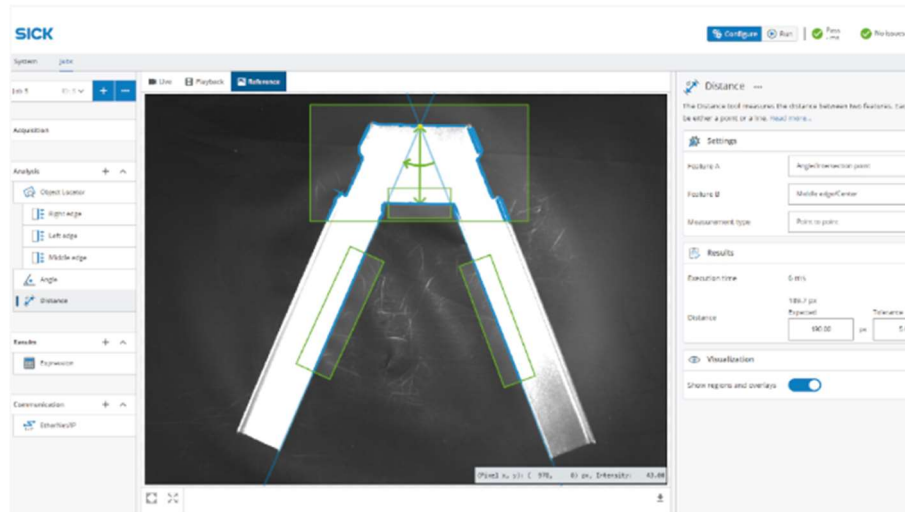
Fonte: WEG (2023)¹.

2.2 DIFERENÇAS ENTRE ANÁLISE DE IMAGEM E VISÃO COMPUTACIONAL

A análise de imagem é o processo de interpretação dos dados resultantes do processamento de imagem para extrair informações úteis. Envolve a identificação de padrões, a medição de características e a realização de classificações com base em critérios visuais (Figura 2), para transformar os dados visuais processados em informações compreensíveis e utilizáveis para tomar decisões ou realizar classificações (Gonzales; Woods, 2010).

¹ Disponível em: <https://www.weg.net/digital/blog/visao-computacional-verificacao-de-porcas-e-pontos-de-solda/>. Acesso em: 19/09/2024.

Figura 2 – Exemplo de análise de imagem utilizando ferramentas de medição dentro do software da SICK *Sensor Intelligence*.

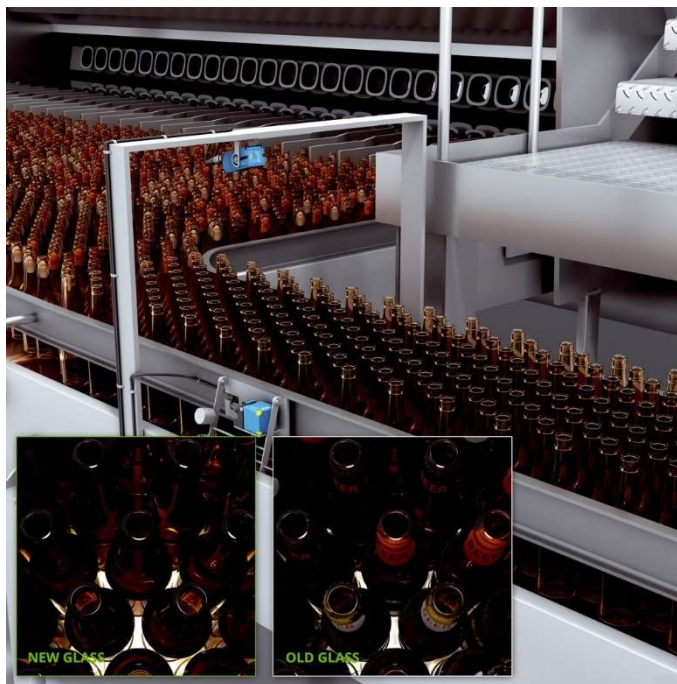


Fonte: SICK².

A visão computacional é um campo da inteligência artificial que busca permitir que os computadores interpretem e compreendam o conteúdo visual das imagens e vídeos de maneira similar à percepção humana, como evidenciado na Figura 3, já que os sistemas podem identificar características e padrões de forma comparável ao que fazemos com nossos próprios olhos e cérebro. Por exemplo, através da compreensão do conteúdo visual, um sistema de visão computacional pode detectar que uma distância entre objetos está menor do que deveria, indicando um possível problema de alinhamento. Da mesma forma, pode identificar falhas, como uma lateral quebrada de um objeto, onde deveria haver uma linha contínua e reta. Assim, como a percepção humana é capaz de notar irregularidades e anomalias em objetos, a visão computacional utiliza algoritmos para realizar essas interpretações de forma automatizada e eficiente, garantindo precisão na análise. Ela engloba tanto o processamento de imagem quanto a análise de imagem, utilizando técnicas avançadas como aprendizado de máquina e inteligência artificial. É utilizada para desenvolver sistemas que possam executar tarefas visuais complexas, como reconhecimento de objetos, rastreamento de movimentos e tomada de decisões automatizadas com base em dados visuais (Gonzales; Woods, 2010).

² Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/catalog/servicos-digitais-e-software/sick-sensorapps/sick-nova/c/g576400>. Acesso em: 19/04/2024.

Figura 3 - Aplicação de visão computacional para realizar a mudança de programa automatizada na máquina de limpeza de garrafas, a partir da classificação das garrafas em vidro novo ou usado.



Fonte: SICK³.

Em conclusão, a análise de imagem e a visão computacional desempenham papéis complementares. A análise de imagem serve como a base para extrair informações específicas de um conjunto de dados visuais, enquanto a visão computacional expande essa capacidade, utilizando essas informações para construir sistemas que possam realizar tarefas complexas de forma autônoma. Juntas, essas disciplinas tornam possível transformar dados visuais em ações práticas e decisões inteligentes, impulsionando avanços em diversos setores industriais.

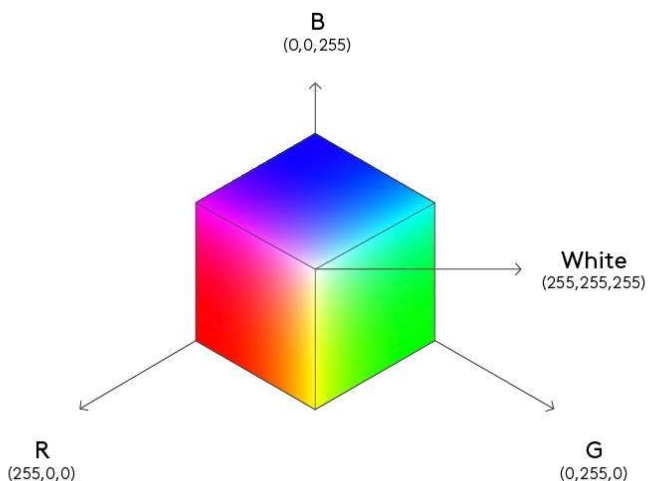
2.3 CONCEITOS DE CORES E TEXTURA NA IMAGEM DIGITAL

No processamento de imagem, os fundamentos básicos da Teoria das Cores são de enorme importância para obter uma imagem de boa qualidade. A compreensão de aspectos como tonalidade, saturação, luminosidade e contraste é essencial para garantir que a imagem final seja visualmente atraente e informativa. Modelos de cor, como RGB (*Red, Green, Blue*) e HSI (*Hue, Saturation, Intensity*), são diferentes abordagens para representar e manipular as cores na imagem. O modelo RGB, ilustrado na Figura 4, é baseado na combinação de luz vermelha, verde e azul para criar uma ampla gama de cores, enquanto o modelo HSI (Figura 5)

³ Disponível em: <https://www.sick.com/ch/en/industries/consumer-goods/food-beverage-and-consumer-care/process-food-and-beverage/automated-program-change-at-the-bottle-cleaning-machine/c/p663178>. Acesso em: 19/09/2024.

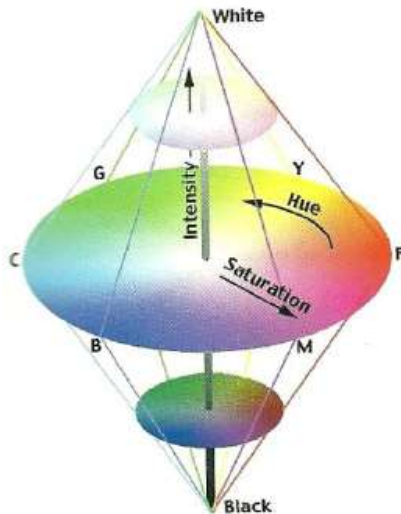
possui foco em tonalidade, saturação e intensidade, permitindo um controle mais intuitivo sobre as características das cores.

Figura 4 - Representação do cubo de cores RGB.



Fonte: MEDIUM (2022)⁴.

Figura 5 - Representação gráfica do modelo de cores HSI.



Fonte: RESEARCHGATE (2011)⁵.

⁴ Disponível em: <https://medium.com/lightricks-tech-blog/an-intro-to-color-spaces-and-how-i-used-them-for-my-game-f712153b114>. Acesso em: 19/04/2024.

⁵ Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/HSI-model-representation-The-letters-R-Y-G-C-B-M-refer-to-Red-Yellow-Green_fig2_239814963. Acesso em: 19/09/2024.

A tonalidade é uma propriedade fundamental no estudo das cores e refere-se às diferentes variações de cor, como amarelo, vermelho e azul, que definem a cor base da imagem. A luminosidade, por sua vez, está relacionada à proximidade dessa cor com o branco ou o preto, ajustando o tom da cor para mais claro ou mais escuro e, assim, controlando o brilho geral da imagem. A saturação, por outro lado, indica a intensidade ou a pureza da cor, determinando se a cor é vibrante e intensa ou mais opaca e desbotada.

Para especificar quantas informações sobre cores estão disponíveis para cada pixel da imagem, deve-se relacionar a quantidade de bits e modo de cor. As imagens no modo de cor RGB, por exemplo, de 8 bits por pixel, possuem $2^8 = 256$ valores de cores possíveis por canal, ou seja, $256^3 \cong 16$ milhões informações de cores. Quanto ao "canal" mencionado, em uma imagem digital, um canal refere-se a uma componente individual da cor. No modo de cor RGB, cada pixel é composto por três canais: um para o vermelho (R), um para o verde (G) e um para o azul (B). Cada canal armazena a intensidade de sua cor correspondente, variando de 0 a 255 em uma imagem de 8 bits por canal. A combinação desses valores nos três canais resulta na cor final exibida para cada pixel. Então, quanto maior a profundidade de bits, maior a quantidade de variações de cor em uma imagem. Um exemplo dessa relação pode ser observado na Figura 6, que apresenta uma comparação visual entre o espectro de cores possíveis em profundidades de 8 e 16 bits. Na imagem de 16 bits, é visível um número significativamente maior de variações de cores em comparação com a de 8 bits, proporcionando transições mais suaves entre tons e uma representação mais rica e detalhada das cores. Isso ocorre porque, com 16 bits, há uma quantidade muito maior de valores possíveis por canal, permitindo uma maior precisão e riqueza na captura das nuances de cor.

Figura 6 – Exemplo da relação entre profundidade de bits e variações de cor em uma imagem.



Fonte: CLOUDINARY⁶.

⁶ Disponível em: <https://cloudinary.com/glossary/bit-depth>. Acesso em: 19/09/2024.

A qualidade da imagem é fortemente influenciada pela percepção de textura, que só se torna evidente com variações de tonalidade. A textura é definida como uma estrutura formada por uma área contendo um grande número de elementos ou padrões relativamente ordenados, que isoladamente podem parecer insignificantes, mas que, quando observados globalmente, ajudam a identificar uma área específica (Gool; Dewaele; Oosterlinck, 1985). Em um ambiente industrial, o processamento de imagem pode ser aplicado para segmentar produtos com base em suas texturas distintas ou para detectar problemas de qualidade ao analisar variações na textura dentro do mesmo produto.

2.4 ILUMINAÇÃO, CONTRASTE E BRILHO

Nas tecnologias de visão 2D, é importante capturar uma imagem de qualidade, escolhendo uma lente adequada e uma boa iluminação. Entender alguns conceitos básicos dos princípios de iluminação, auxilia nas aplicações de sistema de visão, já que uma boa iluminação pode enfatizar os recursos que devem ser analisados na aplicação, garantindo alta qualidade da imagem.

A iluminação pode ser dividida em três categorias. Cada modalidade possui características específicas. A luz difusa, como o próprio nome sugere, é utilizada com auxílio de um difusor, geralmente de vidro ou acrílico, para suavizar a luz. Esta tende a se espalhar e não provocar sombras fortes e demarcadas. A luz direta incide diretamente sobre uma superfície. E ainda, a luz indireta é utilizada para se criar um efeito mais suave, porém ao invés de se utilizar um difusor, a luz é direcionada a uma superfície e então refletida em diversas direções (Fank; Granzotto; Miolo, 2016). No geral, superfícies foscas podem ser iluminadas por luz direta e superfícies brilhantes requerem luz difusa e indireta para evitar reflexos.

Pode haver a necessidade de inspecionar partes específicas de um objeto, e para enfatizar suas características, é importante considerar o ângulo de iluminação, diferenciando, assim, o princípio de iluminação a ser utilizado. Na iluminação direta, que requer alta intensidade e curtos tempos de exposição, a luz do tipo *Ring Light* (Anel de luz) é eficaz para destacar relevos e detalhes do objeto, como aplicada na Figura 7. Isso pode ser feito mesmo em situações de alta velocidade.

Figura 7 – Uso da iluminação do tipo *Ring Light*.



Fonte: Sistemas de visão 2D SICK (2024)⁷.

Para aplicações que precisam ressaltar bordas e arestas de superfícies planas, a iluminação em ângulo, conhecida como *Darkfield*, é apropriada. Nesse tipo, a luz incide em ângulos pequenos, destacando detalhes sutis das arestas, como exemplificado nas Figuras 8 (a) e 9 (a). Já quando é necessário ressaltar o contorno externo do objeto para inspeção de formatos e dimensões, a iluminação por trás do objeto (*Backlight*) é a mais indicada, pois cria um contraste nítido contra a luz emitida pelo próprio senso, isso pode ser visto na Figura 8 (b) e 9 (b).

Figura 8 – Diferença de uso das iluminações *Darkfield* (a) e *Backlight* (b) em uma chave.



(a)

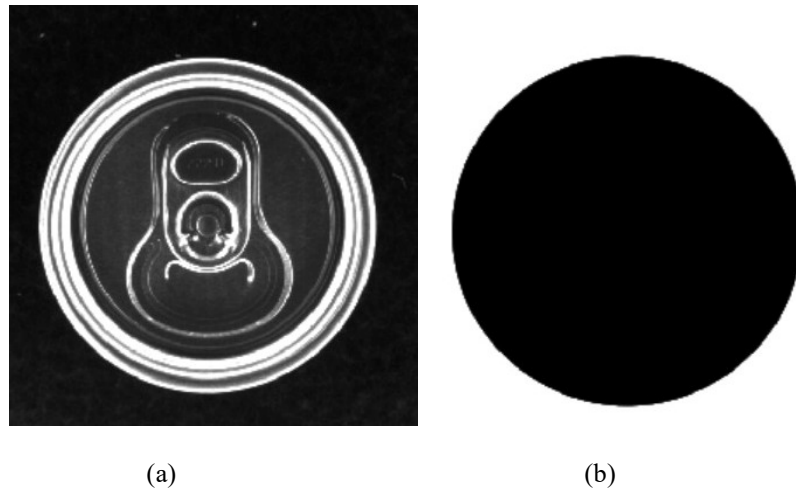


(b)

Fonte: elaborado pela própria autora.

⁷ Slide de treinamento fornecido para integradores SICK.

Figura 9 – Diferença de uso das iluminações *Darkfiel* (a) e *Backlight* (b) em uma tampa de lata.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Quando o objetivo é melhorar o contraste entre áreas planas e inclinadas, o princípio de iluminação *On-axis* (no eixo) é o ideal (Figura 10). Nesse caso, a luz é paralela ao eixo óptico da câmera, graças a um espelho semitransparente, proporcionando uma iluminação uniforme. Em objetos brilhantes, o uso do *Flex Dome* (Figura 11), também conhecido como luz de cúpula, é recomendado, pois ele filtra o excesso de luz refletida, destacando o contraste verdadeiro e evitando brilhos excessivos.

Figura 10 - Uso de iluminação *On-axis* para melhorar o contraste entre áreas.



Fonte: Sistemas de visão 2D SICK (2024)⁸.

⁸ Slide de treinamento fornecido para integradores SICK.

Figura 11 - Uso de iluminação *Flex Dome* para filtrar o excesso de luz.



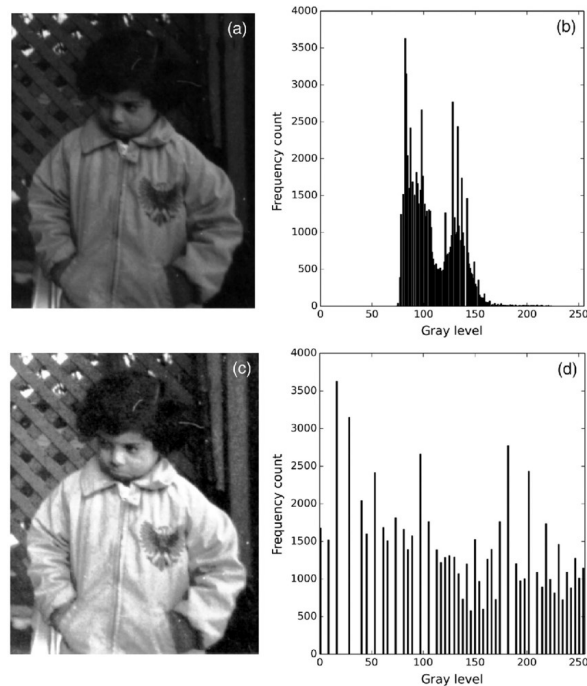
Fonte: Sistemas de visão 2D SICK (2024)⁹.

No ramo industrial, o contraste e o brilho desempenham um papel crucial na captura e análise de imagens. O contraste permite a diferenciação de elementos em peças ou produtos, essencial para a detecção de falhas, como imperfeições ou variações de cor. Um contraste adequado garante que os sistemas de visão automatizados consigam distinguir detalhes importantes, como bordas e superfícies. Já o brilho ajusta a intensidade luminosa da imagem, melhorando a visibilidade em ambientes com iluminação inadequada, como em linhas de produção rápidas onde a iluminação pode variar.

A equalização de histograma, que pode ser vista no exemplo da Figura 12, é uma técnica frequentemente utilizada em ambientes industriais para aprimorar o contraste de imagens capturadas por sensores. Ela redistribui a luminosidade para utilizar melhor a faixa dinâmica, o que é especialmente útil em áreas de produção onde a luz ambiente é limitada ou inconsistentes. Ao melhorar o contraste, essa técnica permite que o sistema de visão industrial detecte defeitos com maior precisão, como pequenos arranhões ou mudanças na superfície de um produto.

⁹ Slide de treinamento fornecido para integradores SICK.

Figura 12 - Equalização de histograma.



Fonte: SCALER TOPICS (2023)¹⁰.

Além disso, em ambientes onde há variação constante de iluminação, como em fábricas com luz natural ou artificial alternando, o controle dinâmico de brilho é essencial. Um sistema automatizado pode ajustar o brilho em tempo real para garantir que a qualidade da imagem permaneça estável, facilitando o reconhecimento de padrões e a análise de qualidade.

Um exemplo prático pode ser observado em sistemas de inspeção de soldas em placas eletrônicas. Nessas aplicações, o ajuste adequado de brilho e contraste permite identificar falhas de soldagem, como bolhas ou falta de material, que são invisíveis a olho nu sem esses ajustes. O processamento correto das imagens aumenta a precisão e a eficiência da inspeção, reduzindo o tempo de inatividade da produção.

2.5 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM

As técnicas de análise de imagem são essenciais para aprimorar e interpretar informações visuais de forma precisa. Elas envolvem uma variedade de métodos que vão desde o processamento inicial das imagens até a extração de características relevantes. Essas técnicas são aplicadas para melhorar a qualidade das imagens, destacar elementos importantes, identificar padrões e eliminar interferências indesejadas. Por meio dessas práticas, é possível

¹⁰ Disponível em: <https://www.scaler.com/topics/filtering-in-image-processing/>. Acesso em: 19/09/2024.

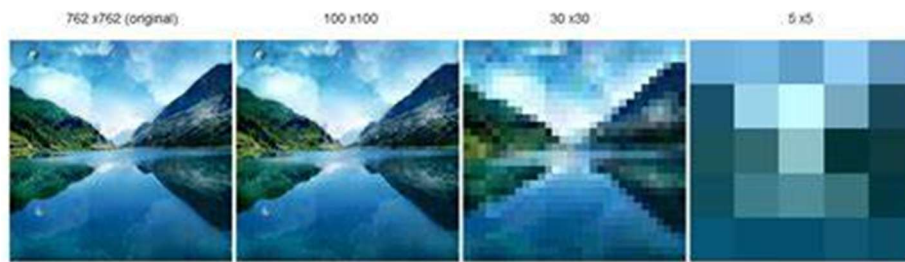
transformar dados visuais brutos em informações significativas, permitindo que sistemas automatizados realizem tarefas complexas, como reconhecimento de objetos, inspeção de qualidade e tomada de decisões em tempo real.

2.5.1 Operações Lógicas e Aritméticas

O pré-processamento de imagens, apesar de não aumentar o conteúdo de informação presente na imagem original, desempenha um papel essencial ao eliminar informações redundantes e suprimir distorções indesejadas. Embora em alguns casos possa até reduzir o conteúdo da imagem, sua principal utilidade reside em melhorar a qualidade dos dados, tornando-os mais adequados para análises subsequentes. A ideia é realçar características importantes enquanto minimiza elementos que possam atrapalhar o processamento posterior. Idealmente, o foco deve ser na obtenção de uma imagem de alta qualidade durante o processo de aquisição para minimizar a necessidade de pré-processamento. No entanto, quando necessário, esse passo pode ser crucial para garantir que as operações posteriores, como segmentação e reconhecimento de padrões, sejam realizadas de maneira mais eficiente e precisa. As operações algébricas em imagens são fundamentais no processamento digital de imagens, permitindo uma variedade de aplicações, desde o realce até a análise de dados visuais. Existem duas categorias principais dessas operações: aritméticas e lógicas.

As operações aritméticas incluem adição, subtração, multiplicação e divisão de imagens, e são realizadas de forma pixel-a-pixel, no formato de matrizes, entre duas imagens. O formato pixel-a-pixel pode ser ilustrado de forma melhor ao diminuir a resolução de imagem, como ilustrado na Figura 13, de tal forma que a visualização do pixel fica mais grosseira, sendo assim é possível ver o que é o pixel de uma imagem que será usado um a um nas operações de matrizes. Já as operações lógicas como AND, OR e NOT são aplicadas a imagens de forma binária, manipulando diretamente os valores dos pixels. A escolha da operação adequada depende do objetivo específico da análise ou processamento, seja para melhorar a qualidade visual, extrair informações ou realizar análises detalhadas das características presentes em uma imagem.

Figura 13 - Redução da resolução de uma imagem para exemplificar os pixels que são utilizados como elemento da matriz nas operações com imagens digitais.

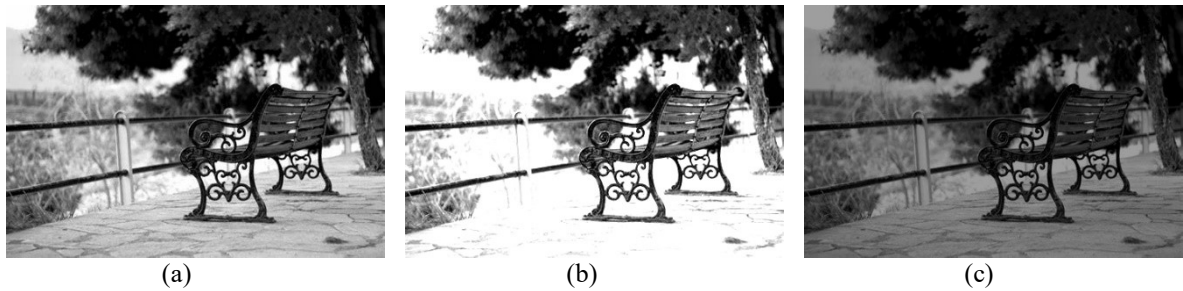


Fonte: PIBID MATEMÁTICA UNIFEI (2015)¹¹.

As operações de multiplicação e divisão, estão ligadas ao brilho da imagem, uma aumenta o brilho e a outra diminui, respectivamente. Elas podem ocorrer de duas formas: correção de brilho (*brightness correction*) ou transformada de nível de cinza (*grey-scale transformation*). A correção de brilho é sensível à localização do pixel, permitindo que ajustes sejam feitos de forma não uniforme em toda a imagem. Isso é útil quando a iluminação da imagem é desigual, por exemplo, devido a sombras ou variações de luz em diferentes áreas ou quando se quer deixar a imagem mais clara ou escura, como mostrada na Figura 14. Ao modificar o brilho dos pixels com base na posição, é possível melhorar a qualidade da imagem em regiões específicas, tornando-a mais adequada para análise. Diferentemente da correção de brilho, a transformada de nível de cinza ajusta o brilho dos pixels de forma independente da posição na imagem. Uma aplicação comum dessa técnica é a equalização do histograma, em que os níveis de cinza são redistribuídos para aumentar o contraste da imagem. Neste caso, cada pixel é modificado apenas com base em seu valor de intensidade, sem levar em conta sua posição. Isso permite destacar detalhes e padrões em toda a imagem, tornando-a mais clara e equilibrada para processos de análise. “O ajuste de brilho é frequentemente utilizado como etapa de pré-processamento em realce de imagem” (França, 2004, p. 24).

¹¹ Disponível em: <https://pibidmatunifei.blogspot.com/2015/06/por-tras-de-fotografias-e-imagens-um.html>. Acesso em: 19/09/2024.

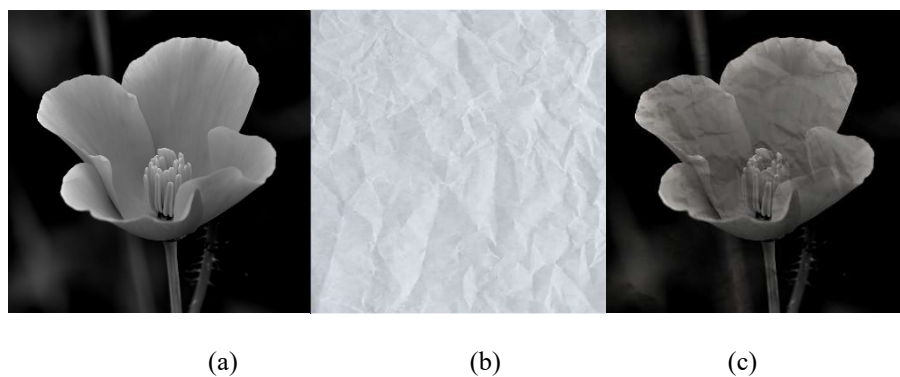
Figura 14 – Uso de correção de brilho para deixar a imagem original (a) mais clara (b) e mais escura (c).



Fonte: Adaptada de PXHERE (2016)¹².

A adição de imagens funciona como uma sobreposição, sendo utilizada para combinar informações de diferentes fontes visuais, como demonstrado na Figura 15. Nessa figura, é mostrada uma imagem original de uma flor e uma imagem de textura de papel amassado. Essas duas imagens foram sobrepostas, resultando em uma flor com as pétalas apresentando o aspecto de folha de papel amassada, criando um efeito visual único. Por outro lado, a subtração (Figura 16) é aplicada para captar variações sutis de movimento, muitas vezes não percebidas ao comparar dois cenários sequenciais. A operação resulta numa imagem onde é possível observar um leve borrão no lado direito do encosto da cadeira, indicando uma leve movimentação na posição da mesma. Ao realizar a subtração, a diferença resultante destaca as partes da imagem que se alteraram entre os dois cenários, revelando detalhes que podem ter sido perdidos na análise visual direta.

Figura 15 - Adição da imagem de flor (a) com uma textura (b), resultando em uma imagem de flor texturizada (c).

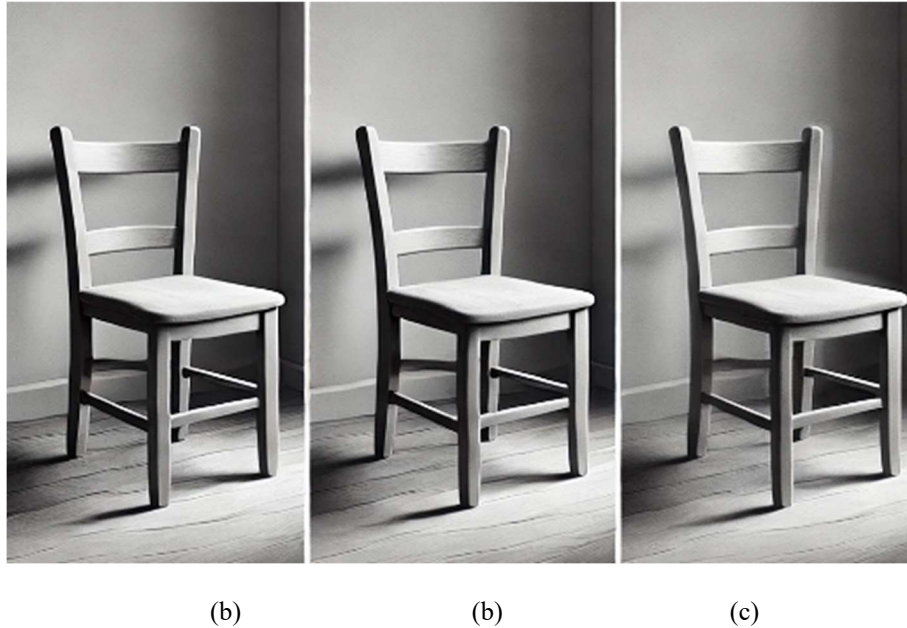


Fonte: Adaptada de PIXABAY (2014)¹³.

¹² Disponível em: <https://pxhere.com/pt/photo/81049>. Acesso em: 19/09/2024.

¹³ Disponível em: <https://pixabay.com/pt/photos/flor-preto-e-branco-branco-preto-396293/>. Acesso em: 19/09/2024.

Figura 16 – Imagem gerada por IA utilizando Chat GPT 4o para simular a subtração das imagens (a) e (b) para visualizar movimento na imagem (c).

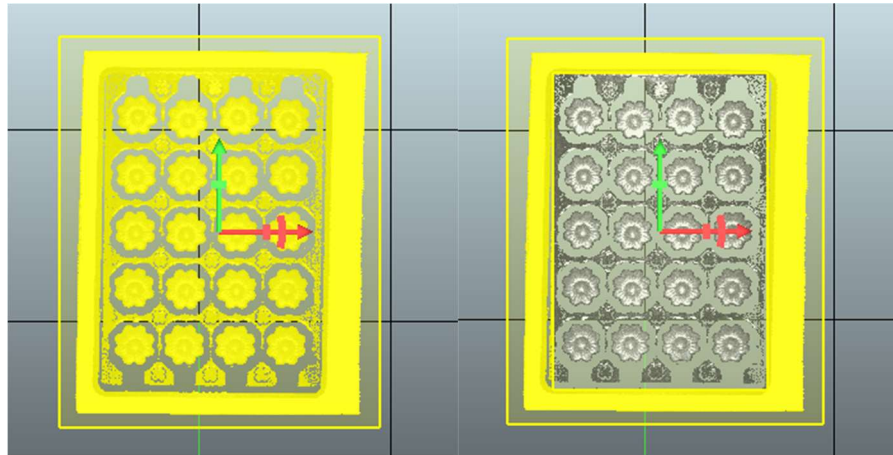


Fonte: elaborado pela própria autora.

No sistema de visão computacional, os operadores lógicos OR, AND, e NOT desempenham papéis cruciais na manipulação e análise de imagens, especialmente quando se trata de operações com máscaras, que se referem ao uso de matrizes, chamadas de máscaras ou kernels, que são aplicadas a uma imagem para realizar transformações ou extrações de características específicas. Essas operações são usadas para combinar, modificar e filtrar imagens, permitindo que determinadas características sejam destacadas ou removidas.

O operador AND é usado para combinar duas imagens ou uma imagem e uma máscara. Ele compara os pixels correspondentes das duas imagens e mantém um valor alto (por exemplo, 1) apenas se ambos os pixels forem altos. Quando aplicado a uma máscara, o operador AND pode ser usado para isolar áreas de interesse em uma imagem, como o caso ilustrado na Figura 17, onde se deseja destacar a borda da caixa de biscoitos. Para isolar a borda, foram aplicadas duas ferramentas de localização de área: uma na caixa toda e outra apenas na área interna que os biscoitos ocupam, excluindo a borda. Ao operar as duas áreas com o operador AND (mascaramento), sobra a diferença entre elas, resultando na isolação da borda da caixa de biscoitos. Por exemplo, se você tem uma máscara que destaca uma determinada região da imagem e aplica o operador AND entre a imagem e a máscara, o resultado será uma nova imagem onde apenas a região destacada pela máscara é mantida, e o resto é descartado (tornado preto ou 0).

Figura 17 - Operador AND aplicado como mascaramento para isolar a borda da caixa de biscoitos.



Fonte: elaborado pela própria autora.

O operador OR é usado para combinar informações de duas imagens ou uma imagem e uma máscara. Ele compara os pixels correspondentes das duas imagens e mantém um valor alto se pelo menos um dos pixels for alto. Isso é útil quando você deseja combinar regiões de interesse provenientes de diferentes máscaras ou partes de uma imagem. Por exemplo, ao usar o operador OR com duas máscaras diferentes, você pode destacar várias áreas de uma imagem simultaneamente, mantendo qualquer região que seja marcada em pelo menos uma das máscaras.

O operador NOT inverte os valores dos pixels de uma imagem ou máscara. Em termos binários, ele transforma 1 em 0 e 0 em 1. Quando aplicado a uma imagem, como na Figura 18 o NOT pode ser usado para criar o "negativo" da imagem, tornando áreas claras escuras e vice-versa. Ao usar o NOT com máscaras, você pode inverter a região de interesse; por exemplo, se uma máscara destaca uma região específica da imagem, aplicar NOT à máscara resultará em uma nova máscara que exclui essa região e destaca o restante da imagem. Isso é útil para operações onde é necessário trabalhar com as regiões que não são de interesse inicialmente destacadas.

Figura 18 – Operador NOT aplicado a uma imagem (a) para criar o “negativo” dela (b).



(a)

(b)

Fonte: REPAIR SHOP LIFE (2022)¹⁴.

Esses operadores podem ser combinados para realizar operações mais complexas, como o operador XOR, NOR, NAND. A combinação desses operadores permite uma ampla gama de manipulações, como a segmentação, a remoção de ruídos e o realce de características específicas em imagens, tornando-os essenciais em sistemas de visão computacional.

2.5.2 Ruídos e Filtros

Os operadores lógicos e aritméticos estudados são a base para a criação dos filtros que aplicamos em imagens. Esses filtros, amplamente utilizados em processamento de imagem, são construídos a partir dessas operações fundamentais. Por trás de cada filtro aplicado, como suavização, realce de bordas ou mascaramento, estão esses operadores que determinam como os pixels da imagem serão modificados.

Os filtros são ferramentas essenciais no processamento de imagens, especialmente em sistemas de visão computacional. Eles têm a função de modificar as características visuais da imagem para destacar ou ocultar determinados elementos. Esses filtros podem ser classificados em diferentes tipos, como filtros espaciais e filtros de frequência, sendo os filtros espaciais os mais comumente utilizados em aplicações industriais (Gonzales; Woods, 2010).

Entre os filtros espaciais, destacam-se os filtros de média, medianos e de realce. O filtro de média é usado principalmente para suavizar uma imagem, reduzindo o impacto de ruídos

¹⁴ Disponível em: <https://www.repairshoplife.com/blogs/news/4-signs-you-need-new-garage-tools>. Acesso em: 19/09/2024.

indesejados. Esse tipo de filtro trabalha de maneira linear, substituindo cada pixel pela média de seus vizinhos, o que gera uma suavização uniforme em toda a imagem. No entanto, ele também pode suavizar detalhes importantes, como bordas, o que pode ser um problema em algumas aplicações industriais que exigem a preservação de detalhes críticos, como na inspeção de bordas ou defeitos em produtos (Gonzales; Woods, 2010).

Em contraste, o filtro mediano também tem a função de suavizar e remover ruídos, mas é um filtro não-linear, sendo mais eficaz para remover ruídos do tipo sal e pimenta, comuns em imagens industriais. Segundo Gonzales e Woods (2010), ruído do tipo sal e pimenta é um tipo de ruído impulsivo que afeta imagens digitais, onde os pixels são corrompidos de forma aleatória, sendo substituídos pelos valores máximos (branco) ou mínimos (preto) de intensidade, parecendo pequenos pontos brancos ou pretos dispersos pela imagem. Este tipo de ruído é comum em imagens transmitidas por canais de comunicação com falhas e pode ser removido de forma eficaz com filtros mediano, que preservam as bordas enquanto eliminam o ruído. O filtro mediano substitui o valor do pixel pela mediana dos valores dos pixels vizinhos, preservando as bordas da imagem, uma vantagem significativa em aplicações que envolvem a detecção precisa de formas e contornos. Essa capacidade de suavizar sem eliminar bordas o torna uma escolha ideal em sistemas de inspeção visual, onde é crucial manter os contornos dos objetos inspecionados (Jain; Kasturi; Schunck, 1995).

Os filtros de realce, por outro lado, têm a função oposta aos filtros de suavização. Eles destacam os detalhes, como bordas e pequenas texturas, essenciais para a identificação de características específicas em um objeto. Entre os filtros de realce mais utilizados estão o filtro laplaciano e o filtro de diferenças. O filtro laplaciano é um operador linear que realça os detalhes em todas as direções igualmente, tornando-o ideal para identificar bordas em imagens onde a direção específica dos detalhes não é conhecida previamente. Já o filtro de diferenças realça os detalhes em uma direção específica, escolhida de acordo com a orientação da máscara utilizada, sendo particularmente útil quando se deseja destacar arestas ou linhas de uma determinada direção na imagem, como em inspeções de precisão industrial que exigem o destaque de arestas em um ângulo específico (Gonzales; Woods, 2010).

Ruído adaptativo é um tipo de ruído presente em imagens que varia em intensidade e características de acordo com a região da imagem ou com o conteúdo capturado. Ao contrário do ruído gaussiano, que afeta toda a imagem de maneira uniforme, o ruído adaptativo se ajusta

às diferentes áreas da imagem, influenciando mais em regiões de maior complexidade ou textura. De acordo com Gonzales e Woods (2010), esse tipo de ruído pode ser mais difícil de tratar, pois exige técnicas específicas de redução de ruído para cada parte da imagem.

Além desses filtros, a função Gaussiana também desempenha um papel fundamental no processamento de imagens industriais. As funções Gaussianas são amplamente utilizadas em filtros de suavização, conhecidos por serem altamente eficientes em reduzir ruídos sem perder detalhes importantes na imagem. A suavização Gaussiana é um tipo de filtro passa-baixas, que reduz as frequências altas da imagem, eliminando ruídos e pequenas variações indesejadas. Isso é especialmente útil em aplicações industriais que envolvem a detecção de formas suaves e contornos contínuos, como na inspeção de superfícies ou na análise de produtos alimentícios (Jain; Kasturi; Schunck, 1995).

As funções Gaussianas possuem várias propriedades que as tornam altamente eficazes no processamento de imagens. Segundo Jain, Kasturi e Schunck (1995), essas propriedades incluem a simetria, o fato de serem funções não-negativas, e a propriedade de serem separáveis, o que facilita sua implementação computacional. Além disso, as Gaussianas são isotrópicas, ou seja, aplicam a mesma suavização em todas as direções, tornando-as extremamente úteis para eliminar ruídos enquanto preservam as bordas de objetos na imagem. Em aplicações industriais, essas características tornam os filtros Gaussianos uma escolha popular para suavizar a imagem antes de outras etapas de processamento, como a detecção de bordas ou a segmentação de objetos.

Ao entender o funcionamento de cada operação, é possível compreender o efeito específico que cada filtro terá sobre a imagem, permitindo um uso mais eficiente e preciso dessas ferramentas em sistemas de visão computacional.

3 SENSORES ÓPTICOS

A discussão sobre tecnologias 2D e 3D é fundamental para entender as ferramentas e métodos que impulsionam a captura e análise de imagens em diversos setores. Compreender o funcionamento e a otimização das tecnologias 2D é essencial para aprimorar a qualidade das imagens e garantir resultados precisos em aplicações industriais e científicas. Da mesma forma, explorar as tecnologias 3D, como estereoscopia e triangulação a laser, é crucial para alcançar uma visão mais completa e detalhada dos objetos e ambientes (Moreira, 2016). Abordar esses

tópicos permite uma compreensão abrangente das capacidades e das melhores práticas para implementar soluções de visão modernas e eficazes.

3.1 TECNOLOGIAS 2D

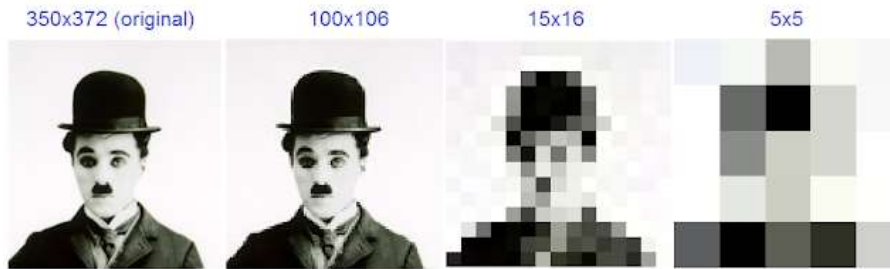
“Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, em que x e y são coordenadas espaciais (plano)” (Gonzalez; Woods, 2010, p. 1). Os sensores ópticos, que utilizam tecnologias 2D, são úteis para aplicações com alto contraste, ou quando os objetos possuem texturas ou cores bem definidas. Dito isso, os sensores de visão 2D capturam impressões e/ou superfícies, não sendo indicado, por exemplo, para inspecionar falta de conteúdo em uma caixa, medidas tridimensionais e formato.

Para representar a imagem como uma função bidimensional $f(x, y)$ em forma de matrizes, considere que cada elemento da matriz corresponde à intensidade da imagem em um ponto específico, onde x e y representam as coordenadas no plano. A Equação (1) é a base de uma matriz I para representação de uma imagem com resolução 5x5.

$$I = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & f(0,2) & f(0,3) & f(0,4) \\ f(1,0) & f(1,1) & f(1,2) & f(1,3) & f(1,4) \\ f(2,0) & f(2,1) & f(2,2) & f(2,3) & f(2,4) \\ f(3,0) & f(3,1) & f(3,2) & f(3,3) & f(3,4) \\ f(4,0) & f(4,1) & f(4,2) & f(4,3) & f(4,4) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Se cada posição na matriz contém um valor de intensidade de brilho (variando, por exemplo, de 0 a 255 para uma imagem em tons de cinza), onde os valores próximos de 0 representam os pixels mais escuros (pretos), os próximos de 255 representam os pixels mais claros (brancos) e os valores intermediários representam tons de cinza. Podemos representar a Figura 19 em uma resolução 5x5 com uma matriz estimada na Equação (2), baseada na observação visual da imagem pixelada e na matriz base mostrada na Equação (1).

Figura 19 – Imagem exemplificada com diferentes resoluções.



Fonte: PIBID MATEMÁTICA UNIFEI (2015)¹⁵.

$$I = \begin{pmatrix} 240 & 250 & 240 & 250 & 240 \\ 200 & 150 & 0 & 150 & 200 \\ 180 & 100 & 120 & 100 & 180 \\ 50 & 0 & 90 & 60 & 100 \\ 80 & 20 & 30 & 40 & 70 \end{pmatrix} \quad (2)$$

A captura de imagem em sensores de visão, se assemelham a captura nas câmeras convencionais, como câmeras fotográficas, de celulares, de tablets e de CFTV. Todas possuem um sensor que é responsável por captar as informações e converter em intensidade de luz e cor, na forma de sinal elétrico.

No ambiente industrial, a tecnologia 2D desempenha um papel crucial em diversos processos de automação e controle de qualidade. Sua capacidade de capturar, processar e analisar imagens em tempo real permite a implementação de sistemas eficientes para identificação, rastreamento e inspeção de produtos. Entre as principais aplicações dessa tecnologia estão os scanners de códigos de barras, leitores de códigos baseados em imagens, componentes de leitura/escrita RFID e sistemas de visão.

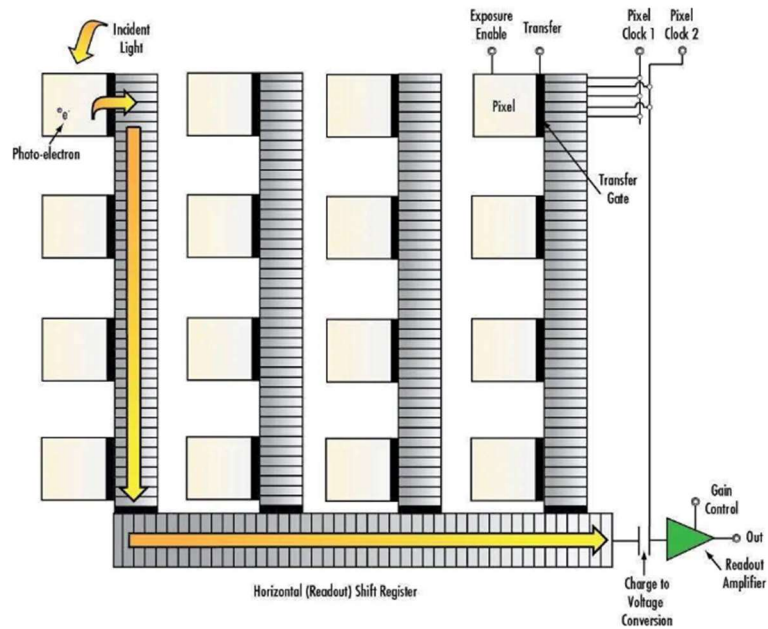
3.1.1 Componentes e Funcionamento

O Dispositivo de Carga Acoplada, *charge-coupled device* (CCD), tem um processo de conversão mais lento se comparado a outros dispositivos de captura. Após a captura de luz ser armazenada nos fotodiodos, a carga acumulada é transferida de um pixel para outro, na mesma linha, até que a toda a carga seja reunida e convertida em um sinal digital, esse fluxo pode ser entendido com a Figura 20. No Semicondutor Complementar de Óxido Metálico (CMOS), cada pixel possui um transistor, seu próprio amplificador e um conversor analógico para digital

¹⁵ Disponível em: <https://pibidmatunifei.blogspot.com/2015/06/por-tras-de-fotografias-e-imagens-um.html>. Acesso em: 19/09/2024.

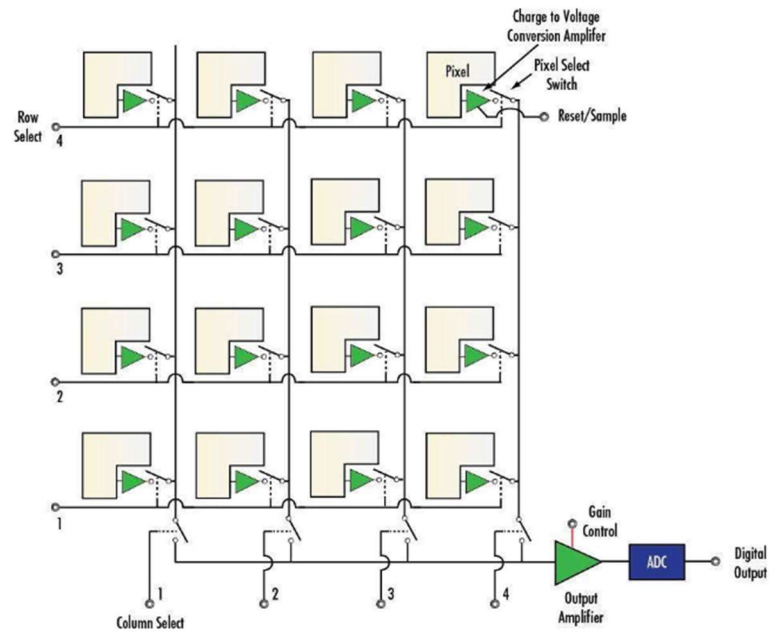
(A/D), oferecendo altas velocidades de leitura e um menor consumo de energia, como visto na Figura 21.

Figura 20 – Processo de captura da luz utilizando o Dispositivo de Carga Acoplada.



Fonte: NEVSEMI (2024)¹⁶.

Figura 21 – Processo de captura da luz utilizando o Semicondutor Complementar de Óxido Metálico.



Fonte: NEVSEMI (2024)¹⁷.

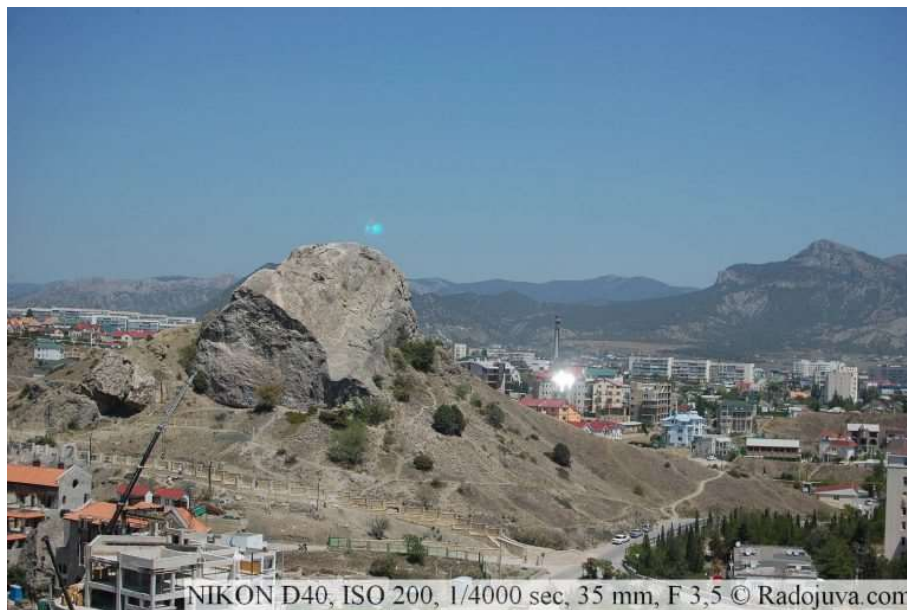
¹⁶ Disponível em: <https://www.nevsemi.com/blog/ccd-vs-cmos>. Acesso em: 19/09/2024.

¹⁷ Disponível em: <https://www.nevsemi.com/blog/ccd-vs-cmos>. Acesso em: 19/09/2024.

Os sensores CCD são dispositivos acionados por corrente que geram uma saída de pulso analógico. Já os CMOS, são acionados por tensão e possuem uma saída digital, com um menor fluxo de cargas, o que ocasiona uma menor potência. Com uma tecnologia mais avançada, os CMOS são mais sensíveis, possuem ruído e custo menores, se comparados aos CCD (Hain; Kähler; Tropea, 2007).

Quando o sensor CCD é exposto a uma iluminação de grande intensidade, pode ocorrer a propagação da carga para os pixels adjacentes devido à alta saturação, levando a um fenômeno conhecido como *Blooming*, que pode ser visto na Figura 22. O resultado desse fenômeno é uma imagem com alta iluminação na parte afetada, como uma espécie de “clarão”. Já que no CMOS a carga é amplificada e convertida no mesmo ponto, sem transferências, não ocorre esse fenômeno. No CMOS, se houver uma saturação, ela será pontual.

Figura 22 - Efeito *blooming* em uma foto de paisagem.



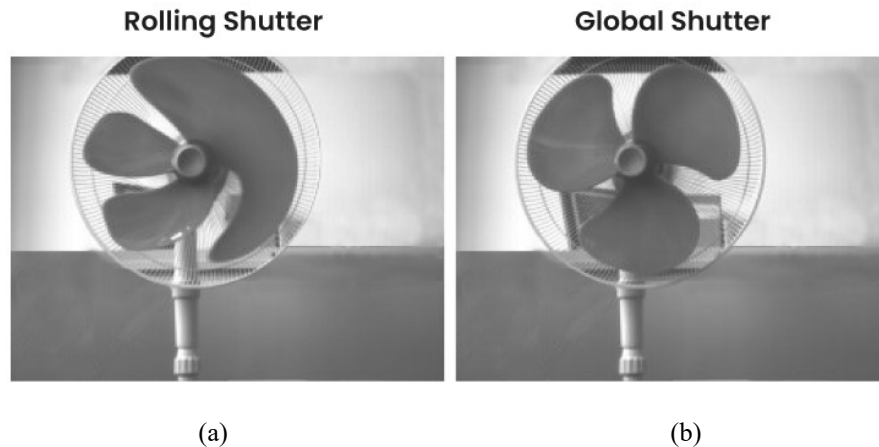
Fonte: RADOJUVA (2016)¹⁸.

O método de exposição, ou seja, como se dará o controle da quantidade de luz que é convertida nos pixels, deve ser escolhido com base na aplicação ou até mesmo das variadas iluminações aplicáveis. Nas câmeras com CMOS, há duas categorias de técnicas do obturador: o *Global shutter* (Figura 23b) que gera uma imagem da área completa no mesmo instante e o *Rolling shutter* (Figura 23a) que tem um atraso de tempo, gerando a imagem linha por linha. Como os sensores CMOS estão expostos a altas velocidades de leituras, sua funcionalidade

¹⁸ Disponível em: <https://radojuva.com/en/2016/07/ccd-blooming/comment-page-1/>. Acesso em: 19/09/2024.

atenua os efeitos do obturador rolante, que ocasionam imagens distorcidas quando um objeto se move rapidamente em relação ao tempo de exposição e leitura do sensor.

Figura 23 - Técnicas do obturados: *rolling shutter* (a) e *global shutter* (b).



Fonte: DPREVIEW (2023)¹⁹.

3.1.2 Otimização de Imagem

Outro tópico, além do tópico de iluminação tratado em 2.4, totalmente atrelado as tecnologias 2D é a lente da câmera. É importante relacionar o formato de imagem com as especificações da lente, pois a resolução da lente deve ser, no mínimo, equivalente à resolução do sensor, garantindo que a qualidade da imagem capturada corresponda à resolução desejada. Usar uma lente com menor resolução pode comprometer a nitidez e os detalhes da imagem final. Entender os conceitos de Campo de Visão (*Field of View*), distância de trabalho (*Working Distance*) e distância de leitura (*Reading Distance*) guiará a escolha da lente adequada para a aplicação.

O campo de visão (FOV) são as coordenadas (x, y) ou (H, V) que a câmera pode capturar. A distância entre a câmera e o objeto a ser inspecionado é conhecida como distância de leitura ou de trabalho. Quanto maior a distância de trabalho, maior será o FOV e o ângulo de visão da câmera, respeitando os limites mínimos e máximos de operação de certos hardwares. Para ajustar essa visão, utiliza-se a distância focal, que é a capacidade de uma lente de ampliar a

¹⁹ Disponível em <https://www.dpreview.com/forums/thread/4714730>. Acesso em: 19/09/2024.

imagem de um ponto distante em uma cena. Ou seja, “quanto maior o comprimento focal, mais estreito é o ângulo de visão e maior é a ampliação da imagem” (Distância [...], 2019).

Os princípios das lentes das câmeras são baseados na Equação (3) do espelho que relaciona a distância focal (f), a distância do objeto (d_o) e a distância da imagem (d_i). Sendo f a distância entre o espelho e o seu foco, d_o a distância entre o objeto e o vértice do espelho e d_i a distância entre a imagem formada e o vértice do espelho.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} \quad (3)$$

A relação entre as equações dos espelhos da física e o conceito de campo de visão (FOV) e distância focal nas câmeras é uma aplicação direta dos princípios da óptica geométrica. Ambos envolvem a formação de imagens, sejam elas reais ou virtuais, por meio da interação da luz com superfícies refletoras (espelhos) ou refratoras (lentes). No caso das câmeras, a lente atua como um sistema que converge (ou diverge) a luz para formar uma imagem no sensor. Dependendo da distância do objeto (d_o) em relação à lente, a câmera ajusta a posição de sua lente para focar a imagem no sensor (a distância da imagem d_i). Ao alterar essa relação, a câmera pode mudar seu FOV e a ampliação da imagem, de forma semelhante ao ajuste da distância entre o objeto e um espelho côncavo (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

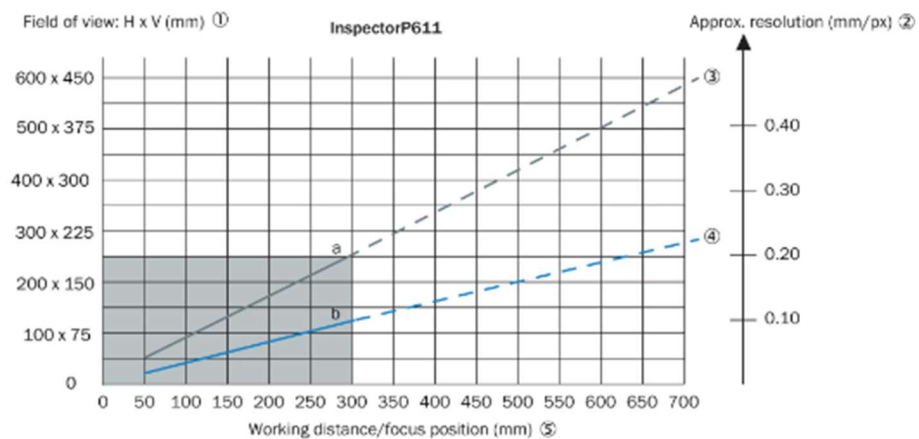
O tamanho de um objeto ou imagem, medido perpendicularmente ao eixo central do espelho, é chamado de altura do objeto ou imagem. Seja h a altura de um objeto, e h' a altura da imagem correspondente. Nesse caso, a razão h'/h é chamada de ampliação lateral do espelho e representada pela letra M . Por convenção, a ampliação lateral é um número positivo, quando a imagem tem a mesma orientação que o objeto, e um número negativo, quando a imagem tem a orientação oposta (Halliday; Resnick; Walker, 2016).

$$M = \frac{h'}{h} \quad (4)$$

Como mencionado, a escolha da lente é baseada na relação entre o campo de visão e a distância de trabalho, conforme exemplificado a seguir na Figura 24 e 25. Em relação aos sensores de visão, essa relação geralmente é fornecida no manual do fabricante para orientar a

escolha da lente adequada para cada aplicação. O guia também destaca a influência da iluminação externa, que pode aumentar o campo de visão e a resolução em mm/px (milímetro por pixel). Na imagem, nota-se que lentes com distâncias focais menores ($f=6$ mm), representada pela linha “a”, proporcionam um campo de visão maior (600x450 mm). Já com uma lente de distância focal maior ($f=12$ mm), representada pela linha “b”, o campo de visão é reduzido (aproximadamente 300x225 mm) e a resolução diminui em comparação com o uso da lente de 6 mm. Se for necessário um campo de visão ou resolução superior ao especificado no guia, é recomendável realizar um novo dimensionamento do hardware para atender às exigências da aplicação.

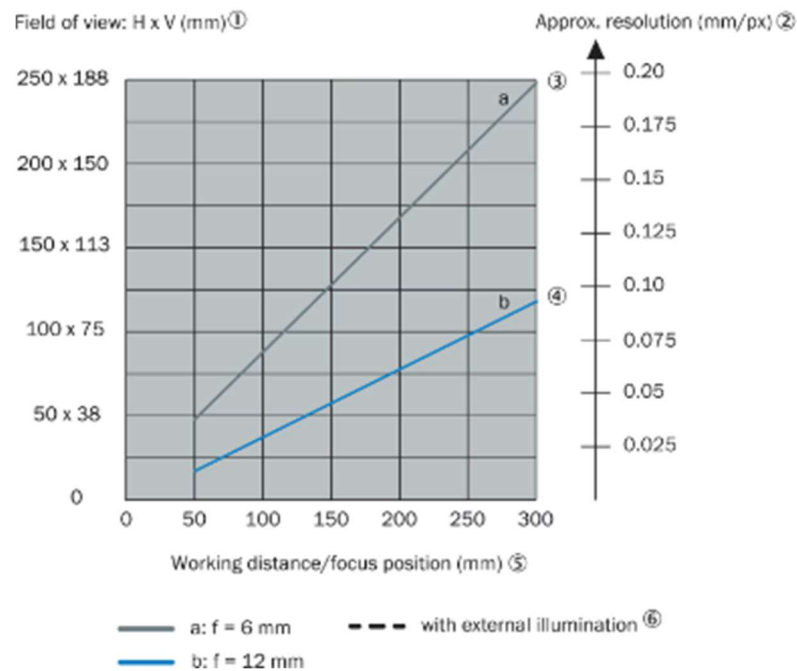
Figura 24 - Gráfico completo para escolha de lentes de um hardware específico.



Fonte: SICK²⁰.

²⁰ Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/catalog/produtos/processamento-de-imagens-da-industria-e-identificacao/processamento-de-imagens-na-industria/inspectorp61x/v2d611p-mlsbi5/p/p672481?tab=detail>. Acesso em: 19/09/2024.

Figura 25 - Gráfico para escolha de lentes de um hardware específico da zona com iluminação própria.



Fonte: SICK²¹.

Quando o fabricante não fornece o guia, o cálculo pode ser feito utilizando as informações de FOV vertical (FOV_v) e horizontal (FOV_H) junto com o espaçamento entre pixels. O tamanho da imagem é obtido multiplicando o FOV (horizontal ou vertical) pelo espaçamento entre pixels. É importante converter esse valor para milímetros (mm) se ele estiver em outra unidade, pois a próxima etapa envolve calcular a ampliação, que é a relação entre o tamanho real do objeto e o tamanho da imagem, conforme a Equação (4). Para isso, deve-se medir o objeto inspecionado na mesma orientação utilizada no cálculo anterior, em milímetros. Em seguida, faz-se a razão entre o tamanho da imagem e o tamanho real do objeto.

A seguir, para determinar o range da lente focal, é necessário possuir a distância de trabalho (WD) máxima e mínima suportada pelo hardware e a ampliação (M), de tal forma que apliquemos nas Equações (3) e (4):

(3)

²¹ Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/catalog/produtos/processamento-de-imagens-da-industria-e-identificacao/processamento-de-imagens-na-industria/inspectorp61x/v2d611p-mlsbi5/p/p672481?tab=detail>. Acesso em: 19/09/2024.

$$f_{min} \approx \frac{WD_{min} \times M}{1 + M}$$

$$f_{max} \approx \frac{WD_{max} \times M}{1 + M} \quad (4)$$

Dessa forma, seleciona-se uma das lentes focais disponíveis, cujo tamanho esteja dentro do intervalo focal máximo e mínimo obtido nas Equações (3) e (4). Após a escolha, se for necessário determinar a melhor distância de trabalho, ela pode ser calculada utilizando a Equação (5).

$$WD = \frac{f \times (1 + M)}{M} \quad (5)$$

Para desenvolver uma solução viável, é fundamental que a imagem capturada esteja focada e nítida, aonde se quer utilizar alguma ferramenta, com um tempo de exposição adequado à aplicação. O tempo de exposição refere-se ao período em que o obturador da câmera permanece aberto, permitindo que o sensor registre a luz. Quanto maior esse tempo, mais luz será captada, resultando em uma imagem mais clara. No entanto, um tempo de exposição excessivo pode causar borrões, especialmente se houver movimento na cena.

A Profundidade de Campo (DOF - *Depth of Field*) é outro aspecto crucial para garantir a nitidez da imagem. Ela se refere à faixa de distâncias em que o objeto permanece em foco. A abertura da lente, ilustrada na Figura 26, tem um papel significativo na DOF e na quantidade de luz que atinge o sensor.

Uma abertura grande, por exemplo $f/2.0$ na Figura 26, permite mais luz no sensor, mas resulta em uma DOF rasa, deixando apenas uma parte específica da cena em foco enquanto o fundo fica desfocado. Em contrapartida, uma abertura pequena, por exemplo $f/22$ na Figura 26, permite menos luz no sensor, mas aumenta a DOF, proporcionando uma maior área de foco, com mais elementos da cena nítidos.

Ao configurar uma câmera para análise de imagem, é necessário encontrar um equilíbrio entre a abertura da lente e o tempo de exposição. Uma abertura maior permite captar mais luz e é útil em condições de pouca iluminação, mas reduz a profundidade de campo. Já uma abertura menor, aumenta a profundidade de campo, mantendo mais elementos da cena em foco, o que é essencial para aplicações que exigem uma imagem com o máximo de nitidez e foco possível,

especialmente na área específica onde será realizada a análise de imagens, garantindo precisão nos detalhes e na captura das características relevantes. Essa relação é demonstrada na Figura 26.

Figura 26 – Representação da relação de abertura de lente, captação de luz e profundidade de campo.



Fonte: OMNILARGESS²².

Portanto, ao ajustar a câmera, deve-se considerar a necessidade de luz, a nitidez desejada em toda a imagem e a dinâmica da cena para encontrar a melhor combinação de abertura e tempo de exposição, garantindo uma imagem de qualidade adequada à aplicação.

3.2 TECNOLOGIAS 3D

No mundo da captura tridimensional, diversas tecnologias oferecem abordagens distintas para criar representações precisas e detalhadas de ambientes. Cada uma dessas tecnologias possui características específicas que a tornam mais adequada para diferentes contextos e aplicações. Este panorama das tecnologias 3D ilustra a variedade de soluções disponíveis para modelagem tridimensional, automação e análise de ambientes, cada uma atendendo a necessidades e condições específicas.

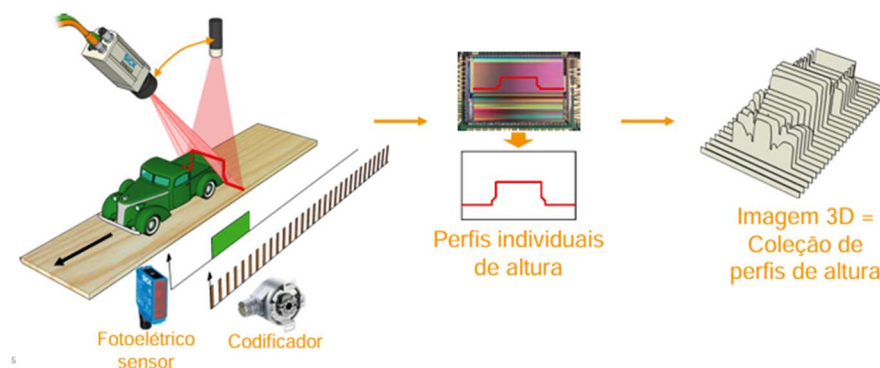
A triangulação a laser é uma técnica fundamental em sensores de visão 3D, utilizada para capturar e analisar a forma de objetos com alta precisão. É importante não confundir os sensores de triangulação com os sensores de ponto de luz único, embora os conceitos sejam complementares.

²² Disponível em: <https://omnilargess.com/beginners-photography-class/friday-photo-tip-understanding-aperture/>. Acesso em: 19/09/2024.

Os sensores de triangulação baseiam-se no princípio da triangulação a laser. Nesse método, um feixe de luz é projetado sobre o objeto de medição e a luz refletida é detectada por um receptor sensível posicionado em um ângulo específico. Com base no ângulo entre a direção de emissão e a de recepção, a posição do objeto é calculada utilizando fórmulas matemáticas que se baseiam na geometria do triângulo formado. O funcionamento básico de um sensor de triangulação a laser envolve reunir diversos pontos de luz em uma linha de informação (Viviani, 2021).

Esse princípio óptico permite determinar o comprimento do lado desconhecido do triângulo. Além disso, como a medição depende da posição da luz e não da sua intensidade, a influência da cor e da refletividade do objeto é mínima. Dessa forma, a triangulação a laser é amplamente utilizada em câmeras 3D, onde a combinação de vários pontos de informação cria um mapa de altura à medida que o objeto visualizado se move. Em cada ponto de luz, o sinal elétrico é codificado e o mapa de altura é registrado na memória, servindo como referência para ferramentas de visão mecânica. Esse processo é representado detalhadamente na Figura 27.

Figura 27 – Etapas da tecnologia de triangulação a laser.



Fonte: Sistema de visão 3D SICK (2024)²³.

Apesar de sua eficácia e da pouca interferência de cor e refletividade, os sensores de triangulação a laser enfrentam duas limitações principais que podem comprometer a qualidade dos dados: a oclusão a laser e a oclusão da câmera. Elas estão ilustradas na Figura 28. A oclusão a laser ocorre quando partes da linha do laser são bloqueadas durante a inspeção, resultando em áreas do objeto que não são iluminadas e, portanto, não são capturadas na imagem. Já a oclusão

²³ Slide de treinamento fornecido para integradores SICK.

da câmera refere-se à perda de dados devido ao bloqueio da linha de laser no caminho para a câmera.

Figura 28 - Oclusão a laser e da câmera.



Fonte: Adaptado de SICK (2024)²⁴.

O uso de sensores de triangulação a laser são bem aplicáveis em ambientes de pouca luz, já que não necessitam de luz ambiente para funcionar. Mesmo no escuro, o sensor é capaz de obter uma imagem de alta resolução e com precisão de detalhes. Quanto menor for a distância dentre os perfis, melhor a qualidade e precisão da imagem, porém o tempo de processamento será maior. A faixa de medição desse tipo de sensor é relativamente curta, se comparada aos sensores de *Time of flight* (ToF), pois estes são adequados para aplicações com grande campo de visão.

Na tecnologia ToF, a câmera ilumina o alvo com um pulso de luz modulado no tempo, calcula o tempo que esse sinal luminoso leva do alvo para retornar a câmera e assim cria um mapa de profundidade para cada ponto de imagem. Nessa tecnologia as imagens são instantâneas e não precisam de movimento do objeto inspecionado. A tecnologia é capaz de fornecer alta resolução e precisão, mesmo em grandes distâncias, o que a torna ideal para diversas aplicações.

²⁴ Disponível em:

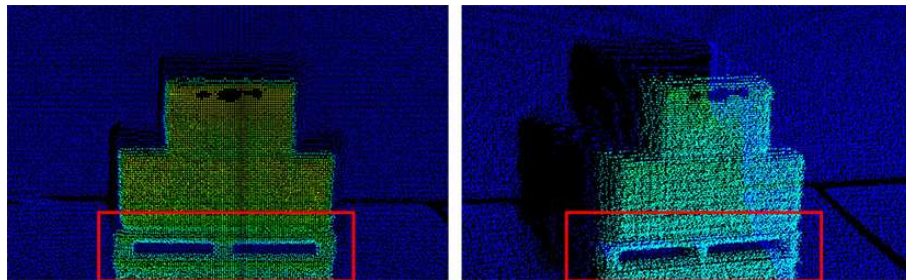
https://cdn.sick.com/media/docs/3/63/063/operating_instructions_ranger3_3d_vision_en_im0080063.pdf. Acesso em 18/09/2024.

Outro ponto positivo é a independência da luz ambiente. A luz infravermelha modulada utilizada pela tecnologia ToF permite a captura precisa de dados em condições de baixa luminosidade ou até mesmo na escuridão total, tornando a tecnologia altamente versátil e eficaz em diversos ambientes. A alta densidade de pixels proporciona uma detecção detalhada e precisa de objetos, facilitando a identificação e o mapeamento de pequenos elementos dentro de um ambiente. A ampla faixa de medição e a alta faixa dinâmica permitem a captura de detalhes em cenas com variação significativa de luminosidade e extensão.

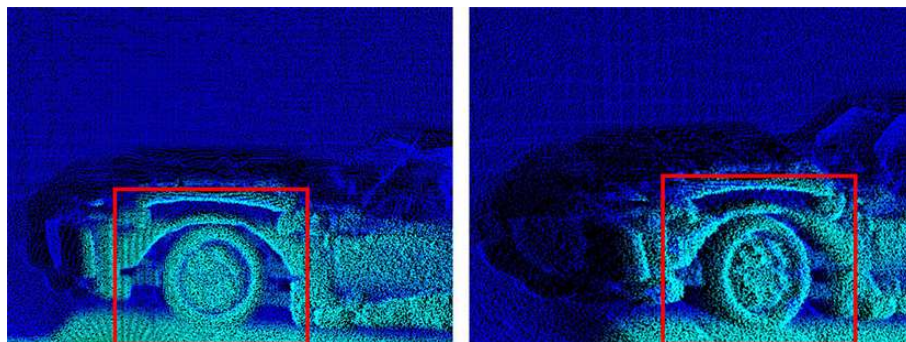
No entanto, a tecnologia ToF não é isenta de desafios. Embora seja eficaz em cenas estáticas e de baixa movimentação, pode enfrentar dificuldades em ambientes com movimento rápido ou contínuo. A alta taxa de quadros ajuda, mas a precisão pode ser comprometida em cenários com rápidas mudanças de posição ou movimento. Além disso, o desenvolvimento e a implementação de sistemas ToF podem ser onerosos, especialmente para configurações de alta resolução, tornando o custo do hardware e software uma barreira para alguns projetos menores.

A tecnologia *Time-of-Flight* é particularmente eficaz para aplicações onde a captura precisa de dados em 3D é crucial. Um exemplo notável é a medição detalhada em processos industriais, como a avaliação do comprimento e da posição de pneus (Figura 29b) em uma linha de produção e a identificação de bolsões de paletes (Figura 29a). A nuvem de pontos 3D criada, possui um padrão de cor que irá diferenciar objetos que estão mais perto do sensor, dos que estão mais longes, facilitando, assim, a identificação de “bolsões” ou do formato de objetos, até a olho nu, como ilustrados nos casos abaixo.

Figura 29 - Aplicações industriais da tecnologia ToF.



(a)



(b)

Fonte: PEPPERL+FUCHS (2023)²⁵.

Além disso, a tecnologia fornece dados de medição detalhados em vários eixos, um maior alcance e uma grande área de detecção do sensor ToF, que fazem dele a escolha ideal para essas aplicações. A capacidade de funcionar bem em ambientes estacionários, ou seja, situações estáticas, e fornecer dados precisos, independentemente das condições de iluminação, destaca a tecnologia ToF como uma solução robusta e confiável para a captura tridimensional.

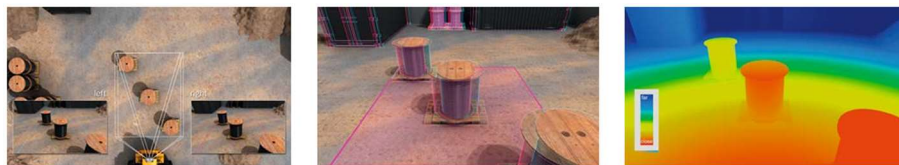
Já a tecnologia de imagem estéreo funciona de maneira análoga à visão humana, permitindo a captura instantânea de imagens tridimensionais sem a necessidade de movimento externo. Esse método combina duas imagens 2D obtidas de posições ligeiramente diferentes e utiliza a correlação entre essas imagens para criar uma representação de profundidade. Diferente de tecnologias como a triangulação a laser e a ToF, a tecnologia estérea não depende de uma fonte de luz dedicada, o que a torna adequada para diversas condições de iluminação, principalmente em ambientes externos.

²⁵ Disponível em: <https://blog.pepperl-fuchs.com/pt-br/2023/para-quais-aplicacoes-o-sensor-de-visao-smarrunner-explorer-3d-com-tecnologia-time-of-flight-e-adequado/>. Acesso em: 19/09/2024.

O processo da imagem estéreo envolve três etapas principais, exemplificadas na Figura 30. Primeiro, são capturadas duas imagens a partir de posições diferentes. Essas imagens são então comparadas para encontrar correlações, ou seja, correspondências entre os detalhes das duas imagens. Finalmente, essas correlações são usadas para criar uma imagem de profundidade, calculando a distância dos objetos com base na disparidade entre as imagens capturadas.

A tecnologia estéreo passiva, que se baseia no princípio da visão binocular humana, captura a cena usando duas câmeras com perspectivas ligeiramente distintas. A partir dessa captura, a distância dos objetos é calculada com base na disparidade observada entre as imagens. Esse método é particularmente eficaz em ambientes com grande campo de visão e em aplicações externas, onde a iluminação natural pode ser suficiente para fornecer o contraste necessário.

Figura 30 - Etapas da imagem estéreo.



Fonte Adaptado de SICK (2021)²⁶.

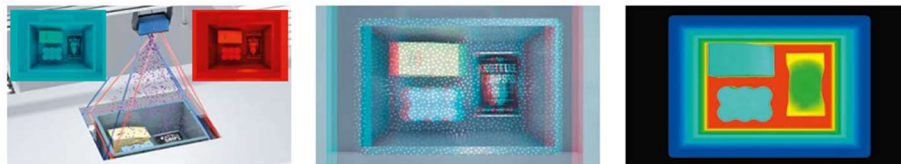
No entanto, a tecnologia estérea apresenta algumas limitações. Ela depende da luz ambiente para funcionar e, portanto, pode ser menos eficaz em condições de baixa iluminação ou em cenários com pouco contraste natural. Além disso, a resolução e a precisão da imagem gerada podem ser relativamente baixas em comparação com outras tecnologias, como ToF ou triangulação a laser. Para obter melhores resultados em ambientes com pouca luz ou baixa textura, pode ser necessário adicionar iluminação estruturada à cena, que utiliza padrões de luz projetados, como linhas ou pontos, para melhorar o contraste e a correlação entre as imagens.

Além da tecnologia estéreo passiva, existe a tecnologia estéreo ativa (Figura 31), que aprimora a técnica estereoscópica com a adição de uma fonte de luz infravermelha estruturada. Em vez de depender apenas da iluminação ambiente, as câmeras estéreo ativas projetam um padrão de luz estruturada sobre a cena, como um padrão de pontos. Esse padrão ajuda a superar os desafios de visão 3D em superfícies homogêneas e de baixo contraste, como um campo de

²⁶ Disponível em: https://cdn.sick.com/media/docs/2/92/392/whitepaper_visionary_en_im0098392.pdf. Acesso em: 18/09/2024.

neve. A luz estruturada facilita a identificação das disparidades entre as imagens de maneira mais confiável e precisa, mesmo em superfícies sem textura. Além disso, as câmeras estéreo ativas podem operar na completa escuridão devido à presença de sua própria fonte de luz. Embora possam ser afetadas por luz ambiente intensa, como os sistemas ToF, elas ainda conseguem deduzir disparidades com base no contraste residual no ambiente ao redor, se o cenário não for totalmente homogêneo. Comparadas às câmeras estéreo passivas, as câmeras estéreo ativas apresentam custos adicionais devido à iluminação ativa, mas oferecem uma excelente resolução de profundidade, especialmente em distâncias de trabalho curtas, como alguns metros.

Figura 31 - Etapas da tecnologia estéreo ativa.



Fonte: Adaptado de SICK (2021)²⁷.

Em resumo, a tecnologia de imagem estéreo é uma solução poderosa para capturar dados tridimensionais em cenas estáticas, especialmente quando se utiliza luz ambiente. Ela permite a obtenção de imagens de profundidade a partir de duas perspectivas, refletindo o princípio de percepção visual do olho humano. Apesar de suas limitações em termos de resolução e dependência de condições de iluminação, a tecnologia estérea é ideal para aplicações externas e situações que exigem um grande campo de visão.

No geral, as tecnologias 3D, incluindo estéreo ativa e passiva, triangulação a laser e *Time-of-Flight* (ToF), oferecem uma gama diversificada de soluções para a captura tridimensional de ambientes, cada uma com suas próprias vantagens e aplicações ideais. Cada uma dessas tecnologias traz características únicas que atendem a diferentes necessidades e condições, oferecendo opções versáteis para aplicações em modelagem 3D, automação e análise de ambientes.

3.3 SOFTWARE DOS SENSORES ÓPTICOS SICK

²⁷ Disponível em: https://cdn.sick.com/media/docs/2/92/392/whitepaper_visionary_en_im0098392.pdf. Acesso em: 18/09/2024.

De forma geral, todo sensor possui uma interface de configuração que facilita seu uso, permitindo ajustes precisos de parâmetros e, em muitos casos, a visualização direta dos resultados. Essa interface é fundamental para garantir que o sensor opere de maneira otimizada em diferentes cenários e aplicações. Ter uma ferramenta de configuração dedicada é essencial para o sucesso de um projeto, pois permite que ajustes e calibrações sejam feitos de forma eficiente, garantindo a precisão e a confiabilidade do sistema de visão.

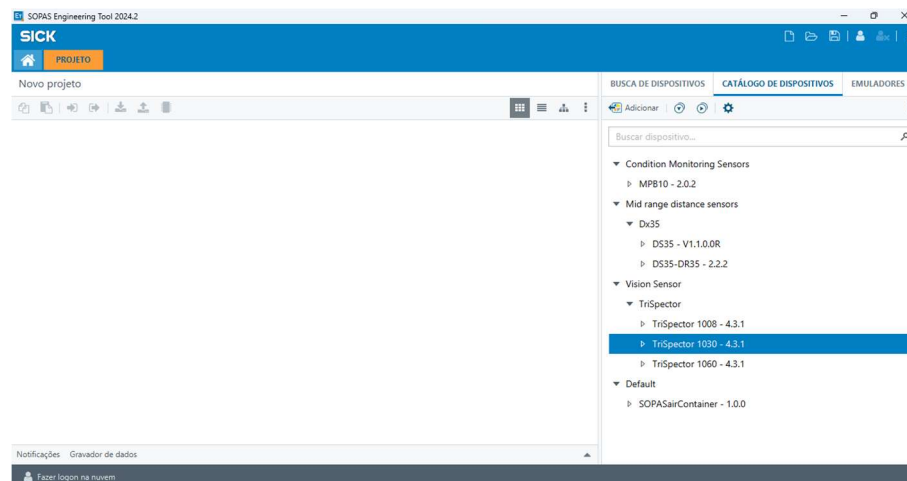
O software desempenha um papel crucial na configuração e otimização dos sensores. Neste capítulo, será apresentado o ambiente de trabalho e as funcionalidades do software livre *SOPAS Engineering Tool*, uma ferramenta essencial para a configuração de sensores de visão da *SICK Sensor Intelligence*. A escolha do SOPAS se justifica pela configuração e o desempenho dos sensores SICK que são fundamentais e pelo uso de um sensor da marca no estudo de caso que será visto adiante. Neste trabalho não foram utilizados outros softwares, pois o SOPAS é o software de propriedade da SICK para seus sensores. O que pode ocorrer é o acesso ao ambiente via navegador web, através do endereço IP do sensor, mas essa também é uma interface desenvolvida pela SICK.

O SOPAS está disponível nas versões de 64 e 32 bits e inclui a instalação do software em si, além dos SDDs (*SOPAS Device Drivers*), que podem ser baixados individualmente a partir do site da SICK, na página de referência de cada sensor. Além disso, o próprio SOPAS oferece a opção de baixar os drivers diretamente, seja do dispositivo conectado ou do repositório da SICK dentro da interface do software. Isso simplifica o processo, eliminando a necessidade de acessar o site manualmente; basta conhecer o nome da família do sensor e a versão a ser utilizada, no caso de uso do repositório.

Uma vez instalado, o SOPAS pode ser utilizado de duas maneiras: navegação online (com o dispositivo conectado) ou navegação offline (sem o dispositivo conectado). Nenhuma dessas opções exige acesso à Internet. Na navegação offline, o uso é possível graças aos SDDs dos dispositivos disponíveis na aba de catálogos de dispositivos, ilustrado na Figura 32. Essa opção permite criar um projeto e acessar a interface específica de um sensor, mas sem a capacidade de alterar configurações. Essa forma é útil para apresentação da interface e para explorar quais parâmetros podem ser configurados ou quais dados o sensor pode retornar. É uma boa alternativa para entender como a interface funciona e planejar as configurações necessárias, mesmo na ausência física dos sensores. Além disso, para casos em que o sensor

não está disponível, alguns dispositivos da SICK, incluindo certas referências de sensores de visão, possuem emuladores. Esses emuladores fornecem casos reais previamente armazenados para uso de terceiros, permitindo que se abra um projeto salvo e realize configurações de forma offline, o que é útil para adquirir conhecimento e testar a interface em um ambiente simulado. Além disso, mesmo em um ambiente simulado, se durante um teste você não pôde configurar os resultados enquanto a coleta estava sendo realizada, é possível salvar as imagens e abri-las posteriormente (com ou sem o dispositivo conectado) dentro do ambiente simulado. Isso é vantajoso em situações onde o comissionamento na linha de produção não é viável, quando as imagens foram coletadas por outra pessoa e o trabalho é em equipe, permitindo que outro membro configure os resultados a partir das amostras, ou ainda quando se deseja revisar os resultados obtidos para validar se a ferramenta está operando corretamente.

Figura 32 – Tela inicial do SOPAS *Engineering Tool* e aba de catálogo de dispositivos.



Fonte: elaborado pela própria autora.

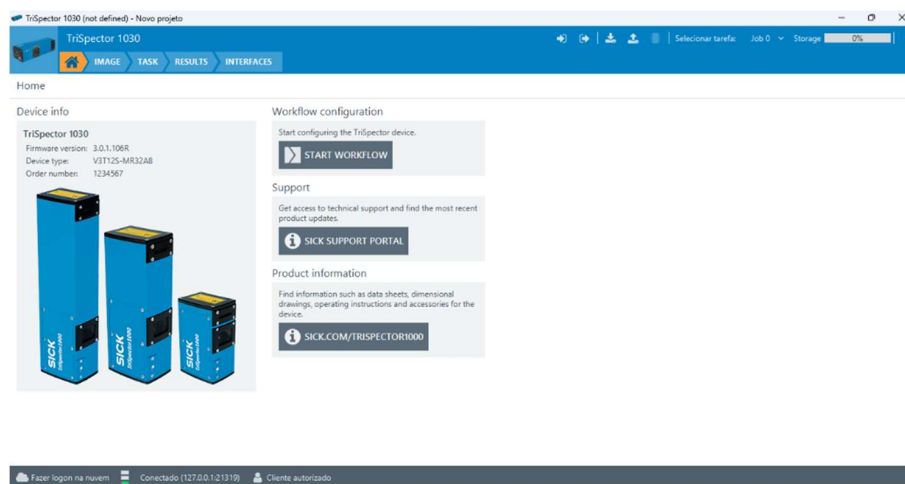
As principais diferenças ao usar o emulador são: as imagens permanecem inalteradas, independentemente das mudanças feitas na etapa do fluxo de trabalho de imagem; os tempos de processamento podem diferir, pois o emulador depende do hardware do PC em vez do hardware do sensor; além disso, as conexões de entrada/saída digitais ficam desativadas no ambiente emulado.

Como o Capítulo 4 abordará um caso de estudo, a apresentação das informações sobre o software será feita por meio da interface do dispositivo que será utilizado nesse caso. No contexto da tecnologia 3D, temos o exemplo da interface do dispositivo TriSpector1030. Ao abrir o emulador, podemos explorar como a interface opera, o que é crucial para os próximos

passos de aplicação. Essa interface é dividida em cinco abas: *Home*, *Task*, *Results*, *Image* e *Interfaces*.

Na aba *Home*, mostrada na Figura 33, encontramos as informações básicas do equipamento, como a versão do firmware, o modelo do produto e o código de referência da SICK. Além disso, esta aba oferece um botão para acessar diretamente a aba de configuração, um portal de suporte ao fabricante e um link para acessar mais informações sobre o produto no site da SICK.

Figura 33 – Aba *Home* do SOPAS *Engineering Tool*.

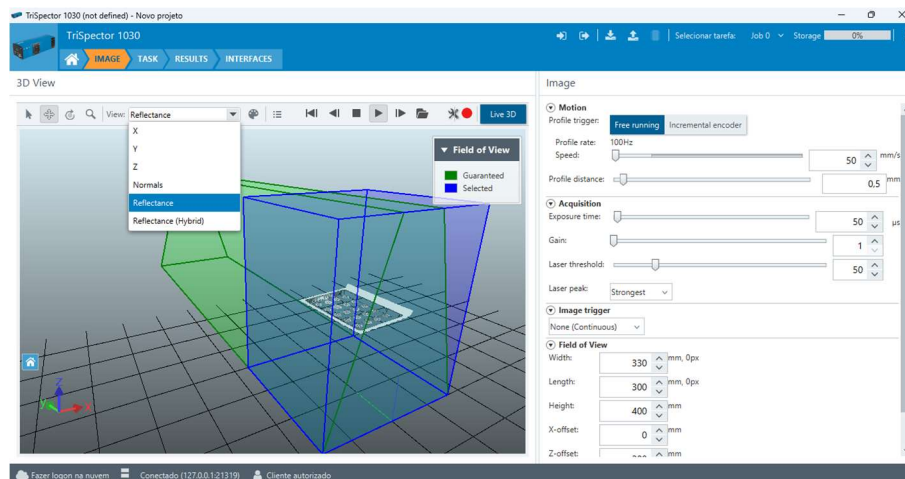


Fonte: elaborado pela própria autora.

A aba *Image* é o primeiro ponto de interação com o ambiente 3D do TriSpector1030. Nesta seção, ilustrada na Figura 34, a visualização do campo de visão (FOV) é apresentada em dois aspectos: "Garantido" e "Selecioneado". A área garantida refere-se ao campo de visão predefinido pela fábrica para o modelo selecionado, enquanto a área selecionada representa a região de interesse definida pelo usuário para a aquisição de imagem. Essas áreas podem ser ajustadas de duas maneiras: movendo as arestas da imagem 3D diretamente na interface ou inserindo as dimensões desejadas na aba lateral. A aba *Image* também conta com botões de navegação que são exclusivos do emulador, permitindo o controle do ambiente simulado. Aqui, é possível carregar imagens salvas de outros projetos, navegar entre as imagens de uma pasta e configurar suas propriedades. Além disso, o modo de visualização pode ser alterado conforme a aplicação, ajustando o aspecto da imagem com diferentes esquemas de cores para melhor atender às necessidades da análise, da mesma forma que o *trigger* para captura de imagem.

As duas seções mais importantes dessa aba são *Motion* e *Acquisition*. A tecnologia do TriSpector1030 depende do movimento do produto a ser inspecionado ao passar pela linha laser do sensor. Na seção *Motion*, é possível informar ao sensor a velocidade com que o objeto se move e a distância entre os perfis, parâmetros que afetam diretamente a resolução da imagem, conforme discutido na Seção 3.2. Além disso, nessa seção, a velocidade do objeto pode ser captada automaticamente por meio de informações de um encoder conectado à câmera, proporcionando maior precisão no controle do processo. Na seção *Acquisition*, são ajustados os parâmetros relativos à qualidade da imagem, como a exposição, ganho e intensidade do laser. Esses ajustes são fundamentais para controlar a quantidade de luz que atinge o sensor, reduzindo ruídos e melhorando a clareza da imagem capturada. Um controle cuidadoso desses parâmetros garante uma imagem de alta qualidade, essencial para uma análise precisa e confiável.

Figura 34 - Aba *image* do SOPAS Engineering Tool.



Fonte: elaborado pela própria autora.

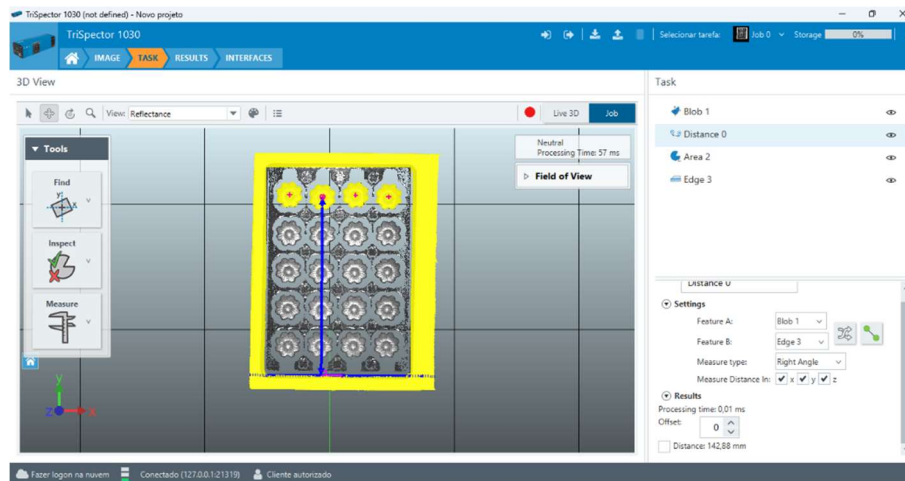
Após ajustar a aquisição de imagem e garantir uma boa imagem de referência (como um caso de produto sem falhas, ou seja, um "caso ok" do cliente), a aba *Task*, mostrada na Figura 35, oferece um conjunto de ferramentas que podem ser adicionadas ao *job* (pasta de trabalho). Nesta aba, é possível inserir ferramentas de análise conforme a necessidade de medição ou inspeção da aplicação.

As ferramentas estão organizadas em três categorias: *Find*, *Inspect* e *Measure*. A categoria *Find* inclui ferramentas para localizar linhas, planos, pontos, formas ou peças com volume específico. Já a categoria *Inspect* oferece ferramentas de inspeção de áreas, que

retornam valores encontrados e permitem limitar a busca a uma região específica. Por fim, a categoria *Measure* possui ferramentas para medir distâncias e ângulos com precisão.

Para garantir que essas ferramentas sejam configuradas corretamente, é aconselhável coletar um grande número de amostras que representem os diversos cenários possíveis do produto a ser inspecionado. Dessa forma, é possível listar o que deve ser considerado bom ou ruim, delimitando com precisão o intervalo de detecção. Essa abordagem ajuda a evitar falsos rejeitos, em que peças boas são indevidamente classificadas como defeituosas, assegurando que a inspeção seja eficiente e confiável.

Figura 35 - Aba *Task* do SOPAS *Engineering Tool*.



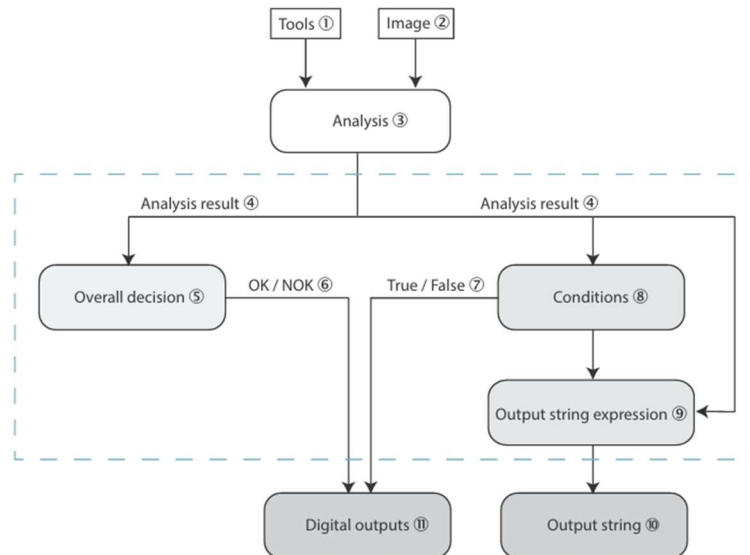
Fonte: elaborado pela própria autora.

Essas ferramentas já incorporadas no software estão diretamente relacionadas às técnicas de análise discutidas na Seção 2.5. A criação de uma ferramenta como as oferecidas no SOPAS exige programação e desenvolvimento em um ambiente específico, onde princípios fundamentais de processamento de imagem são aplicados. Durante o desenvolvimento, são utilizados conceitos como filtros, operações básicas, detecção de padrões, redução e remoção de ruídos para garantir que a ferramenta possa identificar, medir e inspecionar características com precisão. Essas técnicas são essenciais para transformar dados brutos em informações úteis e confiáveis, garantindo que as ferramentas de análise, como aquelas de detecção de linhas, planos, formas, e medidas de distância e ângulo, sejam capazes de operar eficientemente nas mais diversas condições encontradas na linha de produção.

A aba *Results* serve para processar e interpretar os resultados da análise realizada pelo sensor. A partir dos dados coletados e das ferramentas configuradas na etapa de análise, esta

guia permite definir as condições e critérios que determinam se um produto é aceito (OK) ou rejeitado (NOK). O fluxograma ilustrado na Figura 36 evidencia as etapas de trabalho.

Figura 36 - Visão geral do gerenciamento de resultados.



Fonte: SICK (2024)²⁸.

Primeiramente, a análise das imagens ocorre utilizando as ferramentas definidas anteriormente. Com base nessa análise, um resultado é gerado, que é então avaliado na etapa "*Overall decision*". Aqui, o software toma uma decisão global, categorizando o objeto ou a peça como "OK" (aceitável) ou "NOK" (não aceitável). Essa decisão é crucial para o controle de qualidade na linha de produção, assegurando que apenas produtos conformes avancem no processo. Aqui é possível configurar condições específicas que a análise deve cumprir. A partir dessas condições, o sistema pode gerar uma saída binária (*True/False*) que controla saídas digitais do sensor. Essas saídas digitais podem ser conectadas a outros sistemas de automação, permitindo a integração com processos como rejeição automática de peças defeituosas ou sinalização para operadores. Além de fornecer saídas digitais, a guia permite a configuração de expressões de saída, que podem ser personalizadas para transmitir informações específicas. Isso é feito através de "*Output string expression*", que define quais dados serão enviados como saída, sejam eles relativos a medições, resultados de condições ou estados do sensor.

²⁸ Disponível em:

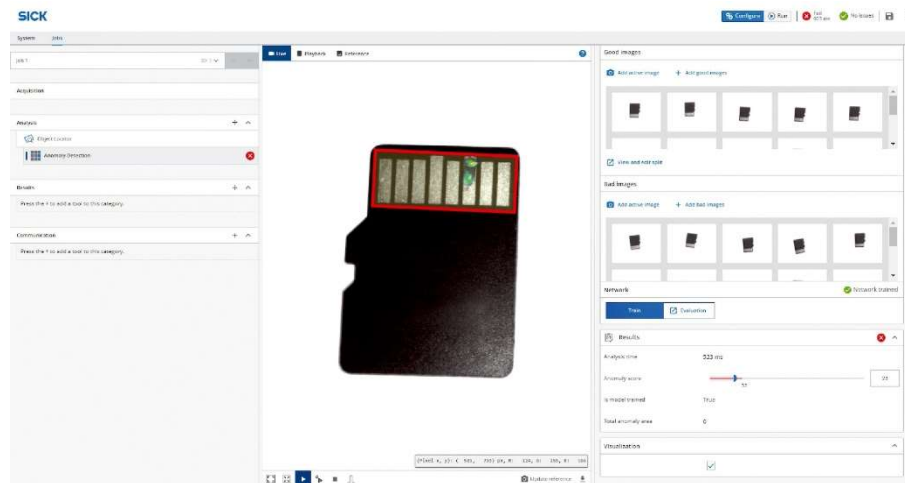
https://cdn.sick.com/media/docs/7/77/477/operating_instructions_trispector1000_3d_vision_de_im0085477.pdf. Acesso em: 19/09/2024.

Em resumo, a aba *Results* funciona como o cérebro do sistema, interpretando os resultados da análise, aplicando condições e regras definidas pelo usuário, e fornecendo saídas que podem ser utilizadas para controle de processos, comunicação com outros sistemas e tomada de decisões automáticas. Ela é fundamental para transformar dados brutos capturados pelo sensor em ações e informações práticas, garantindo eficiência e precisão nas operações industriais.

A aba *Interfaces* é responsável por configurar as entradas e saídas digitais do sensor, que podem ser usadas para comunicação com outros dispositivos e sistemas. Essa aba permite definir como as interfaces digitais de entrada/saída (I/O) do sensor irão se comportar durante a operação. As I/Os configuráveis podem ser usadas tanto para receber sinais de outros dispositivos quanto para enviar sinais a outros sistemas, facilitando a integração do sensor com processos automatizados. O que é essencial para configurar e personalizar a comunicação do sensor com outros componentes da linha de produção, como controladores lógicos programáveis (CLPs), atuadores ou sistemas de alerta. Ao permitir essa integração, a aba facilita a criação de fluxos de trabalho mais eficientes e automatizados, assegurando que os sensores possam interagir de forma inteligente com o ambiente industrial em que estão inseridos.

A SICK oferece diversas soluções de software para configurar e gerenciar dispositivos industriais, entre eles a interface web browser acessível via IP do dispositivo, que pode ser utilizada em outras aplicações relacionadas à tecnologia 2D e 3D, e ilustrada na Figura 37. Essa interface é semelhante às abas do SOPAS, detalhadas anteriormente, permitindo o controle de aquisição de imagem, configuração de ferramentas (*jobs*), expressões, resultados e interfaces de comunicação.

Figura 37 - Interface web browser da SICK *Sensor Intelligence* acessível via IP do dispositivo.



Fonte: SICK (2024)²⁹.

Além disso, para algumas aplicações, poderá ser utilizado um hardware que permite a instalação de ferramentas adicionais via SICK *AppManager*, uma plataforma integrada ao SICK *AppSpace*. Esse ambiente permite o gerenciamento de aplicações personalizadas (*SensorApps*), que podem ser baixadas do SICK *AppPool*, um espaço seguro para desenvolvedores, permitindo a expansão de funcionalidades dos sensores.

O SICK *AppManager* oferece suporte para atualizações de firmware e a administração de backups dos dispositivos, possibilitando o uso flexível de aplicativos conforme a necessidade da indústria, como a instalação de filtros e algoritmos de processamento adicionais. O *AppPool*, por sua vez, é acessível diretamente via web e oferece uma gama de soluções e licenças para personalização de sensores e sistemas industriais.

4 ESTUDO DE CASO: INSPEÇÃO 3D DE CAIXA COMPLETA

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E OBJETIVO

O estudo de caso, realizado pela autora deste trabalho, se insere em um projeto de melhoria para a área de encaixotamento dos pacotes de produtos alimentícios, motivado por problemas recorrentes relacionados à quantidade de itens nas caixas empacotadas. O cenário inicial apresentava dois tipos de falhas principais: caixas contendo pacotes a mais, o que resultava em custos desnecessários, e caixas com pacotes a menos, gerando insatisfação nos

²⁹ Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/catalog/servicos-digitais-e-software/sick-sensorapps/sick-nova/c/g576400?tab=overview>. Acesso em: 19/09/2024.

clientes que recebiam os insumos de maneira incompleta. A empresa buscava uma solução que garantisse a conformidade com os padrões estabelecidos de encaixotamento, que previa a formação de 50 pacotes organizados em cinco linhas de 10 pacotes cada, todos enfileirados verticalmente, como visto na Figura 38. O principal objetivo do projeto foi desenvolver um sistema de inspeção 3D capaz de identificar caixas que estivessem dentro dos critérios de aprovação, assegurando o atendimento às exigências internas e a manutenção do padrão de qualidade.

Figura 38 – Padrão de conformidade.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Os objetivos específicos da aplicação incluíam aprovar a formação exata de 50 pacotes, mesmo com até cinco pacotes virados aleatoriamente (Figura 39), aprovar formações de 50 pacotes com até cinco pacotes virados consecutivamente, reprovar caixas que apresentassem menos de 50 pacotes em diferentes configurações (Figura 40), reprovar caixas com pacotes desorganizados e também reprovar caixas que contivessem mais de 50 pacotes. Essas diretrizes visavam garantir que cada caixa enviada aos clientes estivesse em conformidade tanto com o número de pacotes quanto com a organização interna, assegurando a eficiência operacional e a satisfação do cliente final.

Figura 39 - Referência de conformidade com pacotes virados.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 40 - Referência de não conformidade.



Fonte: elaborado pela própria autora.

O estudo também contemplou o cenário de caixas incompletas, que poderiam apresentar dois subcasos distintos. O primeiro, mais simples de identificar, ocorre quando há a falta de um pacote, mas os demais itens permanecem devidamente alinhados. O segundo subcaso, mais

complexo, surge quando a ausência de um pacote resulta na virada do item subsequente, fazendo com que o pacote vire e acabe ocupando o espaço de dois pacotes. Essa situação torna a detecção mais desafiadora, pois, visualmente, pode parecer que a caixa está completa, quando na verdade está faltando um item. O sistema de inspeção 3D foi projetado para lidar com ambos os subcasos, assegurando que caixas incompletas, independentemente da disposição dos pacotes, fossem corretamente identificadas e reprovadas, garantindo que nenhuma caixa fosse enviada com menos pacotes do que o padrão estabelecido.

4.2 METODOLOGIA

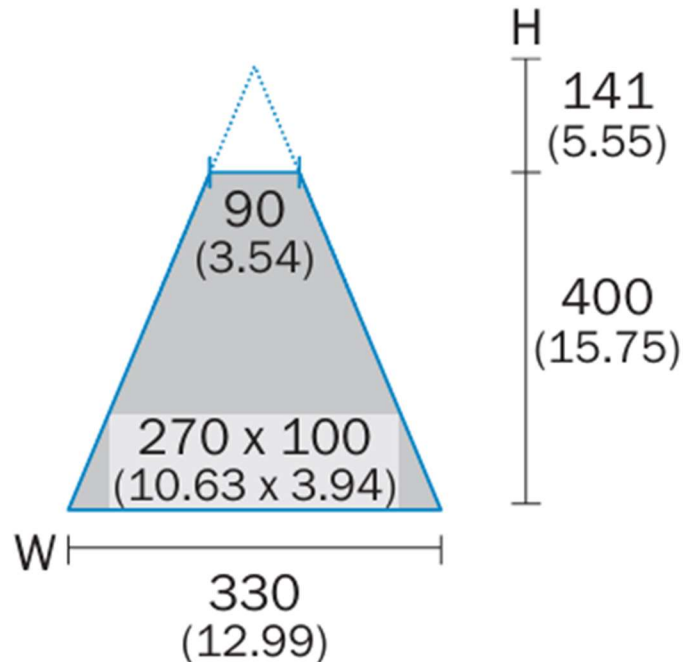
A metodologia adotada seguiu uma abordagem estruturada, baseada na análise das necessidades do projeto, bem como dos objetivos previamente estabelecidos para solucionar os problemas no processo de encaixotamento. Inicialmente, foi identificada a ocorrência de diferentes cenários nas caixas, sendo um dos principais desafios a detecção de pacotes faltantes. Um dos casos mais críticos era a falta de um pacote, o que fazia com que o pacote subsequente caísse sobre o da frente, dando a falsa impressão de que a caixa estava completa. Um sistema de inspeção 2D seria incapaz de identificar corretamente esses cenários, já que ele não poderia diferenciar a profundidade ou altura dos objetos em relação ao plano analisado, o que é essencial para detectar pacotes virados ou sobrepostos.

Com base nessa limitação, optou-se pela utilização de uma tecnologia de inspeção 3D, que permitiria a análise em profundidade e a detecção de pacotes virados ou sobrepostos. Além disso, durante a análise das condições da linha de produção, foi observado que diferentes receitas de produtos, com cores variadas, passavam pela mesma esteira. Isso representava um novo desafio, pois as variações de cor poderiam impactar a eficácia de sistemas convencionais. Para contornar esse problema, foi decidido utilizar uma tecnologia de triangulação a laser, que não seria afetada pelas mudanças de cor dos produtos e garantiria uma inspeção precisa independente das variações cromáticas.

Com essas necessidades em mente, escolheu-se a família de equipamentos TriSpector1000, uma linha de sensores de visão 3D que utiliza triangulação a laser para capturar com precisão a forma e a altura dos objetos. Após uma análise do tamanho das caixas e do campo de visão necessário para realizar a inspeção adequada, o modelo TriSpector 1030, com o campo de visão ilustrado na Figura 41, foi selecionado como o mais adequado. Este modelo foi escolhido com base em diversos fatores, incluindo o campo de visão necessário para

inspecionar a caixa completa, o local de instalação na máquina, a altura de montagem do sensor e a largura da esteira transportadora.

Figura 41 - Campo de visão do modelo TriSpector1030 da SICK.



Fonte: SICK (2024)³⁰.

Uma vez definido o modelo e realizada a configuração inicial, foi conduzido um teste em laboratório para certificar a eficácia do sistema de inspeção 3D. Esse teste teve dois objetivos principais: o primeiro foi garantir que a análise de altura fosse precisa o suficiente para identificar pacotes virados, sobrepostos ou faltantes; o segundo foi verificar se o campo de visão do modelo TriSpector 1030 era suficiente para cobrir toda a área da caixa durante o processo de inspeção. Os testes laboratoriais validaram a escolha do equipamento e da tecnologia, assegurando que o sistema seria capaz de identificar corretamente os diferentes cenários de encaixotamento, proporcionando resultados consistentes para a aplicação na linha de produção.

4.2.1 Lógica de Teste de Laboratório

Para uma descrição técnica mais detalhada das configurações e parâmetros do teste, ele foi estruturado em duas categorias: condições de conformidade (OK) e não conformidade

³⁰ Disponível em:

https://cdn.sick.com/media/docs/7/77/477/operating_instructions_trispector1000_3d_vision_de_im0085477.pdf. Acesso em: 19/09/2024.

(NOK) para uma linha de produtos dentro da caixa. Posteriormente, no teste na linha de produção, foi realizada uma análise completa da caixa em sua totalidade, englobando todos os cenários possíveis.

O processo de inspeção inicia-se com a coleta de uma imagem de referência, que serve como base para a área de trabalho. Nesta etapa, diversos parâmetros de imagem são configurados para garantir a precisão e a consistência do processo de inspeção (Figura 42). Esses parâmetros incluem ajustes relacionados ao movimento do encoder, que está conectado à câmera para garantir a sincronização adequada entre o movimento da esteira e a captura das imagens. Além disso, são configurados aspectos como a aquisição e a construção da imagem em 3D, o método de acionamento (trigger) utilizado para iniciar a captura no momento correto, e o campo de visão (FOV) necessário para abranger toda a área da caixa. Os parâmetros de análise e captura são progressivamente ajustados com base em diversas coletas de imagens, sendo refinados a cada nova captura de acordo com as características específicas que se deseja observar e destacar. Esse processo contínuo de ajustes garante que, a cada coleta, as imagens resultantes estejam mais alinhadas com os requisitos de visualização, levando em conta variáveis como iluminação, contraste, tempo de exposição e foco, conforme as necessidades da aplicação.

Figura 42 – Parâmetros de aquisição de imagem.

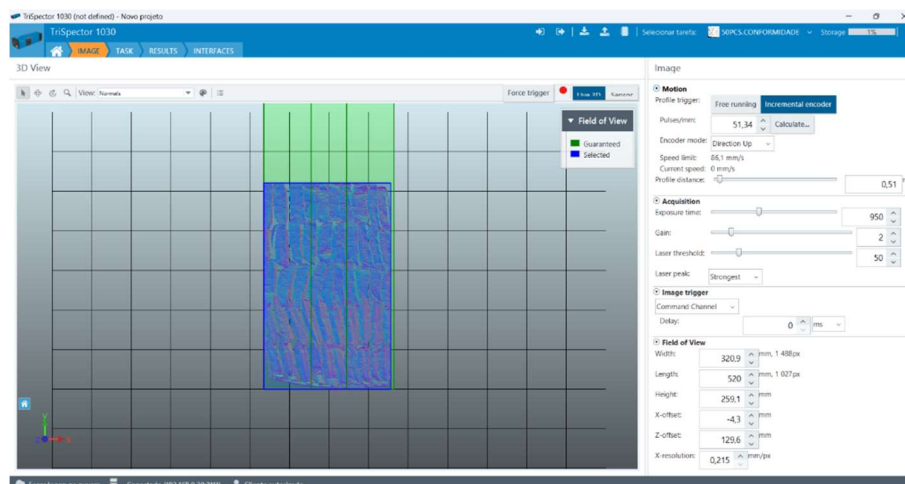
The screenshot displays the 'Image' configuration window, organized into several sections:

- Motion:**
 - Profile trigger: Free running (selected), Incremental encoder
 - Pulses/mm: 51,34 (with a 'Calculate...' button)
 - Encoder mode: Direction Up
 - Speed limit: 86,1 mm/s
 - Current speed: 0 mm/s
 - Profile distance: 0,51 mm
- Acquisition:**
 - Exposure time: 950 μs
 - Gain: 2
 - Laser threshold: 50
 - Laser peak: Strongest
- Image trigger:**
 - Command Channel: (dropdown)
 - Delay: 0 ms
- Field of View:**
 - Width: 320,9 mm, 1 488px
 - Length: 520 mm, 1 027px
 - Height: 259,1 mm
 - X-offset: -4,3 mm
 - Z-offset: 129,6 mm
 - X-resolution: 0,215 mm/px

Fonte: elaborado pela própria autora.

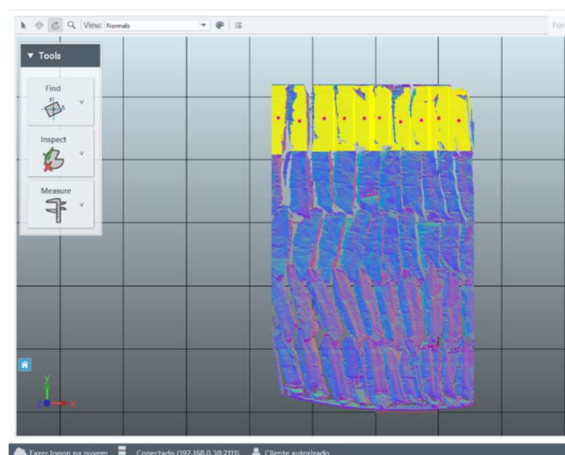
A imagem de referência (Figura 43) foi utilizada para adicionar as ferramentas de análise (Figura 44), bem como as condições e resultados. Foram configurados 10 *blobs*, um para cada pacote. A ferramenta *Blob* localiza grupos de pontos dentro de um intervalo de altura e tamanho de grupo definidos. Isso torna possível medir volume, área, ângulo e caixa delimitadora. Os pacotes posicionados nos cantos tiveram uma área de detecção maior, devido à limitação do campo de visão da câmera utilizada nos testes, que era ligeiramente menor que a área da caixa, com a altura de instalação em bancada.

Figura 43 - Imagem de referência para adicionar as ferramentas de análise.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 44 – Uso da ferramenta Blob na configuração das ferramentas de análises.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Para aprovar a formação correta de pacotes: a configuração da ferramenta *blob* permite que se coloque um range de aprovação por área. Nesse teste, após várias imagens coletadas, percebe-se um padrão de medição para os pacotes de macarrão de uma área que varia entre 2000 e 4000 mm². A variação se dá por embalagem amassada, espremida ou com folga de

espaço, dependendo da disposição dos itens na caixa. Os parâmetros adotados podem ser visualizados na Figura 45.

Figura 45 - Parâmetros para aprovar formação correta de pacotes.

Task

- PC1
- PC2
- PC3
- PC4

Name: PC5

Settings

Region shape: Rectangle

Height range: 20 mm to 380 mm

Blob area: 2 000 mm² to 4 000 mm²

Ignore data: -

Blob volume: -

Advanced

Masks

Results

Processing time: 34,03 ms

Blobs: 1

Blob index	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Area (m...
0	-17.93	465.9	29.96	3310.95

Fonte: elaborado pela própria autora.

Com essa configuração é possível aprovar a formação da linha de produtos com 10 pacotes (Figura 46). Essa medição de conformidade pode ser vista no canto direito da tela, individualmente para cada ferramenta aplicada, e ao lado da imagem, o resultado geral (se todas as ferramentas foram OK).

Figura 46 - Aprovação da linha de produtos com 10 pacotes.

TriInspector 1030

3D View

Tools: Find, Inspect, Measure

Task List:

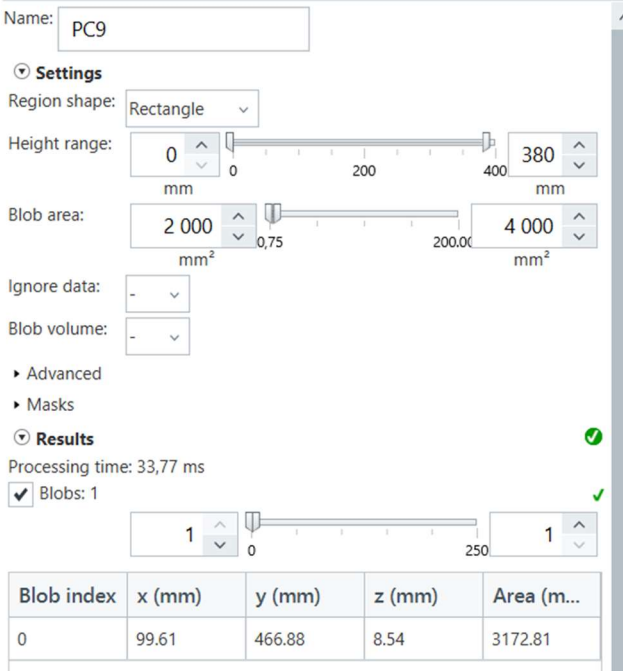
- PC1
- PC2
- PC3
- PC4
- PC5
- PC6
- PC7
- PC8
- PC9
- PC10

Multiple Tools Selected

Fonte: elaborado pela própria autora.

Para o estudo de aprovação da formação com pacotes virados: a ferramenta *Blob* traz informações de posição nas três dimensões garantindo a diferença no campo de visão de pacotes em pé ou deitados, a partir da altura. Dito isso, refinando o *blob* para trabalhar com o range de altura com mínimo em 0 mm (Figura 47), a condição aprova o pacote virado (Figura 48).

Figura 47 - Refinamento da ferramenta *blob* com limitação de altura.



Name: PC9

Settings

Region shape: Rectangle

Height range: 0 mm to 380 mm

Blob area: 2 000 mm² to 4 000 mm²

Ignore data: -

Blob volume: -

Advanced

Masks

Results

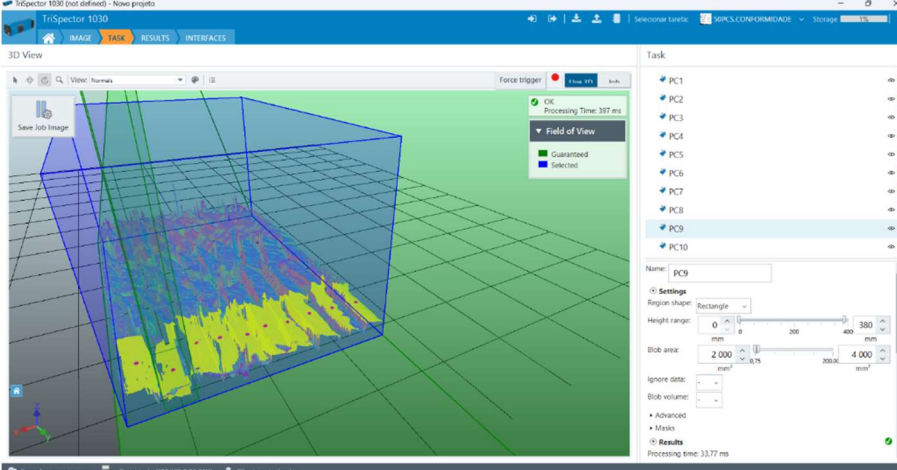
Processing time: 33,77 ms

Blobs: 1

Blob index	x (mm)	y (mm)	z (mm)	Area (m...
0	99.61	466.88	8.54	3172.81

Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 48 - Validação do range de altura para pacote virado.



TriSpector 1030

3D View

Task

- PC1
- PC2
- PC3
- PC4
- PC5
- PC6
- PC7
- PC8
- PC9
- PC10

Name: PC9

Settings

Region shape: Rectangle

Height range: 0 mm to 380 mm

Blob area: 2 000 mm² to 4 000 mm²

Ignore data: -

Blob volume: -

Advanced

Masks

Results

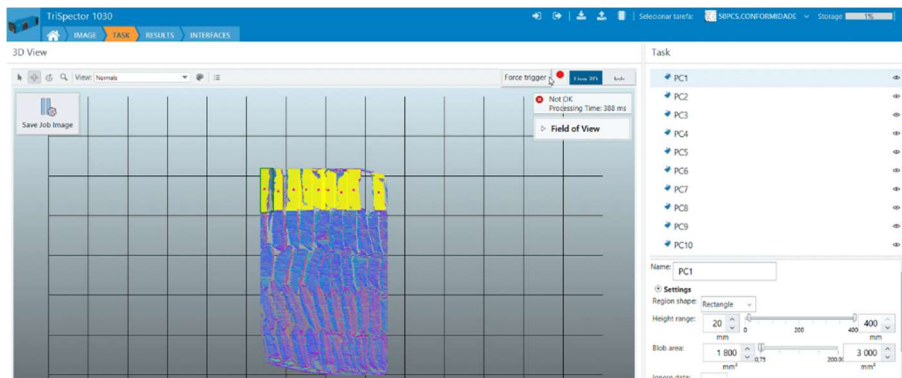
Processing time: 33,77 ms

Fonte: elaborado pela própria autora.

Para reprovar a formação com pacote(s) ausente(s) utiliza-se as mesmas configurações anteriores, a ausência de pacote(s) (Figura 49) também é detectada como NOK. Pode-se notar

a medição geral ao lado da imagem ou no canto direito da tela, que individualmente sinaliza qual a posição do pacote que está ausente.

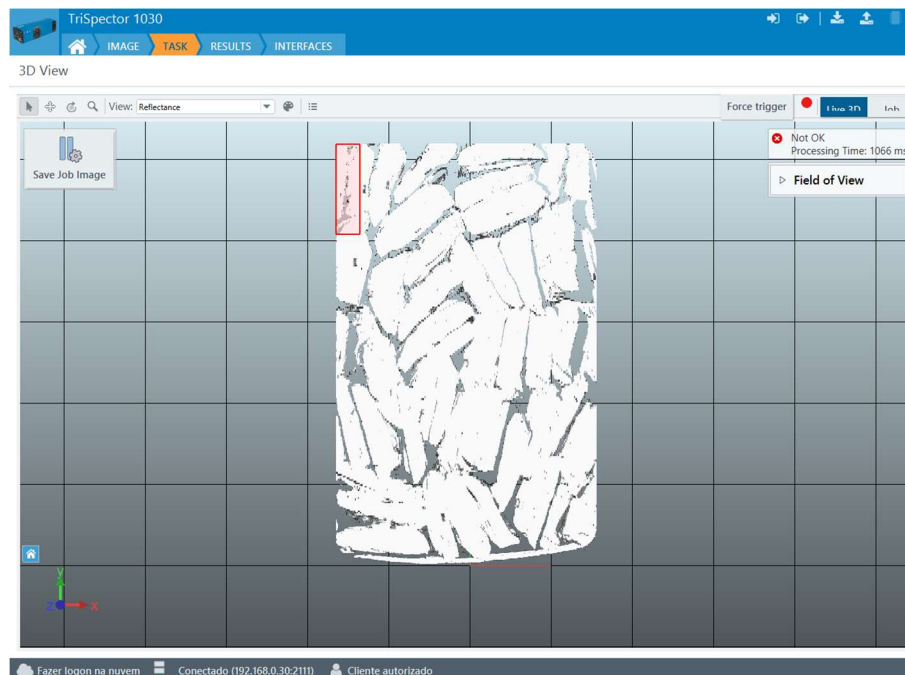
Figura 49 - Identificação NOK para ausência de pacote.



Fonte: elaborado pela própria autora.

O teste de reprovação da caixa com pacotes bagunçados, visto na Figura 50, pode ser reprovado pelo posicionamento XY do pacote, pela altura Z, ou pelos espaços vazios que ficam pelos produtos estarem desalinhados. Mas também pode ser refinado com outras ferramentas de medidas de distância e ângulos.

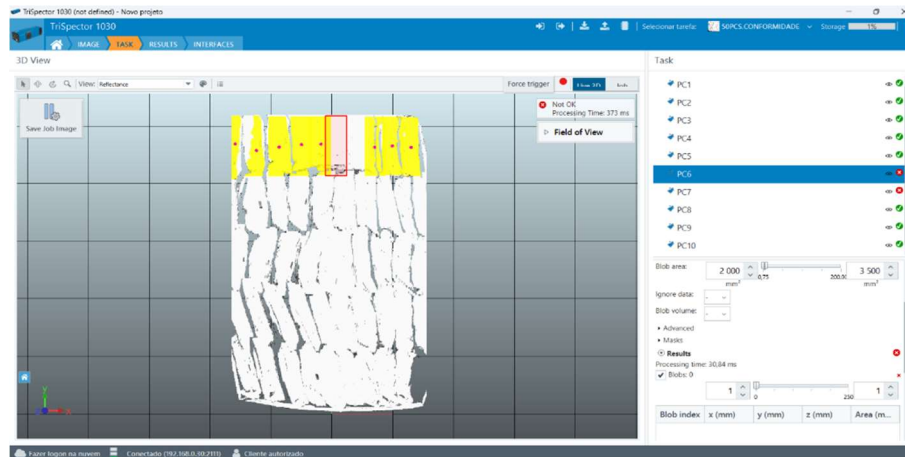
Figura 50 - Teste de reprovação para pacotes desorganizados na caixa.



Fonte: elaborado pela própria autora.

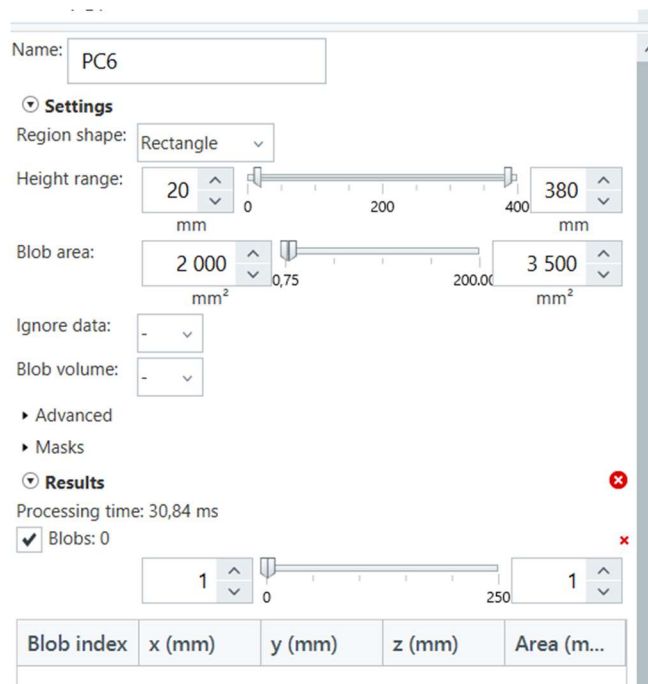
Após testes de aquisição e análise de imagem, é possível ver que a configuração da Figura 51, para indicar formação com mais de 50 pacotes, sinaliza um aumento considerável de área. Portanto, pode-se restringir mais o range máximo de área aceito por *blob*, antes de 4000mm², agora de 3500mm², como exemplificado na Figura 52. Dessa forma, continuamos a detectar os pacotes e reprovamos itens a mais.

Figura 51 - Reprovação de pacote a mais e visualização de valor do parâmetro de área.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 52 - Redução do parâmetro de área dentro do blob.



Fonte: elaborado pela própria autora.

4.2.2 Resultado do Teste em Laboratório

Haja vista o teste inicial em laboratório, tem-se algumas considerações:

- As ferramentas disponíveis no sensor apresentado comportam as configurações de amostras e podem ser melhoradas com outras funções, que deverão ser refinadas com o teste na linha de produção;
- Com a TriSpector1000, sensor de visão 3D, é possível distinguir pacotes deitados e em pé;
- Pode-se detectar itens ausentes;
- É possível visualizar itens a mais através da condição máxima de área (há a opção de atuação também por volume);
- A caixa desorganizada será detectada como NOK pela posição incorreta dos itens no ambiente XYZ;
- Para totalizar os 50 pacotes (que ultrapassam o limite de 50 ferramentas no mesmo trabalho) deverá utilizar a opção de máscaras e outras configurações disponíveis no sensor;
- Para melhorar a imagem, devido o tamanho da caixa, se propõe o uso da TriSpector de alcance superior a utilizada em teste.

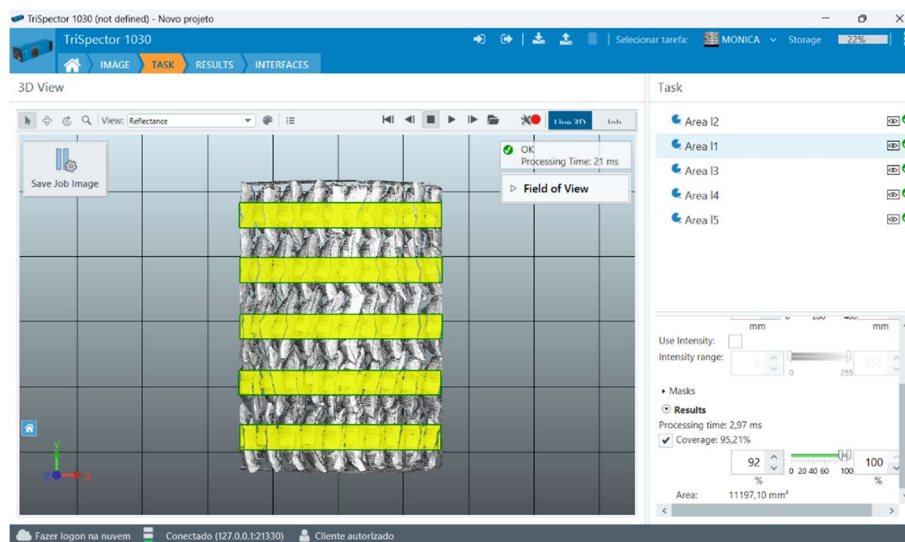
4.3 TESTE EM LINHA DE PRODUÇÃO

Após a validação da tecnologia em ambiente de laboratório, foi realizado o teste na linha de produção, abrangendo o uso real do sistema. Foram testadas quatro cores de produto (laranja, utilizada no laboratório, além de vermelho, roxo e azul escuro) para verificar o funcionamento da triangulação a laser em diferentes condições de cores, provando não haver interferência. A coleta de dados de amostragem foi realizada com o produto da cor vermelha. A metodologia aplicada durante os cinco dias de testes incluiu várias etapas: no primeiro dia, foi feita a instalação física do equipamento na máquina, incluindo testes iniciais para definir o campo de visão, altura de instalação do dispositivo e a instalação do sensor de trigger. Nos dois dias seguintes, foram avaliadas as variações nas amostras e ferramentas utilizadas, definindo seus respectivos intervalos de trabalho, seguindo a mesma lógica de configuração estabelecida

durante os testes de laboratório. A velocidade da linha de produção não representou um problema significativo para a aplicação.

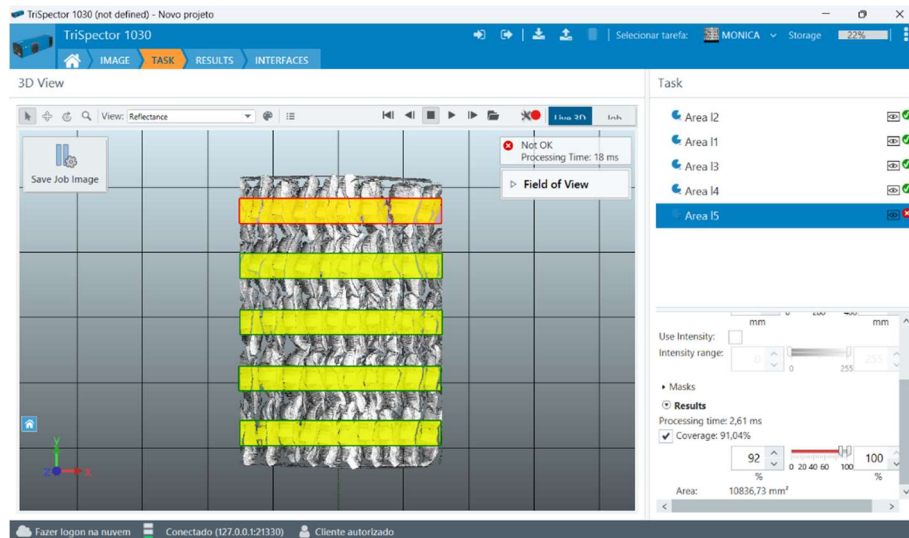
Após esses dois dias, foi selecionada a ferramenta final que se mostrou mais adequada às situações observadas, sendo essa a ferramenta de área. Foram configuradas cinco dessas ferramentas, uma para cada linha de pacotes, com intervalos de altura e limitações de área estabelecidos para reprovar caixas com pacotes faltando ou em excesso. O objetivo da ferramenta era evitar a confusão entre um pacote "tombado" devido à ausência de outro com dois pacotes, além de garantir que caixas com pacotes na horizontal (deitados), mas com todos os itens presentes, não fossem reprovadas. No geral, a ferramenta de área e os limites de altura configurados se mostraram eficazes, sendo capazes de aprovar ou reprovar corretamente a maioria dos casos testados (Figuras 53 a 58).

Figura 53 - Configuração final das ferramentas do projeto, aprovando caixa completa.



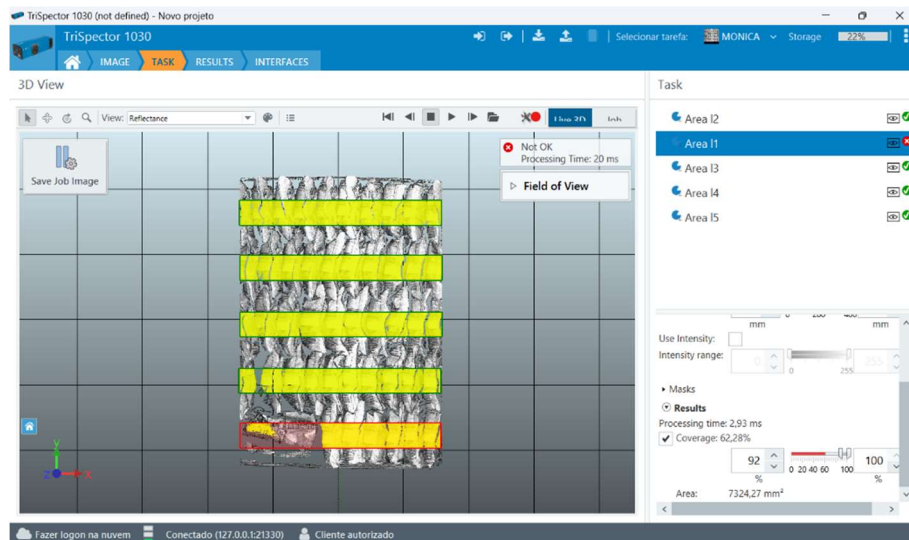
Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 54 - Reprovação NOK com um pacote a menos.



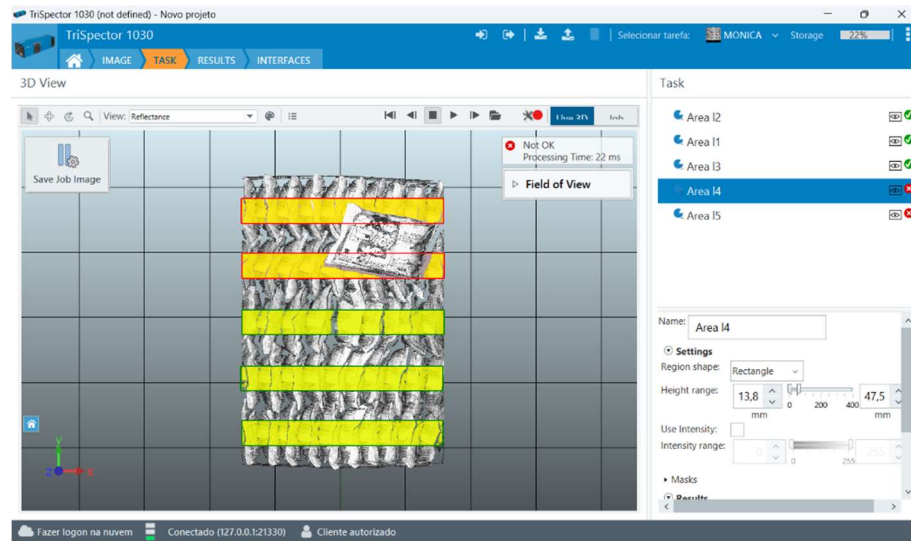
Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 55 - Reprovação NOK com três pacotes deitados, em cima um do outro.



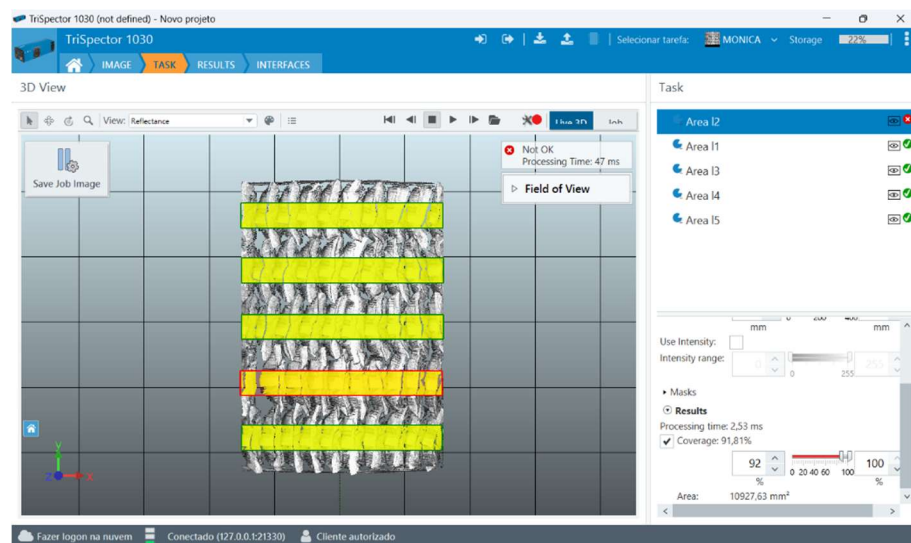
Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 56 - Reprovação NOK com um pacote a mais.



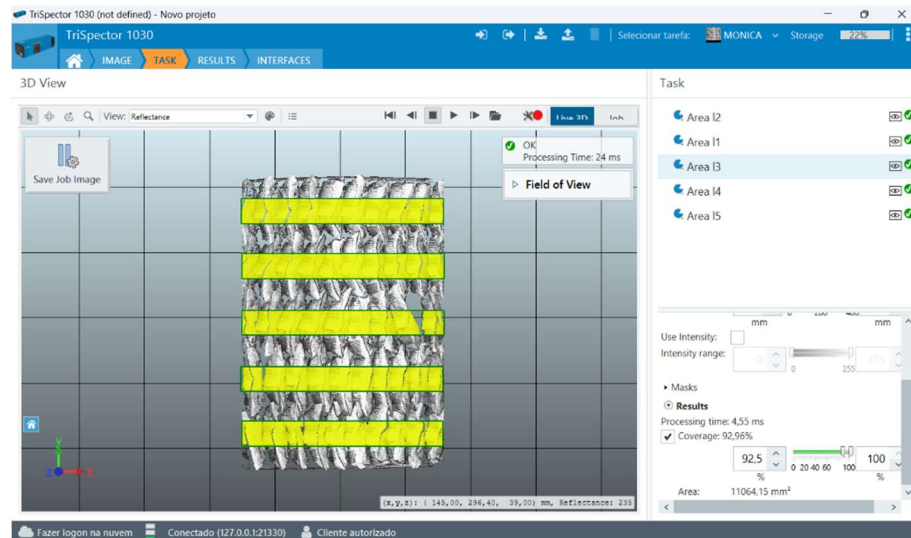
Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 57 - Reprovação falsa FNOK com caixa completa, mas baixa variação para um caso ruim.



Fonte: elaborado pela própria autora.

Figura 58 - Reprovação falsa FOK com pacote a menos, mas baixa variação para um caso bom.



Fonte: elaborado pela própria autora.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a configuração estabelecida, o teste foi conduzido em rodadas, com pausas entre elas para ajustes conforme necessário. Os dados coletados foram armazenados na Tabela 1, que inclui o número da rodada, o número de amostras coletadas pelo sensor, a quantidade de imagens aprovadas (OK), reprovadas (NOK), imagens que foram aprovadas, mas deveriam ter sido reprovadas (FOK), e imagens reprovadas indevidamente (FNOK). Também foi calculada a taxa de erro, somando os FOK e FNOK e dividindo pelo total de imagens analisadas, e a taxa de eficiência, fazendo 1 menos a taxa de erro. Entre cada rodada, pequenos ajustes foram feitos com base no comportamento dos FOK e FNOK, buscando minimizar os falsos rejeitos e maximizar a precisão da ferramenta.

Tabela 1 – Dados analíticos coletados durante o teste na linha de produção.

Rodada	N^a de imagens	OK	NOK	FOK	FNOK	Taxa de erro	Taxa de eficiência
1	59	40	19	1	1	3,39%	96,61%
2	54	35	19	0	3	5,56%	94,44%
3	84	59	25	4	0	4,76%	95,24%
4	368	260	108	7	10	4,62%	95,38%
5	24	22	2	2	0	8,33%	91,67%
6	350	195	155	1	3	1,14%	98,86%

Fonte: elaborado pela própria autora.

A eficiência total, considerando todas as rodadas, foi calculada multiplicando-se o número total de imagens em cada rodada pela taxa de eficiência correspondente. Em seguida, os resultados foram somados e divididos pelo total de 939 imagens coletadas ao longo de todas as rodadas. Esse cálculo resultou em uma eficiência de 96,59%. No entanto, essa eficiência não foi considerada conclusiva, pois ocorreram interferências e ajustes na configuração entre as rodadas, o que poderia ter influenciado os resultados.

Portanto, a eficiência da última rodada, que não passou por ajustes e refletiu o desempenho final do sistema em condições estáveis, foi utilizada como referência. Nesta rodada, a eficiência atingiu 98,86%, alcançando a taxa de aprovação necessária para a aplicação e validando a adequação do sistema à linha de produção. A rigor, para conferir esse último ajuste, o ideal seria repetir as rodadas anteriores e comparar os resultados. No entanto, o experimento não foi refeito com todas as rodadas anteriores, pois é um procedimento padrão da empresa realizar a validação apenas na última rodada, considerando as condições estáveis do sistema após os ajustes iniciais. Esse método é utilizado para refletir o desempenho final do sistema em ambiente real de produção, evitando a repetição desnecessária de rodadas anteriores, que já passaram por ajustes.

5 CONCLUSÃO

Nos capítulos iniciais deste trabalho, foi possível construir uma base conceitual sólida sobre o processamento de imagem e as tecnologias ópticas aplicadas, essenciais para a compreensão da visão computacional na indústria. O estudo aprofundado dos conceitos de processamento de imagem, como técnicas de análise, operações lógicas e o tratamento de ruídos e filtros, demonstrou como as imagens digitais podem ser manipuladas para fornecer informações essenciais ao controle de qualidade em processos industriais.

A exploração das tecnologias 2D e 3D, juntamente com a evolução dos sensores ópticos, como os sensores SICK, evidenciou as vantagens e limitações de cada abordagem. Embora a tecnologia 2D seja amplamente utilizada, ela se mostrou insuficiente para atender às necessidades específicas de detecção em profundidade, justificando a escolha da tecnologia 3D para a inspeção de caixas. A análise da triangulação a laser e a avaliação das diferentes opções de sensores ópticos disponíveis reforçaram a importância da seleção adequada do equipamento para garantir a precisão e eficiência dos sistemas de inspeção automatizados.

O estudo de caso, aplicado ao ramo alimentício, utilizou o software *SOPAS Engineering Tool* para configurar e gerenciar o sistema de inspeção 3D. Os testes realizados na linha de produção demonstraram que o sistema alcançou uma taxa de aprovação de 98,86%, comprovando a eficácia da tecnologia 3D na inspeção automática de caixas completas, garantindo a conformidade na quantidade e organização dos pacotes. Esse resultado não só validou o uso da tecnologia escolhida, mas também superou as expectativas de precisão e confiabilidade do sistema.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que os objetivos gerais e específicos deste trabalho foram plenamente atingidos. Foi possível compreender os conceitos fundamentais de processamento de imagem, analisar as técnicas de análise de imagem, avaliar o funcionamento das tecnologias 2D e 3D, e aplicar sensores ópticos no contexto industrial, conforme proposto.

Portanto, este trabalho reforça a importância das técnicas de processamento de imagem e da correta seleção de sensores para garantir o sucesso de aplicações industriais que demandam altos níveis de controle e precisão. A tecnologia 3D, validada por este estudo, se apresenta como uma solução robusta e eficiente para inspeção automática em ambientes industriais, assegurando a confiabilidade e eficiência do processo.

REFERÊNCIA

- ALVES, R. A.; PAULISTA, P. H. Ferramentas da qualidade: uma revisão bibliográfica e análise de publicações no ENEGEP. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 3., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: IESP, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/29804>. Acesso em: 6 set. 2024.
- BOYLE, R.; HLAVAC, V.; SONKA, M. **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**. 4. ed. Stamford: Cengage Learning, 2015.
- CHIN, R. T.; HARLOW, C. A. Automated Visual Inspection: A Survey. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. PAMI-4, n. 6, p. 557–573, nov. 1982.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Conheça a Feira de Hannover: o maior evento de tecnologia industrial do mundo**. *Portal da Indústria*, 2025. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/conheca-a-feira-de-hannover-o-maior-evento-de-tecnologia-industrial-do-mundo/>. Acesso em: 1 ago. 2024.
- CRÓSTA, Alvaro Penteadó. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. 1992. Reimpressão, Campinas: UNICAMP, 2002.
- DISTÂNCIA focal: entenda melhor o que é e como ela afeta suas fotografias. **Fotografia mais**, 2019. Disponível em: <https://fotografiamais.com.br/distancia-focal/>. Acesso em: 21 set. 2024.
- FANK, D.; GRANZOTTO, T.; MIOLO, S. L. G. Técnicas de iluminação eficiente com o auxílio da luminotécnica. In: Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão, 22., 2016, Santa Catarina. **Anais [...]**. Santa Catarina: SIEPE, 2016. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/siepe/article/view/11450>. Acesso em: 13 set. 2024.
- FRANÇA, J. G. D. M. DE. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de informações volumétricas usando método de triangulação a laser e campo de visão variável**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Saito-2/publication/267382464>. Acesso em: 10 set. 2024.
- GOMES, D. M. **Realce de contraste em imagens digitais usando equalização de histograma**. 2008. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/RVMR-7K6Q5X>. Acesso em: 12 set. 2024.
- GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education, 2010. Disponível em: <https://archive.org/details/processamento-digital-de-imagens/mode/2up>. Acesso em: 10 set. 2024.
- GOOL, L. V.; DEWAELE, P.; OOSTERLINCK, A. Texture analysis anno 1983. **Computer vision, graphics, and image processing**, Leuven, v. 29, n. 3, p. 336-357, Mar. 1985. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0734189X85901306>. Acesso em: 10 set. 2024.

HAIN, R.; KÄHLER, C. J.; TROPEA, C. Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. **Experiments in fluids**, [S. l.], v. 42, p. 403-411, Jan. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0247-1>. Acesso em: 10 set. 2024.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física: óptica e física moderna**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 448 p.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1995. 549 p.

LITWILLER, D. CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. **Photonics spectra**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 154-158, Jan. 2001. Disponível em: <https://courses.cs.duke.edu/fall11/cps274/papers/Littwiller01.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

MELO, A S C DE. **A álgebra de matrizes e o processamento de imagens digitais**. 2015. 65 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Matemática) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2015.

MOREIRA, S. S. **Projeto e construção de um scanner tridimensional baseado no método de triangulação a laser utilizando softwares livres**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/148571>. Acesso em: 14 set. 2024.

OLIVEIRA, U. R.; ROCHA, H. M. Balanced scorecard como fonte de vantagem competitiva para as organizações: uma revisão bibliográfica. *In*: Simpósio de Engenharia de Produção, 13., 2006, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: SIMPEP, 2006. Disponível em: https://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/24.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.

RECOMMENDATIONS for implementing the strategic initiative industrie 4.0: securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group. **acatech NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING**, Munique, v. 2, n. 14480.20485, p. 4-7, Apr. 2013. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0-final-report-of-the-industrie-4-0-working-group/>. Acesso em: 10 set. 2024.

ROSSI, C. A. V.; SLONGO, L. A. Pesquisa de satisfação de clientes: o estado-da-arte e proposição de um método brasileiro. **Journal of Contemporary Administration**, v. 2, p. 101-125, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-65551998000100007>. Acesso em: 8 ago. 2024.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 1. ed. London: Springer-Verlag, 2011.

VIVIANI, A. B. **Sensores de triangulação a laser aplicados a soldagem: aspectos construtivos, avaliação comparativa e desenvolvimento de software livre**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/226953>. Acesso em: 14 set. 2024.