

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

MATHEUS SANTANA CARVALHO

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE VISÃO
COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO DE TRENAS

Joinville
2022

MATHEUS SANTANA CARVALHO

ANÁLISE DE VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE VISÃO
COMPUTACIONAL PARA CALIBRAÇÃO DE TRENAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecatrônica no curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Benjamin Grando
Moreira

Joinville
2022

Dedico este trabalho a toda a minha família e amigos que foram fundamentais para a conclusão desta etapa da minha vida, principalmente ao Fabio Markus Hermann e à Maria Amélia Santana (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a minha família por todo o incentivo e suporte recebido nesses anos. A minha mãe, por todos os ensinamentos e esforços para que eu chegasse até Joinville, pelo exemplo de dedicação e luta pelos sonhos. As minhas tias, Marcia e Verônica, agradeço por todas as formas de suporte que me mantiveram aqui.

Ao Prof. Dr. Benjamin Grando Moreira, agradeço por ter aceitado este desafio desde o primeiro momento, buscando entender cada vez mais o assunto, pela paciência e principalmente por não desistir de mim, foi um longo processo e em vários momentos estive ausente, mas sempre encontrei o apoio do senhor para retornar e finalizar esta etapa.

A Profa. Dra. Sueli Fischer Beckert, agradeço por todos os anos juntos no Laboratório de Metrologia e Qualidade Industrial (METeQ). Por todos os ensinamentos profissionais e pessoais que recebi durante esses anos. Não poderia deixar de agradecer pelos puxões de orelha, para que finalizasse esta etapa. A senhora, foi fundamental para construir o profissional que me tornei. Muito obrigado por tudo sempre.

Gostaria de agradecer a todos os professores, técnicos dos laboratórios, administrativos, zeladores, segurança e demais profissionais da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville. Agradeço por cada conversa, conselho, ensinamento e apoio que recebi durante esses anos.

Seria injusto da minha parte citar nomes de todas as pessoas que estiveram comigo durante essa jornada e com certeza esqueceria de citar o nome de alguém. Além disso, em todos os momentos desde a minha chegada em Joinville sempre fui muito bem recebido e acolhido pelos meus amigos e seus familiares. A minha família de nascença está em São Paulo, mas tenho diversas famílias que me adotaram.

Por isso, agradeço do fundo do meu coração as famílias: Almeida, Ansay, Bassedone, Becker, Beckert, Bianchi, Bueno, Carpin, Carvalho, Cherato, Claudino, Cornelsen, Dias, EV, Eliel, Farias, Freitas, Garcia, Klein, Klok, Leite, Leoni, Lima, Mafaldo, Martins, Medeiros, Millnitz, Nascimento, Oliveira, Orél, Parucker, Prochnow, Rosa, Sandrin, Santana, Senem, Soares, Tavares, Uhlemann, Vieira, Vitorino, Voltolini. Muito obrigado pelos momentos, vocês foram, continuam e sempre serão a minha grande família!

"A primeira regra de qualquer tecnologia utilizada nos negócios é que a automação aplicada a uma operação eficiente aumentará a eficiência. A segunda é que a automação aplicada a uma operação ineficiente aumentará a ineficiência."(Bill Gates)

RESUMO

A metrologia é responsável pelo estudo dos aspectos que envolvem o uso e aplicação das medições, sendo uma área comum a todas as engenharias na busca pela qualidade e melhoria contínua dos processos e produtos. Com o avanço do desenvolvimento tecnológico de produtos, serviços e processos houve a redução da utilização de recursos e do tempo de fabricação, favorecendo o aumento da taxa de eficiência. Com isso, o termo indústria 4.0 passou a caracterizar a implementação de tecnologias como a internet das coisas, inteligência artificial e a capacidade de processamento dos dados. No setor industrial, engloba a automação e tecnologia da informação. Nesse cenário, a metrologia 4.0 traz a adaptação e implementação dessas tecnologias nos processos atuais garantindo a confiabilidade e qualidade dos dados oriundos de processos automatizados, além de permitir a tomada de decisão em tempo real e a integração dos resultados em processos convencionais. A calibração de um instrumento, consiste na determinação de valores e incertezas de medição de um instrumento com base em um padrão e com base nesses valores o resultado de medição é composto. Podendo o resultado ser influenciado pelas condições de realização do procedimento, repetibilidade, reprodutibilidade, instrumentos utilizados durante o processo, entre outros aspectos. Buscando aplicar as tecnologias atuais nos modelos tradicionais de calibração, é proposto a análise de viabilidade da utilização de ferramentas de visão computacional na calibração de trenas, para realizar a aquisição, processamento e extração dos resultados da comparação da trena com o instrumento padrão. O desenvolvimento deste trabalho possibilitou a análise dos diferentes equipamentos que podem ser utilizados para a aquisição de imagens, juntamente com os efeitos na qualidade da imagem. Seguida da análise dos resultados extraídos por meio do processamento das imagens com as ferramentas de visão computacional implementadas para este trabalho. Com isso, 17,9% dos traços da trena não tiveram a numeração identificada corretamente, enquanto na régua padrão foram 28,5%. Sendo possível evidenciar os efeitos adversos causados pelos equipamentos definidos durante a definição óptica. Assim como as limitações, seja dos equipamentos ou das ferramentas de visão computacional utilizadas no processamento da imagem. Desde modo, é possível a utilização de ferramentas de visão computacional com o desenvolvimento de condições estruturais para realização da calibração e o acompanhamento dos resultados extraídos.

Palavras-chave: Metrologia. Calibração. Indústria 4.0. Visão Computacional.

ABSTRACT

Metrology is responsible for the study of aspects involving the use and application of measurements, being an area common to all engineering in the search for quality and continuous improvement of processes and products. With the advancement of technological development of products, services and processes, there was a reduction in the use of resources and manufacturing time, favoring an increase in the efficiency rate. With this, the term industry 4.0 came to characterize the implementation of technologies such as the internet of things, artificial intelligence and data processing capacity. In the industrial sector, it encompasses automation and information technology. In this scenario, metrology 4.0 brings the adaptation and implementation of these technologies into current processes, ensuring the reliability and quality of data from automated processes, in addition to allowing real-time decision making and the integration of results in conventional processes. The calibration of an instrument consists of the determination of values and measurement uncertainties of an instrument based on a standard and based on these values the measurement result is composed. The result may be influenced by the conditions of performance of the procedure, repeatability, reproducibility, instruments used during the process, among other aspects. Seeking to apply current technologies in traditional calibration models, it is proposed to analyze the feasibility of using computer vision tools in the calibration of measuring tapes, to carry out the acquisition, processing and extraction of the results of the comparison of the measuring tape with the standard instrument. This work made it possible to analyze the different equipment that can be used for image acquisition, together with the effects on image quality. Followed by the analysis of the results extracted by processing the images with the computer vision tools implemented for this work. As a result, 17.9% of the lines on the measuring tape were not numbered correctly, while on the standard ruler there were 28.5%. It is also possible to highlight the adverse effects caused by the equipment defined during the optical definition. As well as the limitations, whether of the equipment or computer vision tools used in image processing. In this way, it is possible to use computer vision tools with the development of structural conditions to carry out the calibration and with the monitoring of the extracted results.

Keywords: Metrology. Calibration. Industry 4.0. Computer Vision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de bancada para calibração de trenas	17
Figura 2 – Exemplo da medição do erro de indicação	18
Figura 3 – Iluminação <i>Bar</i> (a esquerda) e <i>Back Light</i> (a direita)	21
Figura 4 – Iluminação <i>Dome</i> (a esquerda) e <i>Coaxial</i> (a direita)	21
Figura 5 – Iluminação <i>Ring</i>	22
Figura 6 – Imagens adquiridas por webcam, microscópio e celular	23
Figura 7 – Imagem final da definição óptica	24
Figura 8 – Fluxo Visão Computacional	25
Figura 9 – Estrutura para aquisição das imagens	26
Figura 10 – Fluxo do código de aquisição de imagens	27
Figura 11 – Sequência de três imagens adquiridas na etapa de aquisição	28
Figura 12 – Imagem adquirida	29
Figura 13 – Imagem tons de cinza	29
Figura 14 – Imagem desfocada	30
Figura 15 – Comparativo técnica threshold tradicional (a esquerda) e threshold adaptativo (a direita)	31
Figura 16 – Imagem de saída filtro threshold adaptativo	32
Figura 17 – Imagem de saída filtro morfológico	33
Figura 18 – Imagens para identificação das extremidades (Erosão a esquerda e dilatação a direita)	34
Figura 19 – Imagem final pré processamento	35
Figura 20 – Etapas de pré processamento	36
Figura 21 – Imagem com os contornos dos traços	37
Figura 22 – Imagem com traços filtrados	38
Figura 23 – Imagem da região da indicação numérica	39
Figura 24 – Comparativo da região da indicação numérica recortando a imagem final do pré processamento	40
Figura 25 – Processamento da imagem de entrada da trena para reconhecimento de caracteres	41
Figura 26 – Imagem de entrada reconhecimento de caracteres	41
Figura 27 – Imagem do validador	45
Figura 28 – Comparativo solução atual (a esquerda) e solução proposta (a direita)	54
Figura 29 – Comparativo sequência de imagens	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas do eixo X dos instrumentos de medição	42
Tabela 2 – Erros de indicação	43
Tabela 3 – Distância entre os traços dos instrumentos de medição	44
Tabela 4 – Resumo da detecção de traços e numerações na trena	47
Tabela 5 – Resumo da detecção de traços e numerações na régua padrão . .	48
Tabela 6 – Comparação do nível de confiança médio do OCR entre os instrumentos de medição	49
Tabela 7 – Nível de confiança médio das imagens com identificação incorreta da numeração	50
Tabela 8 – Comparação da distâncias entre os traços	52
Tabela 9 – Comparativo distância entre os traços para sequência de imagens .	55

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNI	Confederação Nacional da Indústria
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
EMA	Erro Máximo Admissível
EMVA	European Machine Vision Association
GenICam	Generic Interface for Cameras
GigE	<i>Gigabit Ethernet</i>
IA	Inteligência Artificial
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IoT	Internet das Coisas
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização
NBR	Norma Técnica Brasileira
NF	<i>Not Found</i>
OCR	<i>Optical Character Recognition</i>
PTB	<i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i>
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
UMC	<i>European Metrology Cloud</i>
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo Geral	13
1.2	Objetivos Específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Comprovação metrológica no ambiente industrial	14
2.2	Calibração	16
2.2.1	Calibração de Trenas	16
2.3	Visão Computacional	18
2.4	Definição Óptica	20
3	DESENVOLVIMENTO	23
3.1	Definição Óptica	23
3.2	Etapas do projeto de Visão Computacional	25
3.2.1	Aquisição das imagens	25
3.2.1.1	Comunicação com a câmera	26
3.2.2	Pré processamento das imagens	28
3.2.3	Processamento das imagens	36
3.2.3.1	Reconhecimentos do contorno das graduações	36
3.2.3.2	Identificação da numeração das graduações	38
3.2.3.3	Consolidação dos resultados	42
3.2.3.4	Análise estatística dos resultados do processamento da amostra de imagens	46
3.2.3.5	Avaliação de melhorias	53
4	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A	62
	APÊNDICE B	70

1 INTRODUÇÃO

O termo qualidade é constantemente associado ao acabamento final de um produto, mas segundo a ABNT NBR ISO 9000 (2015a) qualidade também pode ser considerada uma cultura de comportamentos, atividades e processos que possibilitem gerar valor e benefício ao cliente. Desta forma, a importância da qualidade também está relacionada com a qualidade dos processos e atividades internas de uma organização.

Neste contexto, o Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) integra ferramentas de gestão na organização para atender à política de qualidade e os objetivos da empresa. O SGQ fornece diretrizes para direcionar e gerenciar as atividades e recursos da organização, com foco na satisfação do cliente e na busca da melhoria contínua dos processos (ABNT, 2015b).

Já a ABNT NBR ISO 9001 (2015b) apresenta requisitos para a implementação de um sistema de gestão da qualidade em uma organização, visando a padronização de produtos e serviços conforme às exigências dos clientes, além da satisfação do cliente, abordagem de risco e assegurar os resultados como válidos e confiáveis caso o monitoramento ou medição seja utilizado para verificação.

Na análise dos efeitos da utilização da norma ABNT NBR ISO 9001 (2015b) na implementação de inovações, os autores Mandersa, Vriese e Blind (2016) destacam os princípios da norma que permitem a implementação de inovações para o destaque da organização no mercado. Abordando desde o envolvimento dos recursos humanos na busca pela inovação e melhoria dos processos até análise de estratégias que permitam a inovação, melhoria contínua, produtividade e eficiência para satisfazer as expectativas dos clientes.

Por outro lado, tem-se a necessidade de correlacionar todas as áreas e processos dentro de uma organização, possibilitando a coleta e análise de dados sobre os resultados de eficiência e qualidade para o planejamento das ações, integrando departamentos de planejamento com o de pesquisa e desenvolvimento na busca pelas inovações (MANDERSA; VRIESA; BLIND, 2016).

A utilização crescente de automação e tecnologias da informação como big data, inteligência artificial, segurança e, principalmente, internet das coisas (IoT) no setor industrial, resultou no desenvolvimento da quarta revolução industrial, mais conhecida como indústria 4.0. O termo surgiu após a apresentação do relatório final, em 2013, do grupo de trabalho presidido pelo autores Kagermann, Helbig e Wahister (2013) à indústria e instituições alemãs, com o objetivo de difundir o tema pelo país e garantir a segurança e liderança da indústria alemã de manufatura.

No documento são esclarecidos os conceitos e tecnologias que envolvem

a indústria 4.0, além da abordagem dos benefícios e desafios para o setor industrial e organizações governamentais. Benefícios como a flexibilidade de sistemas, customização de produtos e processos, otimização de decisões, produtividade e eficiência, contínuo desenvolvimento profissional e a proteção e segurança de máquinas, dados e recursos humanos. Por outro lado, surge o gerenciamento de sistemas complexos e a necessidade da regulamentação dessas novas tecnologias (KAGERMANN; HELBIG; WAHISTER, 2013).

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) (INMETRO, 2012), a metrologia é a ciência responsável pelo estudo teórico e prático dos conteúdos que envolvem as medições e suas aplicações, sendo considerada importante para o desenvolvimento da competitividade e da inovação. Com foco principal em prover confiabilidade, credibilidade e qualidade às medidas (CONMETRO, 2017).

A importância da metrologia cresceu no Brasil e no mundo devido a globalização, o desenvolvimento de processos/sistemas complexos e o uso de novas tecnologias, intensificando a exigência da confiabilidade e qualidade dos dados e processos (CONMETRO, 2017).

Em razão do crescimento da utilização de tecnologias da indústria 4.0, houve a implementação dessas soluções nos mais diversos setores, como na metrologia. Com isso, surgiu o termo metrologia 4.0, com a necessidade de aprimorar os processos, como o de calibração, com as tecnologias da indústria 4.0 (CUNHA; SANTOS, 2020).

Segundo Freire (2018) com a metrologia 4.0 será possível realizar inspeções e o controle de qualidade diretamente no chão de fábrica sem necessidade de recursos humanos, assegurando velocidade, confiabilidade de dados e a rastreabilidade. Possibilitando o monitoramento do processo em tempo real e a integração dos dados de toda a organização.

No Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2012), a calibração é uma operação, realizada em laboratórios de calibração, que estabelece a relação entre os valores e incertezas de medição para, posteriormente, compor o resultado de medição. A calibração possibilita identificar se um instrumento de medição está apto e de que suas medições não vão comprometer a qualidade final do processo ou produto.

O processo de calibração de trenas consiste na avaliação do erro de indicação no comprimento do instrumento com base em um padrão. Atualmente este processo apresenta um elevado custo em relação a substituição do instrumento, além do tempo de execução e a dependência humana para execução da atividade em processos não automatizados e o processamento dos dados, sendo suscetível a erros.

Visando aplicar as tecnologias da indústria 4.0 na metrologia, aumentar a capacidade e eficiência do processo de calibração. Este trabalho possui como proposta analisar a implementação da visão computacional no processo de calibração de trenas, com o objetivo determinar a viabilidade do uso de ferramentas de visão computacional

no processamento das imagens para calibração de trenas.

A visão computacional é uma área da inteligência artificial (IA) que permite a visualização e interpretação de imagens e vídeos por computadores e sistemas digitais, replicando a função humana de "enxergar" para esses dispositivos, nos mais diversos setores. Além de possibilitar a tomada de ações e recomendações com base nos dados analisados (IBM, 2022).

Com a realização deste trabalho, foi realizado a análise do uso de diferentes equipamentos, como iluminação, câmeras e lentes, na qualidade das imagens, principalmente, nos traços e marcações dos instrumentos de medição.

Em seguida foram implementados processos para aquisição, pré processamento e processamento das imagens. Os resultados extraídos foram utilizados para analisar o funcionamento e limitações das ferramentas de visão computacional, assim como, a identificação de problemas dos instrumentos de medição não identificados inicialmente.

É possível a utilização de ferramentas de visão computacional na realização de calibrações de trenas. Porém, é necessário uma estrutura de deslocamento da câmera e iluminação adequados de forma minimizem os ruídos e potencializem os traços e marcações. Assim como, a necessidade da validação humana dos resultados extraídos das imagens processadas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade da utilização de ferramentas de visão computacional em um processo de calibração de trenas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver o software de visão computacional para caracterização das trenas;
- Determinar aspectos do processo de calibração que podem ser aprimorados através da visão computacional;
- Extrair dados da caracterização das trenas;
- Determinar a viabilidade do uso de visão computacional para a calibração de trenas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os assuntos necessários para o entendimento do processo de calibração de trenas, assim como a importância da realização e requisitos do processo.

2.1 COMPROVAÇÃO METROLÓGICA NO AMBIENTE INDUSTRIAL

A implementação do sistema de gestão da qualidade (SGQ), permite a integração de processos e recursos na busca pela melhoria contínua, satisfação do cliente e a conformidade de produtos e/ou serviços de uma organização (ABNT, 2015b).

A ABNT NBR ISO 9001 (2015b) atribui a organização a necessidade de determinar e suprir os recursos necessários para o SGQ, quaisquer sejam os recursos. Para o monitoramento e medição, a organização deve prover os recursos necessários, neste caso instrumentos de medição, que gerem resultados válidos, confiáveis e adequados ao tipo de atividade de monitoramento e/ou medição.

Com base nisso, a ABNT NBR ISO 10012 (2004) especifica os requisitos e diretrizes para a gestão de processos de medição e comprovação metrológica de equipamentos de medição. A comprovação metrológica consiste em um conjunto de operações que asseguram que o instrumento de medição atende aos requisitos do seu uso pretendido.

O procedimento de comprovação metrológica deve conter requisitos de verificação das incertezas de medição e do erro do instrumentos de medição para certificar que estão dentro dos limites permissíveis especificados para o seu uso pretendido. (ABNT, 2004).

Além disso, a descrição e identificação do instrumento, identificação do procedimentos, Erro Máximo Admissível (EMA), condições ambientais, incertezas de calibração, intervalo de realização do procedimento e resultado da calibração destacam-se dentro dos requisitos de um processo de comprovação metrológica (ABNT, 2004).

A comprovação metrológica pode incluir a calibração, verificação e/ou ajuste, sendo alcançada somente após a comprovação de que o instrumento de medição cumpre os requisitos, como erro máximo admissível, incerteza, resolução, entre outros (ABNT, 2004).

No Vocabulário Internacional de Metrologia, a calibração é definida como a operação que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores e incertezas de medição fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas. Além disso, através da calibração também é possível obter o

resultado de medição a partir de uma indicação, podendo o resultado ser expresso na forma de uma declaração, função, diagrama, curva ou tabela de calibração (INMETRO, 2012).

É importante distinguir a calibração dos processos de verificação e ajuste. A verificação é um procedimento que fornece evidência objetiva de que um dado item atende os requisitos especificados, enquanto o ajuste é o procedimento realizado em um instrumento de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores de uma grandeza a ser medida, ou seja, é uma operação corretiva com o objetivo de fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com a sua atividade (INMETRO, 2012).

Com a implementação das tecnologias da indústria 4.0, houve a necessidade de adaptações de máquinas, processos e procedimentos das organizações. Com relação a metrologia, as alterações e desenvolvimento de novos processos estão relacionados com a busca de soluções para medições de grandezas multidimensionais, garantia da confiabilidade e segurança dos resultados de medição tendo em vista o crescente número de instrumentos de medição (VICTOR et al., 2019).

Para Victor et al. (2019), o processo de calibração atual é eficaz, em relação a confiabilidade e resultados do processo. Porém, ineficiente no modo em que o processo é realizado. Uma vez que há necessidade do transporte do instrumento ou padrão de medição gerando um alto custo, tempo e possibilidade do artefato perder as especificações/precisão durante o processo logístico.

Victor et al. (2019) discute a possibilidade de integração entre o laboratório de referência e o laboratório da organização no processo de calibração, utilizando-se das tecnologias da indústria 4.0. Permitindo a economia de tempo e custos, além da definição de um novo procedimento para produção, transferência e controle dos dados de calibração, sem comprometer a precisão e a rastreabilidade do processo.

O Instituto Nacional de Metrologia da Alemanha, o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB) (2020), vêm promovendo a adequação de processos e procedimentos para a digitalização da metrologia juntamente com a implementação da indústria 4.0 nas indústrias alemãs.

Para isso, conforme PTB (2018) o instituto planeja o desenvolvimento de ações e projetos com base em cinco objetivos básicos, sendo eles:

- Garantia da uniformidade e confiança;
- Usabilidade sustentável de resultados e dados de pesquisa;
- Uso eficiente e seguro de tecnologias digitais;
- Visão geral do tratamento de instrumentos de medição e dados de medição;
- Participação dos colaboradores.

Em 2018, o PTB iniciou o projeto *European Metrology Cloud* (UMC) com o objetivo de desenvolver uma infraestrutura digital de qualidade onde os instrumentos

de medição possam interagir. Além do projeto de comunicação e validação de dados inteligentes em redes IoT (SmartCom), onde será construída toda a comunicação de dados metrológicos com base no sistema internacional de unidades (SI) com tecnologias da indústria 4.0 (PTB, 2018).

2.2 CALIBRAÇÃO

A realização da calibração indica se o sistema de medição utilizado no processo é capaz de apresentar resultados de medições confiáveis, garantindo a comprovação metrológica do sistema de medição (JUNIOR; SOUZA, 2008).

Uma organização pode decidir entre realizar a calibração de seus instrumentos de medição em um laboratório externo ou interno. Em ambos os casos o laboratório deve seguir aos requisitos presentes na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. Esta norma é referência para acreditação de laboratórios de calibração e ensaios junto a Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro (ABNT, 2017).

A ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017) especifica os requisitos gerais para a competência, imparcialidade e operação consistente do laboratório, sendo um laboratório a organização que realiza ensaios, calibrações ou amostragem, seguida de um ensaio ou calibração. Além disso, requisitos como imparcialidade e a confiabilidade devem ser atendidos de modo a preservar-se de qualquer influência e divulgação de dados não autorizados.

O laboratório deve documentar em seus procedimentos quais são os requisitos de instalação e condições ambientais para a realização da atividade. E é de sua responsabilidade garantir a exatidão e/ou a incerteza de medição solicitadas pelo cliente, assim como manter a rastreabilidade metrológica dos seus equipamentos (ABNT, 2017).

Segundo ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017), o laboratório é responsável pela liberação dos resultados. Através da elaboração de um relatório, denominado certificado de calibração, contendo informações relevantes a respeito da calibração e resultados. No documento deve constar todas as informações acordadas com o cliente e necessárias para a interpretação dos resultados com exatidão, clareza e objetividade.

2.2.1 Calibração de Trenas

Segundo a ABNT, trenas são instrumentos de medição que possuem uma fita graduada ao longo de seu comprimento. A norma ABNT NBR 10123 (2012), define requisitos aplicados a produção e calibração de trenas de fita de aço, enquanto a norma ABNT NBR 10124 (2014) define os mesmos itens para trenas com fita de fibra.

Para trenas de fita de aço a calibração consiste em determinar o erro de indicação da escala (ABNT, 2012), enquanto para as trenas fabricadas com fita de

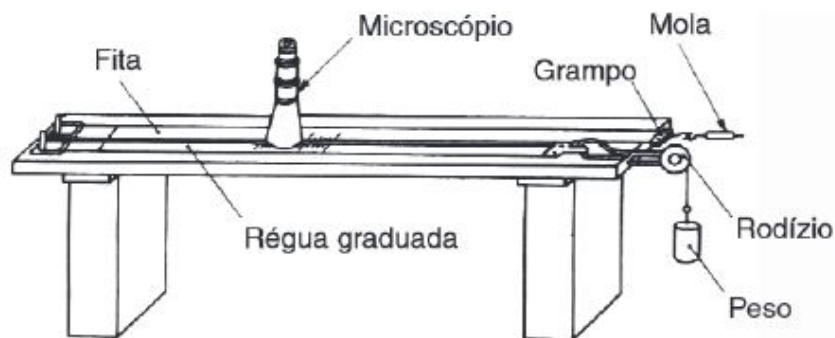
fibra a calibração consiste na verificação longitudinal da fita em função da força e da umidade, assim como a variação da largura dos traços (ABNT, 2014).

Como todo processo de calibração, a calibração de trenas inicia-se com uma inspeção do instrumento com o objetivo de analisar o estado funcional e de conservação. Qualquer avaria ou desgaste do instrumento deve ser registrado no relatório de calibração (METEQ, 2016).

Além disso, os instrumentos devem estar na temperatura de referência de 20°C. Para realizar a calibração de trenas de fita de aço é necessário apoiar o instrumento sobre uma superfície plana e horizontal, e aplicar uma força de tração de acordo com o comprimento nominal da fita. Uma régua padrão ou trena padrão é utilizada como referência para medir a distância entre as marcações da trena (ABNT, 2012).

Com o auxílio de um microscópio, lupa graduada ou outro dispositivo óptico, é realizada a medição da diferença de indicação entre as marcações correspondentes da trena e do padrão utilizado (ABNT, 2012). Com isso, na figura 1 é apresentado um modelo de montagem de bancada de calibração de trenas.

Figura 1 – Modelo de bancada para calibração de trenas

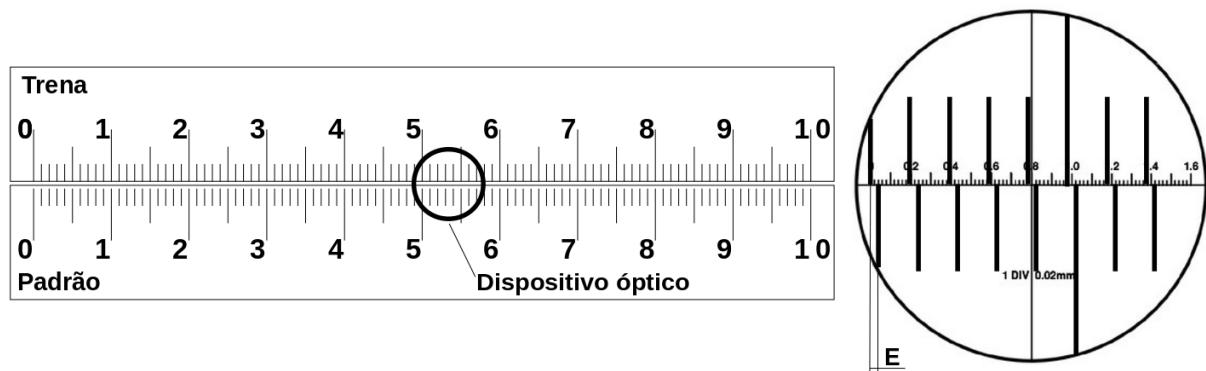


Fonte: ABNT (2012).

Conforme a figura 1, a bancada deve possibilitar a fixação do padrão e da trena, a ser calibrada, de modo que seja possível realizar a leitura e comparação das escalas. Segundo o DOQ-CGCRE-004 (2020), são necessários no mínimo oito pontos de calibração na faixa de medição da trena para avaliar o erro de indicação, abrangendo todo o comprimento do instrumento e são determinados pelo laboratório de calibração e/ou cliente.

Como dito anteriormente, o erro de indicação é determinado com o auxílio do dispositivo óptico através da medição da diferença entre as marcações correspondentes dos instrumentos de medição, como demonstrado na figura 2.

Figura 2 – Exemplo da medição do erro de indicação



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 2, é exemplificada o processo de medição do erro de indicação (E). Na imagem a esquerda, temos a visão dos dois instrumentos de medição posicionados e o dispositivo óptico, enquanto a imagem a direita representa a visão do dispositivo óptico.

O dispositivo óptico é posicionado na marcação desejada e com a utilização da escala do dispositivo óptico é realizada a medição da diferença das marcações dos instrumentos de medição. Conforme Beckert e Machado (2011), as medições do erro de indicação devem ser realizadas no centro do traço, devido a variação das espessuras dos traços dos instrumentos de medição. Porém, atualmente está se praticando a medição na lateral do traço.

A estrutura da figura 1, também é utilizada para calibração de trenas de fita de fibra. Porém, o processo realizado é diferente. Para a verificação da variação longitudinal da fita de fibra em função da força, primeiro é realizada a medição dos comprimentos ensaiados aplicando a força definida na norma ABNT NBR 10124 (2014) de acordo com a largura da fita. Em seguida, é aplicada a tensão indicada na fita e o erro de indicação é medido novamente nos pontos ensaiados anteriormente.

A verificação da largura das marcas da escala, é realizada tracionando a trena adequadamente e utilizando o dispositivo óptico para realizar as medições. Já a verificação da longitudinal da fita de fibra em função da umidade, é realizada a medição de um comprimento, geralmente um metro, antes e após aguardar a secagem da fita mergulhada por no mínimo trinta minutos em água na temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ (ABNT, 2014).

2.3 VISÃO COMPUTACIONAL

Linguagem, pensamento e comportamento são características humanas e áreas de estudo importantes por filósofos, psicólogos, neurocientistas e cada vez mais tem atraído a atenção de cientistas da computação. Todos têm como objetivo desvendar

e modelar as características humanas. Com isso, tem-se desenvolvido tecnologias computacionais que se baseiam em comportamento e características humanas, como o caso da visão (FILHO, 2012).

Os primeiros experimentos com visão computacional foram conduzidos por volta de 1950, com o objetivo de proporcionar às máquinas e computadores a capacidade de processamento de informações similares a capacidade humana (BALLARD; BROWN, 1982)

Ballard e Brown (1982) definem a visão computacional como a ciência responsável pelo estudo e desenvolvimento de tecnologias que possibilitem a capacidade do sistema visual humano em máquinas e computadores, proporcionando a capacidade de enxergar, extrair características, descrever e interpretar conteúdos de imagens e vídeos. Enquanto Szeliski (2022), afirma que a visão computacional é área dentro da inteligência artificial com o objetivo de desenvolver técnicas para representação de formas tridimensionais e aparência de objetos através de imagens.

Ambas as definições, demonstram a ampla área de atuação e aplicação da visão computacional. Podendo ser utilizada na identificação e reconhecimento de caracteres, separação e identificação de pacotes, auxílio em análises médicas, direção de veículos autônomos, entre outras aplicações e áreas (SZELISKI, 2022).

A visão computacional permite a descrição explícita e significativa de objetos presentes em uma imagem. Porém, a sua compreensão trata-se de um processamento diferente. Por outro lado, a descrição é um pré requisito para reconhecer, manipular e pensar sobre a imagem ou objetos (BALLARD; BROWN, 1982).

Quando são abordados os conceitos de visão computacional, é importante ter um breve entendimento sobre imagens digitais. Portanto, a imagem digital é definida como uma imagem discretizada, representada por uma função bidimensional $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas do um plano que representam a intensidade luminosa (pixel) da imagem em um ponto. Computacionalmente, a imagem digital é representada através de uma matriz de duas dimensões, contendo M linhas e N colunas (GONZALEZ; WOODS, 2008).

A partir dos valores de intensidade/pixel da imagem, ela pode ser classificada em imagem binária, em escala de cinza/monocromática ou colorida. Uma imagem binária, é uma imagem digital na qual os pixels são apresentados por valores binários, usualmente, "0" para cor preta e "1" para cor branca. Já em uma imagem em escala de cinza, também chamada como monocromática, os pixels podem assumir uma faixa de valores variando do preto ao branco (GONZALEZ; WOODS, 2008).

A imagem colorida tem os seus pixels representados por um sistema de cores, sendo o sistema RGB um dos mais conhecidos. Os pixels das imagens em tons de cinza ou coloridas são representados digitalmente por 8 bits. Com isso, são possíveis 256 intensidades de iluminação em cada pixel (GONZALEZ; WOODS, 2008).

Os autores Pungle e Pungle (2020), definem os pilares mais importantes da indústria 4.0 para o ramo industrial, que contribuem na eficiência, rapidez e flexibilidade dos processos produtivos. Entre os pilares, tem-se a visão de máquina como uma combinação de hardware e software para orientar máquinas industriais com base na aquisição e processamento de imagens.

Vários elementos compõem a visão de máquina, desde iluminações, câmeras, lentes, sensores, processamentos e a comunicação, seja integrados em um mesmo dispositivo ou não. O processamento nada mais é do que a aplicação das ferramentas de visão computacional no processamento das imagens, seja para extrair informações, comparar modelos, avaliar objetos e definir resultados. O avanço das tecnologias e da visão computacional, tem sido cada vez mais implementado nas indústrias com o objetivo de obter maior eficiência, qualidade e capacidade produtiva (PUNGLE; PUNGLE, 2020).

Porém, a visão computacional se depara com a grande dificuldade de possibilitar aos computadores e máquinas, a capacidade cognitiva de analisar, interpretar e tomar decisões com base em cenários tridimensionais, onde há uma grande quantidade de variáveis e diferentes perspectivas (BALLARD; BROWN, 1982).

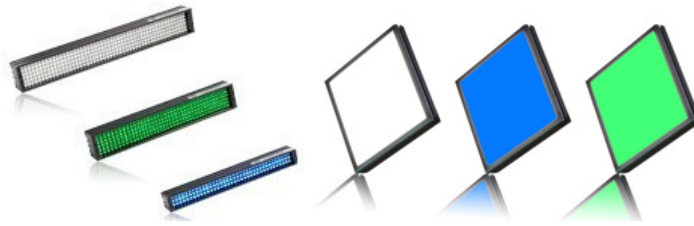
2.4 DEFINIÇÃO ÓPTICA

A etapa de definição óptica consiste no testes de diferentes tipos e posições de iluminações, câmeras e filtros em conjunto com a definição da estrutura que será utilizada no projeto. Tem como objetivo reduzir ruídos na imagem e intensificar detalhes importantes para o processo de inspeção através da visão computacional.

Pode ser utilizada uma única iluminação ou um conjunto de iluminações de diferentes tipos e/ou posições. O tipo de iluminação utilizado nas inspeções que envolvem processamento de imagens possui grande influência sobre o sistema de visão e o resultado. Uma vez que é responsável por evidenciar os defeitos ou destacar os pontos de inspeções.

Há diversos tipos de iluminações que podem ser utilizadas, sendo as mais comuns do tipo *Bar*, *Back Light*, *Dome*, *Coaxial*, *Ring Light*, entre outras. Combinações com diferentes tipos de iluminações podem ser criadas dependendo da aplicação. Na figura 3 são demonstradas iluminações do tipo *Bar* e *Back Light*.

Figura 3 – Iluminação *Bar* (a esquerda) e *Back Light* (a direita)



Fonte: (LOTS, 2021a) e (LOTS, 2021b).

A iluminação do tipo barra (*Bar*), fornece uma faixa de luz uniforme no produto a ser inspecionado, podendo ser utilizada para destacar uma região do produto. Já a iluminação de fundo (*Back*) projeta o perfil do produto, sendo utilizada para detectar ausência de furação ou verificação do contorno (LOTS, 2021a; LOTS, 2021b).

As iluminações do tipo Dome e Coaxial são apresentadas na figura 4, sendo a primeira utilizada para inspecionar superfícies brilhantes, curvas e irregulares, enquanto a coaxial é aplicada em superfícies brilhantes ou embalagens transparentes (LOTS, 2021d; LOTS, 2021c).

Figura 4 – Iluminação *Dome* (a esquerda) e Coaxial (a direita)



Fonte: (LOTS, 2021d) e (LOTS, 2021c).

As iluminações do tipo cúpula (*Dome*), fornecem luz uniformemente em vários ângulos, diminuindo o efeito do brilho e sombras, enquanto a iluminação Coaxial utiliza-se de espelhos para iluminar perpendicularmente o ponto de inspeção, através de raios de luz com angulação de 90 graus (LOTS, 2021d; LOTS, 2021c).

Iluminações do tipo anel (*Ring*), conforme figura 5, são aplicadas para inspeções em placas de circuitos impressos, etiquetas e microscópios. Além disso, conforme a angulação é possível branquear ou escurecer a borda para contrastar com o fundo da imagem (LOTS, 2022).

Figura 5 – Iluminação *Ring*

Fonte: (LOTS, 2022).

Também é possível utilizar-se de iluminações ultravioleta, infravermelho ou de diferentes cores. Também é possível a utilização de filtros com o objetivo reduzir ruídos ou destacar detalhes durante a aquisição de imagens. Um exemplo são os filtros polarizadores, quem permitem apenas a passagem de luz polarizada em uma direção específica. Com isso, reduzem a quantidade de ruído presente na imagem (EQUIPE FOTOGRAFIA MAIS, 2018).

A luz natural possui ondas eletromagnéticas que vibram em infinitos planos perpendiculares à direção da propagação do feixe luminoso, enquanto a luz polarizada se propaga em um único plano, favorecendo a eliminação de reflexos, o realçar das cores e melhor contraste. Além disso, a técnica de "polarização cruzada" consiste no uso de filtros polarizadores na iluminação e na câmera, permitindo maior flexibilidade no posicionamento da câmera. Ela é aplicada principalmente quando se deseja utilizar a câmera focada diretamente no objeto (EQUIPE FOTOGRAFIA MAIS, 2018).

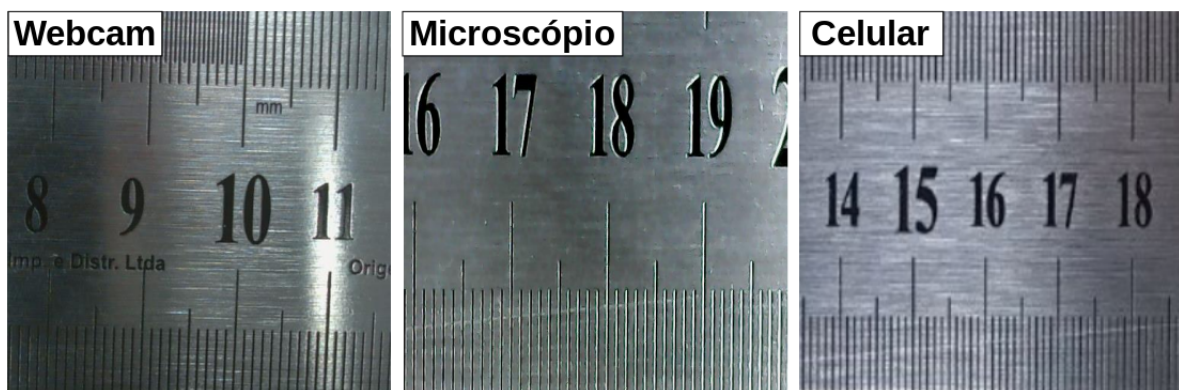
3 DESENVOLVIMENTO

Em um projeto de visão computacional é fundamental o levantamento das necessidades, condições, equipamentos e definição do que será inspecionado. Com isso, é possível definir a estrutura, iluminação, lente, câmeras, entre outros pontos.

3.1 DEFINIÇÃO ÓPTICA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas capturas de imagens com quatro dispositivos diferentes, sendo eles uma câmera industrial GigE, uma webcam, um microscópio de baixo custo e a câmera de um celular. Nas figuras 6 e 7 são apresentadas imagens adquiridas por cada dispositivo.

Figura 6 – Imagens adquiridas por webcam, microscópio e celular



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 6, são apresentadas imagens adquiridas pela webcam, microscópio e celular. É possível observar na imagem adquirida pela webcam que não há uniformidade da iluminação na imagem, uma vez que há um reflexo da luz no lado direito enquanto no lado esquerdo há uma quantidade menor de brilho.

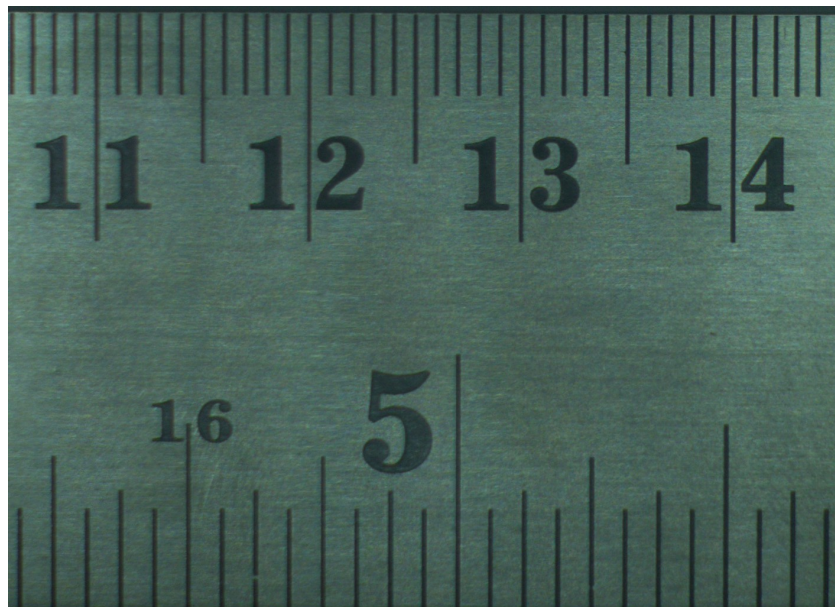
Já para a imagem adquirida pelo microscópio, figura 6, não apresenta reflexos e uma diferença grande de brilho na imagem, mas por outro lado as bordas dos traços apresentam ruídos, podendo dificultar a identificação correta dos traços.

Em comparação as outras duas imagens, a imagem adquirida pelo celular, figura 6, apresenta uma boa qualidade sem a presença de reflexos ou ruídos nas bordas dos traços. O único ponto é a permanência do foco da câmera, uma vez que dispositivos celulares, normalmente, possuem o ajuste do foco automático. Já a imagem presente na figura 7 é adquirida com a câmera industrial GigE, apresenta uniformidade da iluminação e traços bem definidos.

A aquisição das imagens apresentadas nas figuras 6 e 7 foi realizada com o objetivo de avaliar a qualidade dos traços e numerações e a presença de ruídos nas imagens, para determinar o melhor dispositivo. Levando esses fatores em consideração e analisando os resultados obtidos, determinou-se a utilização da câmera industrial. Com isso, a câmera industrial foi utilizada na definição óptica.

Durante a definição óptica foram realizados testes com lentes de diferentes tamanhos e aberturas da íris da lente. Simultaneamente era realizado a troca da iluminação, com o objetivo de eliminar os ruídos e destacar os itens que serão utilizados no processamento da imagem. Na figura 7, é apresentado o resultado final dos testes de definição óptica.

Figura 7 – Imagem final da definição óptica



Fonte: Elaborado pelo autor.

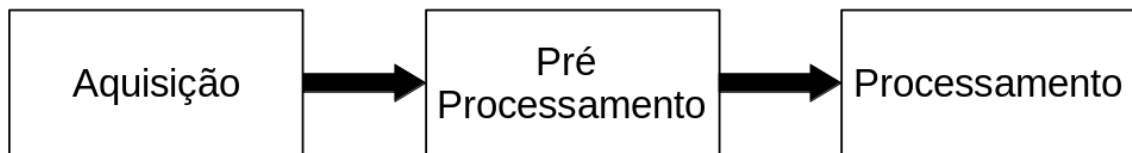
Os testes de iluminação e lentes com a câmera GigE foram realizados com o objetivo de uniformizar a iluminação, evitar reflexos e destacar os traços. Para isso, foi definido a utilização da iluminação do tipo anel (*Ring light*) juntamente com uma lente de 16 mm de abertura real e f/1.6 de abertura da íris.

Como a régua padrão foi fabricada em aço inox, para minimizar os reflexos da iluminação, também foi utilizado um filtro polarizador na lente da câmera e na iluminação. Com isso, foi possível reduzir o brilho/reflexo da iluminação em alguns pontos do instrumento de medição, uma vez que o filtro polarizador permite somente a passagem da luz em uma direção.

3.2 ETAPAS DO PROJETO DE VISÃO COMPUTACIONAL

Após a etapa de definição óptica, a execução de um projeto de software para a visão computacional é iniciado. Um projeto de visão computacional pode ser dividido em três etapas, conforme demonstrado na figura 8.

Figura 8 – Fluxo Visão Computacional



Fonte: Elaborado pelo autor.

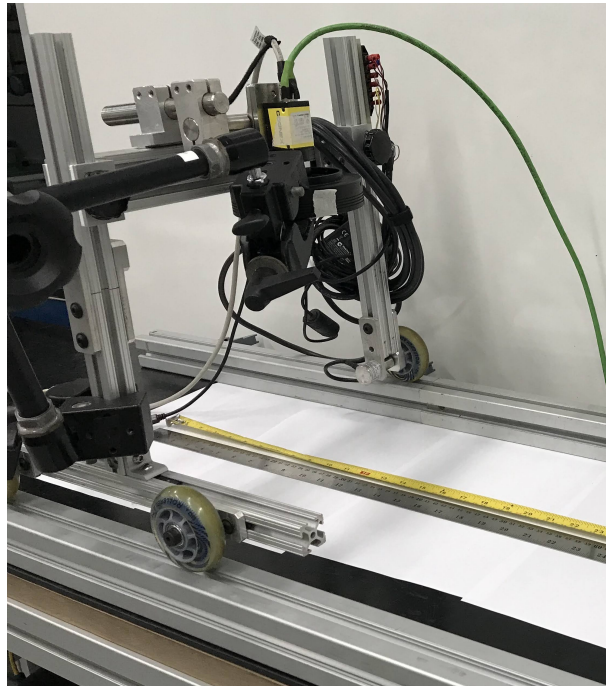
A primeira etapa trata-se da aquisição da imagem com a utilização dos equipamentos definidos anteriormente. A segunda etapa envolve o pré processamento da imagem. Nesta etapa são realizados ajustes no brilho, contrastes, remoção de distorções, aplicação de filtros, entre outras manipulações na imagem. Além disso, é nesta etapa que características importantes para as etapas seguintes são evidenciadas, como as bordas de um objeto ou região.

A última etapa do fluxo de um projeto de visão computacional é o processamento da imagem. Neste passo são realizadas detecções de objetos e/ou caracteres e cálculos (área de uma região, distâncias, entre outros) que possam gerar um resultado final. Cada uma dessas etapas é melhor apresentada nas subseções a seguir.

3.2.1 Aquisição das imagens

Esta etapa consiste na aquisição das imagens, utilizando os equipamentos definidos anteriormente, para execução das etapas seguintes do projeto. Para isto, foi realizada a montagem de uma estrutura que permitisse o deslocamento da câmera juntamente com a iluminação por toda a extensão da régua padrão e da trena, conforme demonstrado na figura 9.

Figura 9 – Estrutura para aquisição das imagens



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura é composta por duas guias modulares e um portal. As guias permitem o deslocamento do portal por toda a extensão da régua padrão e da trena, a câmera foi fixada na parte superior do portal utilizando-se de peças específicas e a iluminação foi fixada utilizando um braço articulado, conforme apresentado na figura 9. Tanto a câmera quanto a iluminação estão fixadas a uma distância de trinta centímetros da bancada.

3.2.1.1 Comunicação com a câmera

Como foi definido, a utilização da câmera industrial GigE para o desenvolvimento deste trabalho, para criar a comunicação com a câmera, configuração dos parâmetros e aquisição de imagens foi necessário a implementação da comunicação com a câmera utilizando o *Generic Interface for Cameras* (GenICam¹).

O GenICam é um padrão de interface de programação genérica para dispositivos de aquisição, mantido pela *European Machine Vision Association* (EMVA), com o objetivo de permitir a comunicação com dispositivos de visão/câmeras sem o uso de um protocolo específico de comunicação (EMVA, 2022).

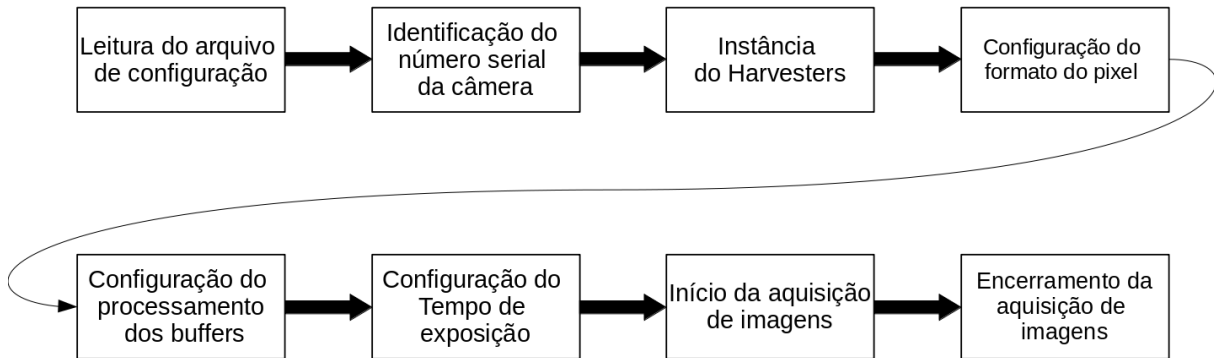
O GenICam é mantido pela EMVA e somente os associados possuem acesso ao código fonte. Por isso, para a implementação da comunicação com a câmera, foi utilizada a biblioteca *Harvesters*², sendo essa uma biblioteca em Python que permite a comunicação com dispositivos de visão através da interface do GenICam.

¹ <https://www.emva.org/standards-technology/genicam/introduction-new/>

² <https://harvesters.readthedocs.io/en/latest/>

Com isso, foi realizado o desenvolvimento de um script em Python, com base no fluxo apresentado na figura 10, permitindo a configuração de parâmetros, processamento dos buffers da câmera e o salvamento das imagens adquiridas.

Figura 10 – Fluxo do código de aquisição de imagens



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no fluxo apresentado na figura 10, a primeira etapa para iniciar a aquisição das imagens é a leitura do arquivo de configuração. O arquivo contém o caminho do diretório onde as imagens serão salvas, juntamente com o IP da câmera.

Para criar a instância da câmera através do Harvesters, é necessário informar uma das seguintes informações: ID, vendedor, modelo ou número serial da câmera. Com isso, foi implementada uma etapa para relacionar o endereço IP com o número serial da câmera.

Os formatos de pixels disponíveis para cada câmera podem ser diferentes para cada fabricante ou versão da câmera. Para a câmera utilizada neste trabalho, foi realizada a configuração do pixel no formato BayerRG8.

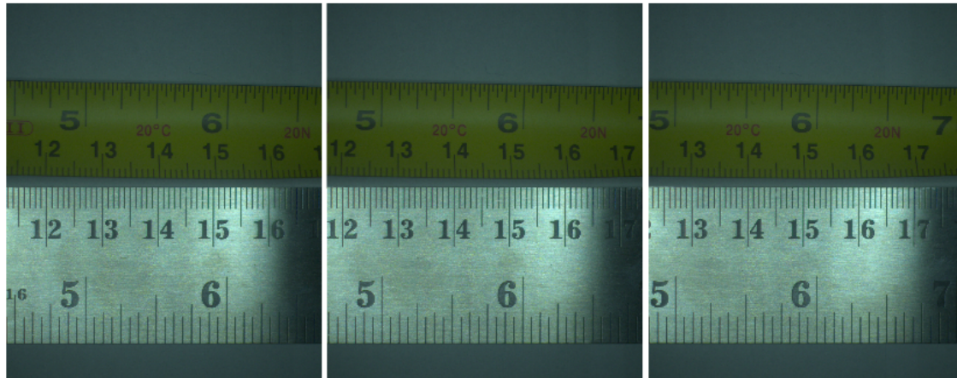
A etapa para configuração do processamento dos buffers consiste em definir qual será o processamento realizado após a obter o buffer. Para este trabalho, o buffer será transformado para as dimensões da imagem, seguido da conversão das cores do formato BayerRG8 para RGB, salvamento da imagem no diretório e por fim a liberação do buffer para ser utilizado novamente.

Já a etapa de configuração do tempo de exposição, permite ao usuário estipular o tempo que o obturador da câmera ficará aberto, permitindo que o sensor capte a luz. Em seguida, será iniciada a aquisição contínua de imagens até que o usuário determine o encerramento.

As imagens foram adquiridas continuamente durante o deslocamento do portal com a câmera industrial e a iluminação. Foram realizadas capturas de todas as indicações no decorrer de 1 metro. Ao total foram realizados dez deslocamento, com uma média de 382 imagens capturadas e quatro diferentes configurações de exposição da câmera. As imagens apresentadas na figura 11 demonstram o deslocamento do

portal na bancada.

Figura 11 – Sequência de três imagens adquiridas na etapa de aquisição



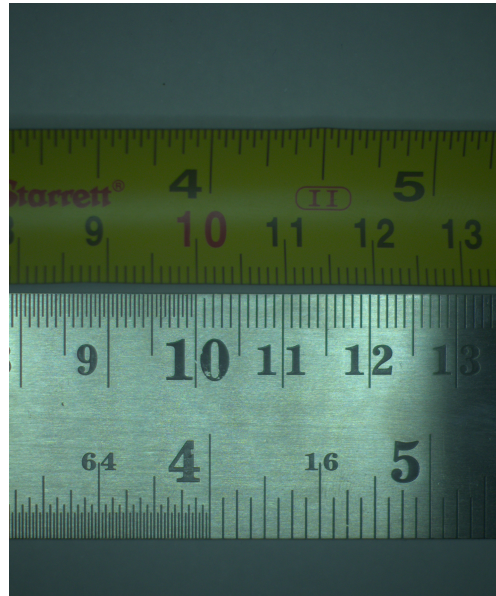
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base na sequência de imagens adquiridas, é possível perceber o deslocamento das marcações dos instrumentos de medição conforme o deslocamento manual do portal. Além disso, o processo foi realizado com deslocamento máximo de 1 metro devido as limitações físicas do ambiente e as condições de montagem da estrutura necessária.

3.2.2 Pré processamento das imagens

Com as imagens adquiridas na etapa anterior, a etapa seguinte é o pré processamento das imagens, de modo a reduzir os ruídos e destacar os traçados e números da régua padrão e da trena. A figura 12 demonstra a imagem de entrada da etapa de pré processamento e é utilizada para demonstrar os resultados de cada filtro aplicado no pré processamento.

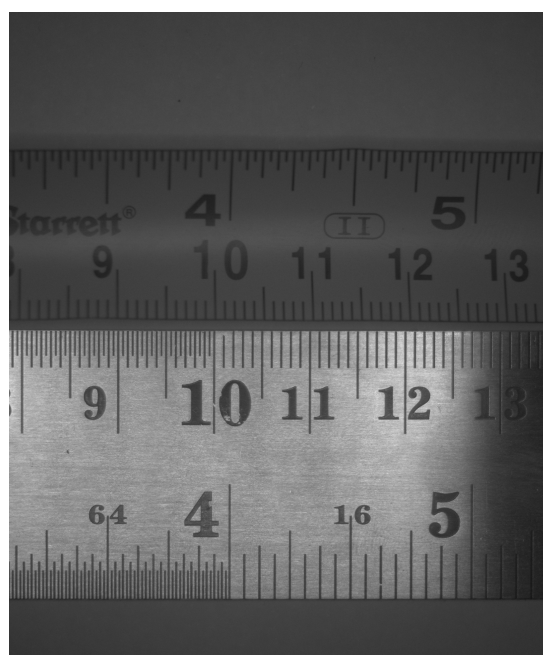
Figura 12 – Imagem adquirida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada imagem adquirida é salva no sistema de cor RGB (*Red, Green and Blue*) e a primeira manipulação é a conversão do sistema RGB para tons de cinza. A utilização da imagem em tons de cinza permite a redução da dimensão da imagem, uma vez que imagens RGB possuem três dimensões/canais de cores enquanto as imagens em tons de cinza são unidimensionais, e a maioria dos algoritmos disponíveis nas bibliotecas de processamento de imagens recebem como imagens de entrada imagens unidimensionais, ou seja, em tons de cinza.

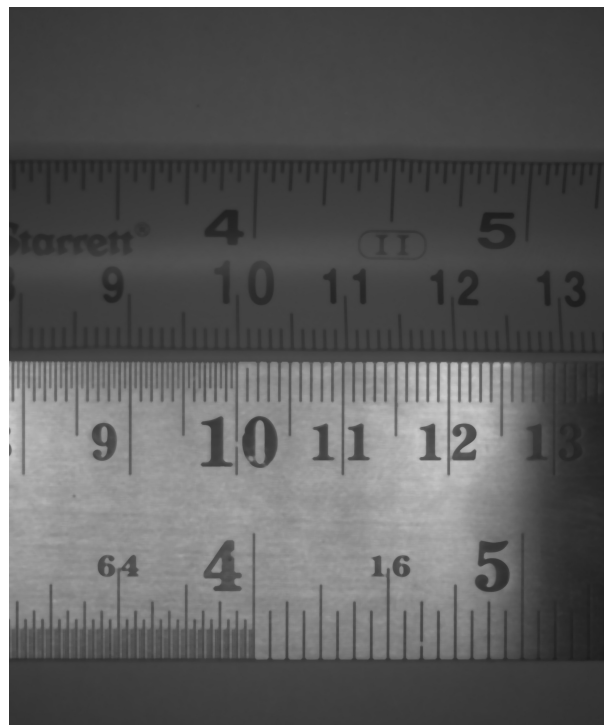
Figura 13 – Imagem tons de cinza



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a imagem em tons de cinza, são aplicados quatro filtros para remover detalhes e destacar os traços e numerações da régua padrão e da trena. O primeiro filtro aplicado tem como objetivo desfocar suavemente a imagem para remover detalhes de texturas dos instrumentos de medição. O resultado da aplicação deste filtro pode ser observado na figura 14, sendo possível observar melhor a remoção dos detalhes da textura entre as imagens em tons de cinza (figura 13) e a saída deste filtro (figura 14) se analisarmos a régua padrão.

Figura 14 – Imagem desfocada



Fonte: Elaborado pelo autor.

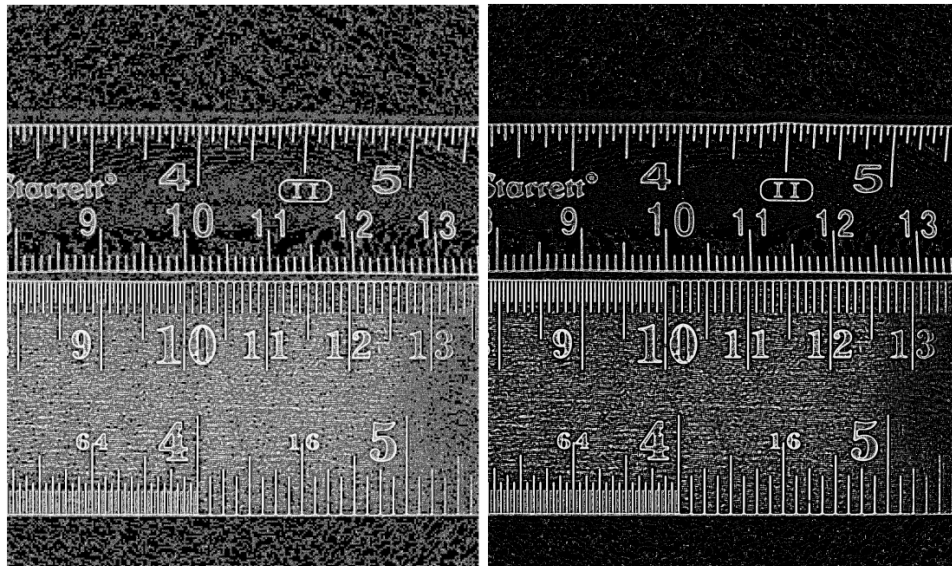
O próximo filtro é responsável por remover detalhes que não são necessários para o processamento da imagem, neste caso temos interesse em manter somente os traços e as marcações dos números tanto da trena quanto da régua padrão.

Analisando a imagem original (figura 12), verifica-se que tanto o traço quanto a numeração possuem uma cor única e sólida, sendo na cor preta na maioria dos casos e em vermelho somente a cada dezena da numeração da trena. Já na imagem em tons de cinza, figura 13, temos os dois itens na cor preta nos dois instrumentos de medição, com uma leve diferença de tonalidade.

Com isso, a técnica de *thresholding* é aplicada utilizando a imagem da figura 14 como entrada. Essa técnica consiste na segmentação dos tons de cinza com base em um valor fornecido. Em sua versão simples, cada valor de pixel é comparado com o valor do limiar. Se o valor do pixel for menor que o limite, ele será definido como 0, caso contrário, será definido como um valor máximo (OPENCV, 2022).

Já na técnica de threshold adaptativo³, a imagem é dividida em pequenas regiões e para cada região é calculado e utilizado um valor limitante do pixel. O comparativo das duas versões da técnica de threshold é demonstrado na figura 15 (OPENCV, 2022).

Figura 15 – Comparativo técnica threshold tradicional (a esquerda) e threshold adaptativo (a direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

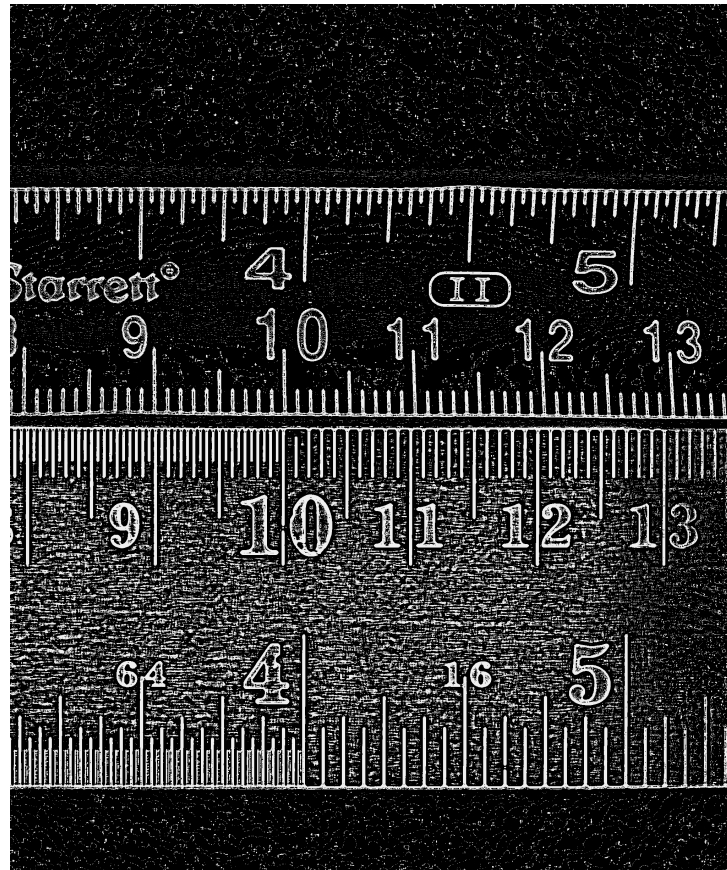
Na comparação das duas versões da técnica de threshold, em sua versão tradicional tem-se uma quantidade maior de ruídos em relação a versão adaptativa. Os ruídos são devido a variação da iluminação e o material dos instrumentos de medição, conforme o comparativo da figura 15. Com isso, temos diferentes regiões com brilhos. Em decorrência desse brilho, é possível observar, através da figura 14, que a trena possui uma faixa horizontal na parte superior da marcação dos números e a régua padrão possui vários pontos com diferentes brilhos. Esse efeito acontece devido a não uniformidade da iluminação utilizada e também da influência da iluminação do ambiente de onde as imagens foram adquiridas.

Outro ponto importante, é a variação dos resultados no processamento de diferentes imagens. O threshold adaptativo se mostrou mais eficiente na segmentação dos tons de cinza em diferentes imagens. Com isso, decidiu-se prosseguir com a utilização do threshold adaptativo.

O threshold adaptativo é aplicado após o desfoque da imagem, ou seja, é utilizada como imagem de entrada a imagem desfocada (figura 14). O resultado deste filtro é apresentado na figura 16.

³ https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html

Figura 16 – Imagem de saída filtro threshold adaptativo

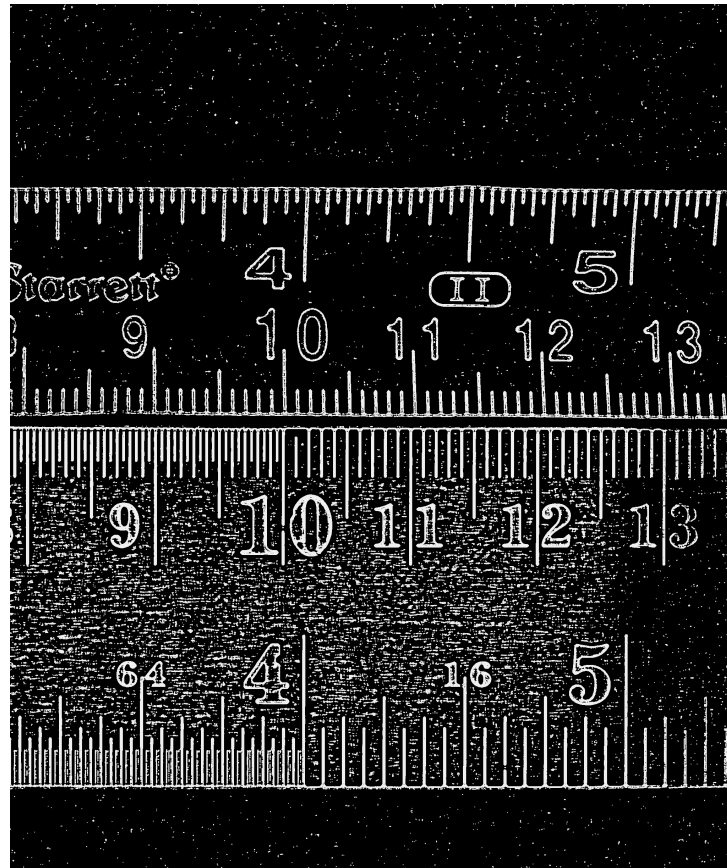


Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com a aplicação do filtro adaptativo a imagem de saída ainda possui bastante ruído, principalmente na região da régua padrão. Observa-se também a inversão das cores devido o modo configurado na função do filtro adaptativo.

Os dois últimos filtros são aplicados em conjunto com o objetivo de minimizar os ruídos, sendo aplicados filtros morfológicos de erosão e abertura. A erosão possui como objetivo reduzir as regiões em branco da imagem, enquanto a abertura é a combinação da erosão seguida da dilatação da região final. A figura 17 apresenta o resultado da aplicação dos desses filtros.

Figura 17 – Imagem de saída filtro morfológico

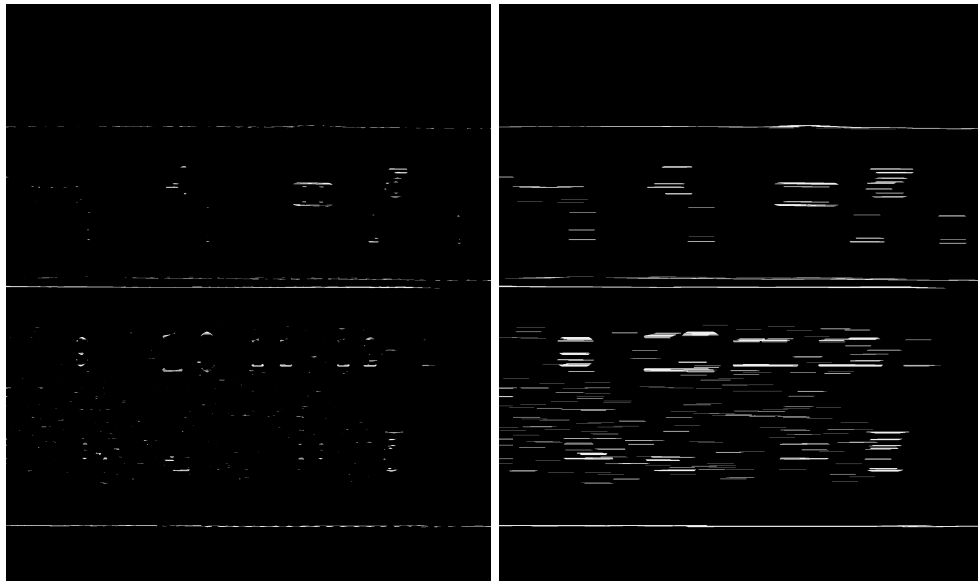


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a aplicação dos filtros morfológicos, é possível comparar as figuras 16 e 17 observando a diminuição dos ruídos na imagem. A aplicação dos dois filtros com um efeito maior na redução dos ruídos impacta na definição dos traços e numerações. Como estes são características importantes para as etapas seguintes, optou-se por minimizar os ruídos de forma a não afetar o desenho dos traços e das numerações.

A próxima etapa do pré processamento ainda tem como objetivo remover os ruídos, principalmente, na região entre a trena e a régua padrão. Além de determinar as exterminadas de cada instrumento de medição. Para isso, são aplicados os filtros de erosão e dilatação. O primeiro filtro será responsável por remover todos detalhes, enquanto o segundo irá dilatar as regiões restantes, conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 – Imagens para identificação das extremidades (Erosão a esquerda e dilatação a direita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme as imagens da figura 18, o primeiro filtro (erosão) é aplicado intensivamente com o objetivo de remover os pequenos e médios detalhes dos dois instrumentos de medição. Na imagem de resultado da erosão, é aplicado o segundo filtro para dilatar os contornos restantes, possibilitando o destaque maior dessas regiões.

O resultado final da aplicação dos dois filtros pode ser observado na imagem a direita da figura 18. Esta imagem é utilizada para determinar as regiões entre o início da imagem até a trena, entre os instrumentos de medição e a região após a régua padrão até o final da imagem. Vale ressaltar que as coordenadas da imagem iniciam-se no canto superior esquerdo da imagem.

Os contornos dilatados são ordenados por área de forma decrescente, em seguida é determinada uma linha com base nos pontos das extremidades e o cálculo do centro geométrico (centroide). Com isso, os contornos são separados em dois grupos com base na coordenada do eixo Y. O primeiro grupo contém os contornos das extremidades superiores e inferiores, enquanto o segundo grupo armazena somente os contornos que possuem a coordenada do eixo Y dentro de um intervalo definido.

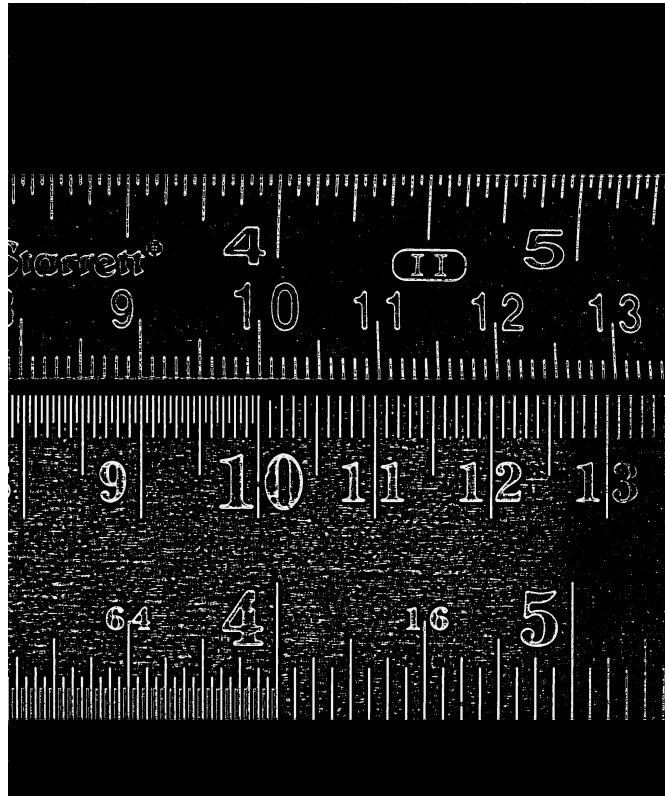
O primeiro grupo é novamente ordenado, só que dessa vez em ordem crescente e pela coordenada do eixo Y. Com isso, o primeiro contorno refere-se a extremidade superior da trena, enquanto o último é referente a extremidade inferior da régua padrão.

A extremidade inferior da trena e superior da régua padrão é definida com base no segundo grupo. Como todos os contornos foram ordenados de forma decrescente por área, são utilizados os dois primeiros contornos desse grupo para definir as extremidades restantes.

Com os contornos das extremidades determinados, são utilizadas as

coordenadas do eixo Y das linhas, definidas com base nas extremidades de cada contorno, para remover os ruídos do início da imagem até a linha superior da trena, entre a linha inferior da trena e a superior da régua padrão e da linha inferior da régua padrão até o fim da imagem. Com isso, os ruídos dessas regiões são removidos da figura 17 e o resultado da remoção dos ruídos das três regiões é apresentado na figura 19.

Figura 19 – Imagem final pré processamento

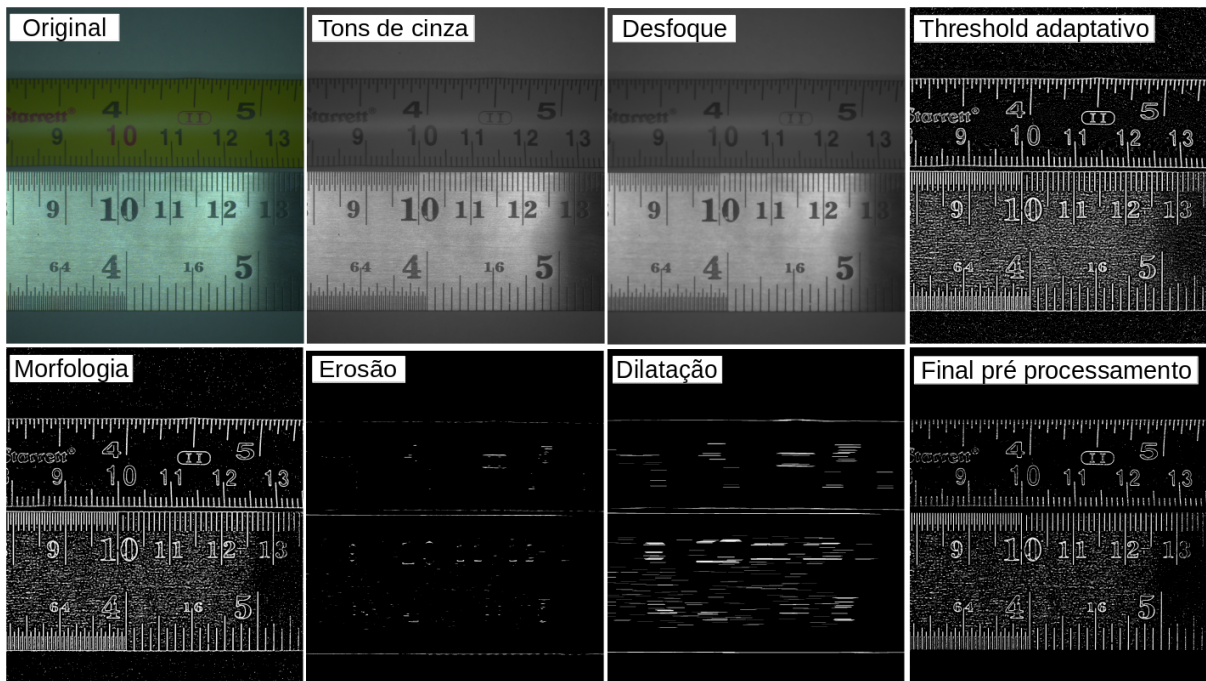


Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 19 é a imagem final da etapa de pré processamento, sendo essa imagem a utilizada para identificação dos contornos, centro dos traços na etapa seguinte de processamento.

A figura 20, apresenta todas as etapas/filtros aplicados com o objetivo de reduzir ruídos e destacar as marcações numéricas e traços dos instrumentos de medição. Com isso, prossegue-se para a etapa de processamento da imagem, onde é realizada a identificação dos traços junto com o reconhecimento da numeração correspondente.

Figura 20 – Etapas de pré processamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Processamento das imagens

Após o pré processamento da imagem, com a remoção de ruídos e o destaque dos traços, são realizadas manipulações na imagem, cálculos matemáticos para identificação dos traços juntamente com o reconhecimento da numeração de cada traço da régua padrão e da trena. O processamento da imagem inicia-se com o reconhecimento do contorno dos traços dos instrumentos de medição.

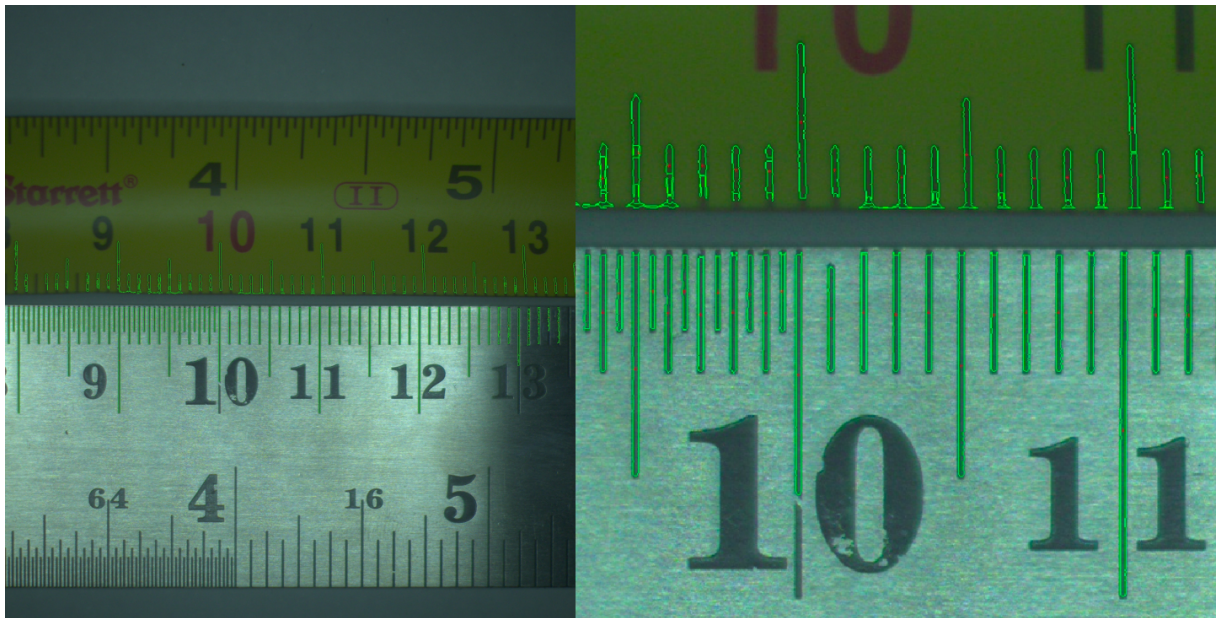
3.2.3.1 Reconhecimentos do contorno das graduações

A figura 19 é utilizada para a identificação dos contornos de cada traço tanto da trena quanto da régua padrão, sendo o resultado apresentado na figura 21. Os contornos são identificados através da função *findContours()* do OpenCV, que retorna uma lista com todos os contornos encontrados na imagem e a hierarquia deles, sendo esta desconsiderada.

Para cada contorno identificado na imagem, é calculada a área e o centro geométrico (centroide). A área é calculada através da função *contourArea()* do OpenCV, enquanto as coordenadas do centroide são determinadas através do momento do contorno. A função *moments()* do OpenCV, é utilizada para obter os momentos. Com isso, a coordenada X do centroide é obtida pela divisão do momento M_{10} pelo M_{00} , já para a coordenada Y o momento M_{01} é dividido pelo M_{00} . Essas informações são utilizadas para determinar o contorno correspondente ao traço dos instrumentos

de medição, ou seja, são definidos valores mínimos e máximos para área e para a coordenada Y do centroide. Com isso, é possível determinar os traços dos instrumentos de medição e remover ruídos.

Figura 21 – Imagem com os contornos dos traços



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar na figura 21, que os contornos externos de todos os traços foram identificados. Porém os contornos dos traços da trena apresentam uma quantidade maior de ruído e deformações quando comparado com a régua padrão. Esses itens podem ser observados na imagem a esquerda da figura 21.

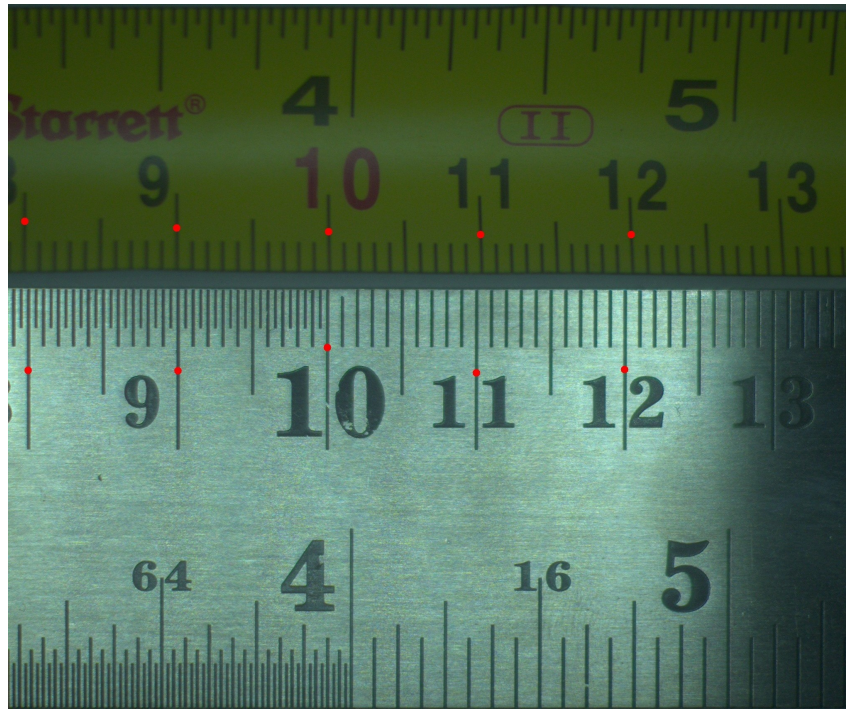
Analisando os contornos dos traços da régua padrão (figura 21) na indicação de dez centímetros e a marcação seguinte, são encontrados dois defeitos de fabricação na marcação dos traços. O primeiro possui uma falha na gravação ao longo do comprimento do traço, segmentando o traço em duas partes e impossibilitando a detecção do contorno por completo, e o segundo defeito é na gravação do traço com a borda da régua padrão.

Ambas as falhas encontradas na figura 21 não impactam a continuidade do processamento, uma vez que somente as indicações das dezenas serão consideradas para a continuidade do processamento e na indicação de dez centímetros o defeito impacta o valor do centroide no eixo Y. Caso, a coordenada do eixo Y do centroide não estivesse dentro dos limites máximos e mínimos definidos anteriormente, o contorno do traço seria desconsiderado.

Com todos os contornos identificados, é realizada a filtragem dos traços com base no valor da área e na coordenada do centroide no eixo Y. A área é utilizada para filtrar os traços que compõem as dezenas de cada instrumento de medição, enquanto

a coordenada do centroide no eixo Y serve para filtrar possíveis ruídos e a separação dos contornos da régua padrão e da trena, devido a diferença do posicionamento. O resultado desse processamento pode ser observado figura 22.

Figura 22 – Imagem com traços filtrados



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 22 apresenta os traços da régua padrão e da trena identificados neste processo. As coordenadas dos traços são utilizadas nas próximas etapas para identificação da numeração correspondente de cada traço e o cálculo das distâncias.

Os traços de indicação da régua padrão e da trena são separados e ordenados em ordem crescente de acordo com as coordenadas dos centroides no eixo X. A partir desse momento os processamentos seguintes são realizados individualmente para cada instrumento de medição, devido características específicas dos instrumentos.

Um exemplo de característica específica de cada instrumento de medição seria o tamanho da indicação da numeração dos traçados. Conforme demonstrado na figura 22, a trena possui uma numeração menor em relação a régua padrão.

3.2.3.2 Identificação da numeração das graduações

A próxima etapa de processamento é o reconhecimento da indicação numérica de cada traço, para isso é realizado o reconhecimento ótico de caracteres (OCR, na sigla em inglês para *Optical Character Recognition*). Para a realização deste processamento, é utilizado o *Tesseract Open Source OCR Engine*⁴; neste trabalho

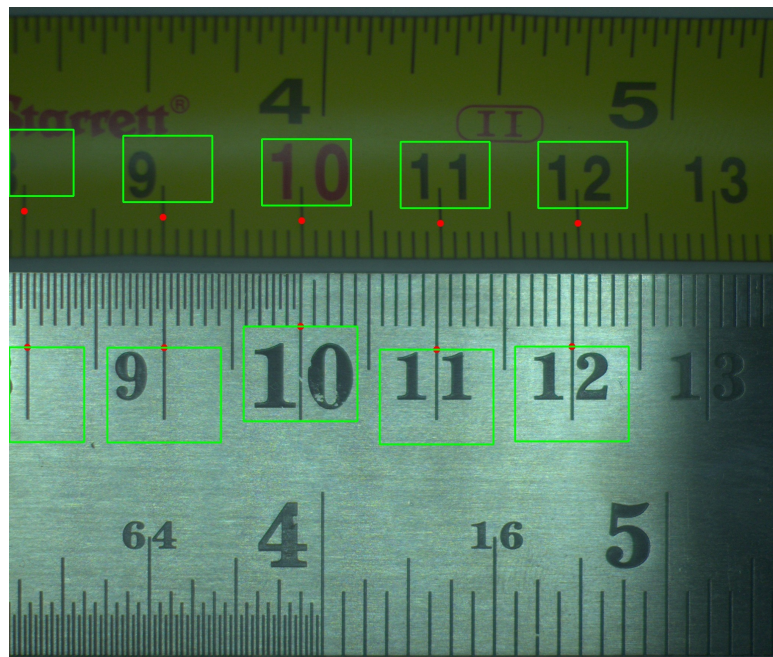
⁴ <https://tesseract-ocr.github.io/>

chamado simplesmente de Tesseract, através da biblioteca Python-tesseract⁵.

Durante as tentativas de reconhecimento das indicações várias abordagens foram utilizadas para realizar o reconhecimento das indicações; como um único processamento da imagem adquirida/original (figura 12), único processamento da imagem final de pré processamento (figura 19), região com a numeração da trena e da régua padrão, entre outras. Todas essas abordagens tiveram, como resultado do processamento do OCR, uma quantidade expressiva de ruídos com caracteres inválidos, *string* vazias e que não condiziam com a indicação.

Uma vez que as coordenadas de cada traço estão no centro da indicação numérica, decidiu-se realizar o recorte da região em volta da numeração. Com isso, para cada instrumento de medição foram estipulados valores de margens de forma a desenhar um retângulo em volta da numeração, conforme apresentado na figura 23.

Figura 23 – Imagem da região da indicação numérica

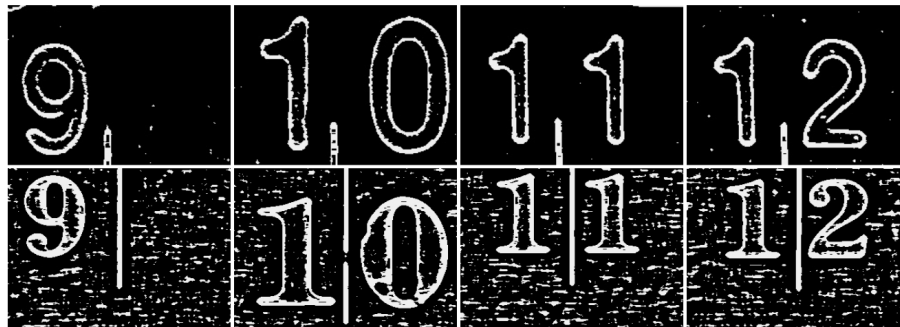


Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada região desenhada na figura 23 é utilizada no reconhecimento da numeração de cada traço dos instrumentos de medição. Outra particularidade para o reconhecimento dos caracteres está na utilização de imagens diferentes para o recorte da região. Para a trena foi utilizada a imagem final de pré processamento (figura 19). Já para a régua padrão foi utilizada a imagem adquirida/original (figura 12). O motivo desta decisão pode ser observado na figura 24.

⁵ <https://github.com/madmaze/pytesseract>

Figura 24 – Comparativo da região da indicação numérica recortando a imagem final do pré processamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 24, são demonstradas as regiões recortadas da imagem final do pré processamento (figura 19), na parte superior da imagem são apresentadas as regiões da trena e na parte inferior da imagem as regiões da régua padrão.

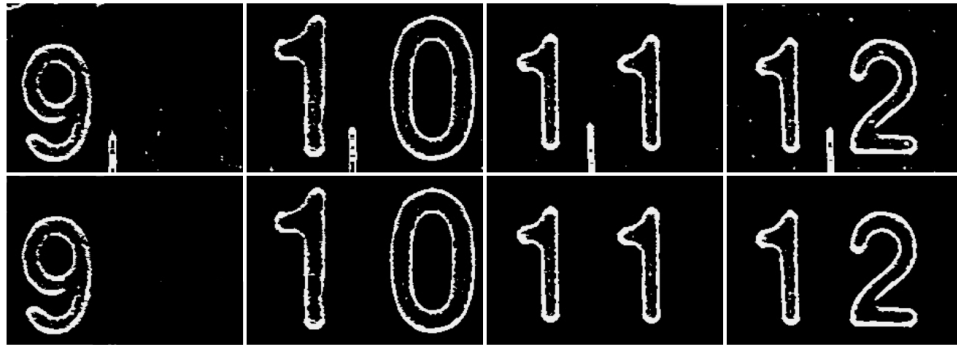
As regiões da régua padrão, imagens inferiores da figura 24, possuem uma expressiva quantidade de ruído mesmo após a aplicação de diversos filtros na etapa de pré processamento. Foram realizadas tentativas de minimizar os ruídos, com a aplicação de outros filtros, identificação dos contornos menores e o preenchimento dessas regiões, mas não surtiram efeito expressivo no reconhecimento dos caracteres.

A alternativa que apresentou melhores resultados no reconhecimento dos caracteres da régua padrão foi a utilização da imagem original, figura 12, para identificação das numerações de cada traço.

Como dito anteriormente, para a trena foi definida a utilização da imagem de saída do pré processamento (figura 19) para o recorte da região da numeração e a identificação dos caracteres. Porém, com a aplicação do reconhecimento de caracteres, os resultados obtidos apresentaram ruídos e caracteres inválidos, principalmente, pelo aparecimento de parte do traço entre a numeração.

Para resolver este problema, foi decidido aplicar filtros que identificassem e preenchessem as regiões de ruído e a parte do traço aparente na região. Esse processamento envolveu o reconhecimento dos contornos externos dessas regiões, seguido de uma etapa de filtragem com base na área do contorno e, por fim, o preenchimento de cada contorno com pixels pretos.

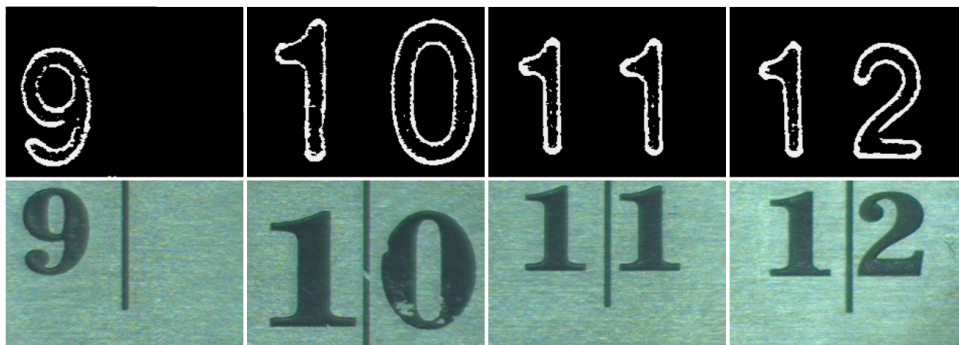
Figura 25 – Processamento da imagem de entrada da trena para reconhecimento de caracteres



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 25, a parte superior da imagem representam o recorte da região de interesse da figura 19 antes do ajuste. Já a parte inferior, demonstra a remoção de pequenos ruídos existentes e a parte do traço aparente. Com isso, a figura 26 demonstra as imagens de entrada utilizadas para a régua padrão e para a trena.

Figura 26 – Imagem de entrada reconhecimento de caracteres



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 26, temos na parte superior as imagens de entrada para identificação dos caracteres da trena, enquanto na parte inferior da imagem as regiões da régua padrão. Devido a característica das imagens, a configuração do Tesseract foi realizada de modo a considerar somente caracteres/dígitos de 0-9 e o texto da imagem como uma única e simples linha de texto.

Aplicando o OCR nas imagens, o Tesseract retorna a quantidade de regiões detectadas, os números da página, bloco, parágrafo, linha e o da palavra. Além das coordenadas e tamanho do retângulo onde o carácter se encontra, assim como, o nível de confiança e o texto detectado por região.

Com o resultado do OCR de cada numeração presente na figura 26, as regiões são filtradas, sendo mantidas aquelas que apresentam nível de confiança maior que 60%. Caso duas ou mais regiões apresentem nível de confiança maior que 60%, somente a de maior valor de confiança é mantida. Em seguida, é realizada uma

verificação para confirmar se o texto reconhecido representa um número. Com isso, a numeração do traço em análise é definida.

O cenário ideal seria a detecção e reconhecimento de todas as numerações, de cada traço, tanto da régua padrão quanto da trena com um nível de confiança alto. Porém, devido as características construtivas de cada instrumento de medição, diferença de iluminação e outros efeitos/ruídos nem todos os traços foram detectados e reconhecidos.

Uma alternativa para reduzir o problema no reconhecimento dos caracteres, seria o treinamento da fonte utilizada pelo Tesseract com base na fonte utilizada nos caracteres dos dois instrumentos de medição. Porém, o treinamento de uma nova fonte não seria genérica para outros instrumentos de medição, somente se fosse realizado o treinamento da fonte de diversos instrumentos de medição. Para tornar a aplicação genérica, sem vínculo com instrumentos de medição ou fontes, e o fato de que neste trabalho estão sendo reconhecidos números sequenciais, optou-se por uma alternativa para solucionar/reduzir o problema.

A alternativa escolhida foi a inferência das numerações com base nas coordenadas do eixo X do centroide de cada traço. Para os traços detectados pelo Tesseract, foram analisados os traços antecedentes e posteriores. Aqueles que não tiveram a numeração identificada por meio do OCR tiveram o valor atribuído com base na sequência numérica.

A inferência somente é realizada se pelo menos um traço tiver a sua numeração reconhecida pelo Tesseract. Caso nenhum ponto seja reconhecido, não será possível prosseguir com a inferência, uma vez que não há nenhum referencial.

3.2.3.3 *Consolidação dos resultados*

Com os traços detectados e o reconhecimento das numerações, com base no processamento da figura 12, é possível realizar o cálculo das distância dos traços entre a régua padrão e a trena. Com isso, na tabela 1 são apresentadas as coordenadas no eixo X de cada indicação dos instrumentos de medição.

Tabela 1 – Coordenadas do eixo X dos instrumentos de medição

Indicação (cm)	Régua padrão (pixels)	Trena (pixels)
8	48	40
9	409	406
10	769	772
11	1128	1138
12	1485	1501

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados na tabela 1, é possível realizar o cálculo de erro de indicação, em pixels, para os cinco traços. O erro de indicação (E) é calculado

da seguinte forma (Equação 1):

$$E = I - VC \quad (1)$$

Na equação 1, o erro de indicação é representado pela letra E , enquanto o I representa o valor indicado pelo instrumento de medição em processo de calibração e o VC é o valor convencional, ou seja, o valor indicado pelo instrumento de medição utilizado como padrão. Com isso, a tabela 2 apresenta os valores calculados do erro de indicação para cada traço reconhecido.

Tabela 2 – Erros de indicação

Indicação (cm)	Erro de indicação (pixels)	Estimativa do erro de indicação em milímetros
8	-8	-0,223
9	-3	-0,084
10	3	0,084
11	10	0,279
12	16	0,446

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os dados apresentados na tabela 2, todas as indicações apresentam erros, seja positivo ou negativo. A estimativa do erro de indicação em milímetros, foi determinada através da distância média dos traços da régua padrão apresentada na tabela 3.

Vários fatores podem afetar o cálculo do erro de indicação desde o posicionamento dos instrumentos de medição, aplicação da tensão, resolução do dispositivo óptico, entre outros. No caso deste trabalho, fatores como iluminação, posicionamento e distância da câmera e o uso excessivo de filtros e processamento da imagens também afetam o resultado. Principalmente, devido ao fato de que os pixels são números inteiros. Com isso, quanto maior a distância da câmera dos instrumentos de medição ou menor a resolução da imagens, menos pixels serão utilizados para construir a imagem e conseqüentemente realizar os cálculos da distância dos traços e do erro de indicação. Além disso, todos os cálculos de áreas e coordenadas do centroide sofrem arredondamento para serem expressos em pixels, ou seja, números inteiros.

Ainda com base nos dados apresentados na tabela 1, também é possível realizar o cálculo da distância, em pixels, dos traços de cada instrumento de medição. Conforme é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Distância entre os traços dos instrumentos de medição

Indicação (cm)	Régua padrão (pixels)	Trena (pixels)
8 - 9	361	366
9 - 10	360	366
10 - 11	359	366
11 - 12	357	363
Média	359	365

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os dados apresentados na tabela 3, pode-se perceber que a trena possui, em maioria, 366 pixels de distância entre dois traços. Somente a distância entre as indicações de onze e doze centímetros apresenta um valor diferente, sendo de 363 pixels. Essa diferença pode estar relacionada com a diferença de iluminação em todo o instrumento de medição e a distorção das bordas geradas pela lente da câmera.

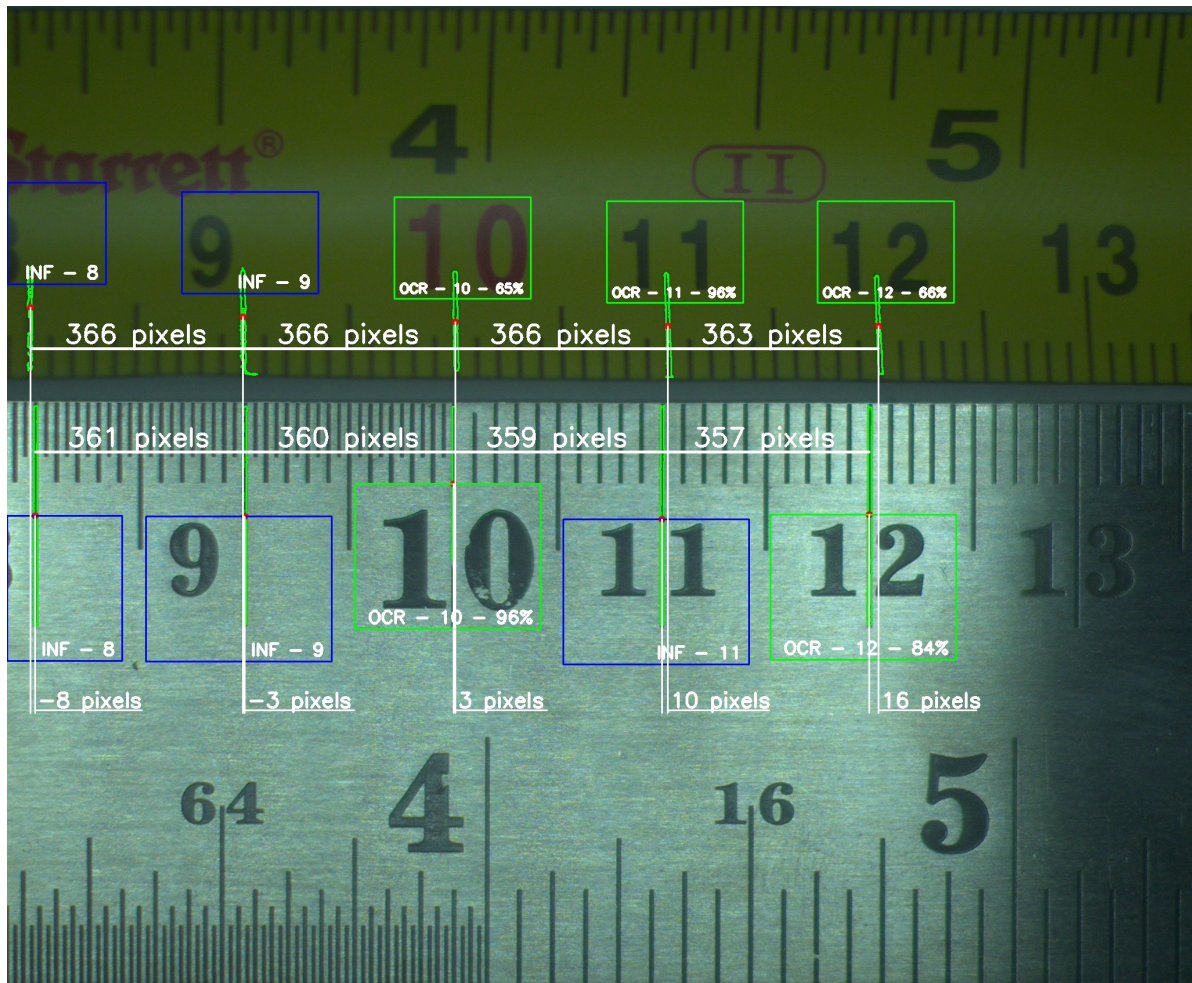
Analisando os dados da régua padrão, as distâncias entre dois traços apresentadas na tabela 3 possuem valores diferentes em todos os casos. Desde a etapa de pré processamento, a régua padrão sempre apresentou uma quantidade expressiva de ruídos devido a diferença da iluminação em toda a região do instrumento de medição.

Com a finalização dos cálculos, a última fase do processamento consiste em reunir todos os dados obtidos ou calculados e exibi-los de forma conjunta na imagem para a avaliação do operador. Nesta etapa de validação são apresentados os seguintes itens:

- Contorno do traço;
- Centro do traço;
- Região utilizada para identificação da numeração;
- Processo utilizado para determinar a numeração;
- Numeração identificada;
- Nível de confiança do OCR na identificação da numeração;
- Distância entre os traços de cada instrumento de medição;
- Erro de indicação.

Com base em todas as manipulações realizadas até o momento utilizando a figura 12 como imagem de entrada, pode-se observar todos os resultados obtidos e demonstrados através do validador na figura 27.

Figura 27 – Imagem do validador



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da figura 27 é possível observar todas as regiões de interesse e cálculos realizados durante a etapa de processamento. As regiões utilizadas na identificação da numeração podem apresentar três diferentes cores. A cor verde representa que o OCR foi o processo utilizado para reconhecimento da numeração, enquanto a cor verde representa a inferência e a cor vermelha que não foi possível identificar a numeração.

Além disso, para cada região é demonstrado o método de reconhecimento da numeração, o valor identificado e a confiança do reconhecimento. Por exemplo, a região da marcação de onze centímetros da trena contém o seguinte texto "OCR - 11 - 96%", apresentada na parte superior da figura 27. Portanto, o OCR identificou a numeração como onze e com 96% de certeza no reconhecimento da numeração.

Já a marcação de onze centímetros da régua padrão contém o texto "INF - 11", apresentada na parte inferior da figura 27. Neste caso, o reconhecimento da numeração foi determinada como onze através da inferência. Nas situações onde não é possível determinar a marcação por meio do OCR ou inferência, a legenda será apresentada como "NF" de *Not Found*.

Também são demonstradas na figura 27, o erro de indicação para cada traço dos instrumentos de medição (tabela 2) e a distância entre os traços (tabela 3). Com isso, tem-se a diferença entre a trena e a régua padrão para cada marcação identificada corretamente no processamento.

Todos os passos de processamento foram realizados e conseqüentemente o fluxo de execução de um projeto de visão computacional é finalizado. Com o objetivo de analisar os resultados obtidos em uma amostra maior de imagens e que contenha a maioria das marcações dos instrumentos de medição, no Apêndice A são apresentados detalhes sobre a análise do resultado do processamento.

3.2.3.4 Análise estatística dos resultados do processamento da amostra de imagens

O objetivo dessa seção será extrair, resumir e discutir os dados presentes nas imagens do Apêndice A. Com isso, é realizada uma análise separadamente para cada instrumento de medição da quantidade de traços e numerações identificadas, quantidade de numerações identificadas por cada método, além da média das distância entre traços para cada instrumento de medição e o erro de indicação.

Os dados foram divididos em quatro tabelas. As duas primeiras tabelas (4 e 5) apresentam a quantidade de contornos dos traços identificados corretamente ou incorretamente/não identificados, total de traços, quantidade de numerações detectados corretamente ou incorretamente por cada métodos (OCR e inferência) e a quantidade de numerações não determinadas (NF), sendo a primeira tabela referente a trena e a segunda a régua padrão. A primeira tabela, com os dados da trena, pode ser observada a seguir.

Tabela 4 – Resumo da detecção de traços e numerações na trena

Imagem	Trena									
	Traços		Total de traços	OCR		INF		NF	Total	
	OK	NOK		OK	NOK	OK	NOK		OK	NOK
1	3	3	6	2	0	1	0	0	3	0
2	5	0	5	1	0	4	0	0	5	0
3	5	1	6	3	0	2	0	0	5	0
4	5	1	6	5	1	0	0	0	5	1
5	6	0	6	5	0	1	0	0	6	0
6	4	1	5	2	0	2	0	0	4	0
7	6	0	6	3	0	3	0	0	6	0
8	6	0	6	2	0	4	0	0	6	0
9	5	0	5	4	0	1	0	0	5	0
10	6	0	6	3	0	3	0	0	6	0
11	5	0	5	4	0	1	0	0	5	0
12	3	2	5	3	0	0	0	0	3	0
13	6	0	6	4	0	2	0	0	6	0
14	5	0	5	1	2	0	2	0	1	4
15	5	1	6	2	2	1	0	0	3	2
16	4	1	5	3	0	1	0	0	4	0
17	5	0	5	4	0	1	0	0	5	0
18	6	0	6	5	1	0	0	0	5	1
19	4	2	6	3	0	1	0	0	4	0
20	5	1	6	4	0	1	0	0	5	0
Total	99	13	112	63	6	29	2	0	92	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os dados apresentados na tabela 4, tem-se que as imagens da amostra possuem ao total 112 traços, sendo que 99 foram detectados corretamente, enquanto 13 não foram detectados ou foram detectados incorretamente, como o caso das imagens 4 e 5 apresentado e discutido no Apêndice A.

O OCR foi o método que mais identificou as numerações, tendo identificado 63 corretamente e 6 incorretamente. Foram rotuladas 29 identificações corretas e 2 incorretas por meio da inferência. Além disso, em todas as imagens da amostra, pelo menos um traço foi identificado pelo OCR, com isso não foram contabilizadas numerações como *Not Found* (NF).

Do total de traços existentes na trena nas imagens da amostra, 100 traços tiveram a numeração identificada, sendo 92 corretamente e 8 incorretamente. Transformando esses dados em porcentagem, foram identificadas com sucesso as numerações de 82,1% dos traços por meio do OCR ou inferência, enquanto 10,8% dos traços não tiveram a numeração identificada e 7,1% não tiveram sucesso na identificação, totalizando 17,9% dos traços com problema na identificação da numeração.

Tabela 5 – Resumo da detecção de traços e numerações na régua padrão

Imagem	Trena									
	Traços		Total de traços	OCR		INF		NF	Total	
	OK	NOK		OK	NOK	OK	NOK		OK	NOK
1	5	1	6	4	0	1	0	0	5	0
2	5	0	5	1	0	4	0	0	5	0
3	5	1	6	2	0	3	0	0	5	0
4	5	1	6	1	0	4	0	0	5	0
5	5	1	6	1	0	4	0	0	5	0
6	5	0	5	2	0	3	0	0	5	0
7	5	1	6	4	0	1	0	0	5	0
8	6	0	6	4	0	2	0	0	6	0
9	5	0	5	4	0	1	0	0	5	0
10	5	1	6	0	1	0	4	0	0	5
11	4	1	5	1	0	3	0	0	4	0
12	4	1	5	3	0	1	0	0	4	0
13	5	1	6	4	0	1	0	0	5	0
14	5	0	5	3	0	2	0	0	5	0
15	6	0	6	3	0	3	0	0	6	0
16	5	0	5	3	0	2	0	0	5	0
17	6	0	6	0	0	0	0	6	0	6
18	5	1	6	2	0	3	0	0	5	0
19	5	1	6	2	0	3	0	0	5	0
20	5	1	6	1	1	2	1	0	3	2
Total	101	12	113	45	2	43	5	6	88	13

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da trena padrão, conforme os dados apresentados na tabela 5, existem 113 traços nas imagens da amostra, sendo que 101 foram detectados corretamente, enquanto 12 não foram detectados ou foram detectados incorretamente. Possuindo uma diferença mínima em relação ao caso anterior.

Por outro lado, a quantidade de numerações identificadas pelo OCR e pela inferência foram extremamente próximos, com uma diferença de duas numerações a mais identificadas pelo OCR. No caso da trena, o OCR foi predominante, tendo identificado o dobro de numerações em relação a inferência.

Diferente da trena, na régua padrão teve-se um caso onde nenhum dos traços existentes na imagem foram identificados pelo OCR. Conseqüentemente, não é possível determinar a ordem e a numeração através da inferência. Com isso, todos os traços são classificados como *Not Found* (NF). Sendo o caso da imagem 17 do Apêndice A, onde os seis traços presentes na imagem não foram identificados e foram classificados como *Not Found*.

Do total de traços existentes na régua padrão das imagens da amostra, 101 traços tiveram a numeração identificada, sendo 88 corretamente e 13 incorretamente.

Transformando esses dados em porcentagem, foram identificadas com sucesso as numerações de 77,9% dos traços por meio do OCR ou inferência, enquanto 10,6% dos traços não tiveram a numeração identificada e 11,5% não tiveram sucesso na identificação, totalizando 28,5% dos traços com problema na identificação da numeração.

Com isso, tem-se que a detecção dos traços apresentou, praticamente, o mesmo resultado nos dois instrumentos de medição, com uma eficiência de 88,4% para a trena e 89,4% para a régua padrão. Porém, a identificação da numeração dos traços foi mais eficiente de forma global na trena, com 82,1% das numerações identificadas contra 77,9% da régua padrão. Analisando a eficiência do OCR na identificação da numeração, a trena foi o instrumento de medição que apresentou o melhor resultado, com 63 numerações identificadas contra 45 da régua padrão.

Com o OCR, também é possível analisar o nível de confiança na identificação das numerações. Com isso, na tabela 6 são apresentados os níveis de confiança médio para os dois instrumentos de medição em cada imagem da amostra.

Tabela 6 – Comparação do nível de confiança médio do OCR entre os instrumentos de medição

Imagem	Nível de confiança (OCR) da Trena (%)	Nível de confiança (OCR) da Régua padrão (%)
1	78,00	97,75
2	82,00	66,00
3	75,67	90,00
4	90,83	62,00
5	93,20	100,00
6	90,50	89,00
7	79,67	80,00
8	95,00	81,00
9	87,50	90,25
10	84,00	61,00
11	95,25	65,00
12	87,00	88,00
13	90,75	92,50
14	95,00	72,33
15	81,25	74,33
16	91,33	91,33
17	93,50	-
18	92,67	100,00
19	90,67	100,00
20	94,00	81,50
Média	88,4	83,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme os níveis de confiança médio em cada imagem apresentados na tabela 6, para a trena tem-se um nível de confiança médio para todas as imagens de 88,4%, enquanto para a régua padrão o valor é de 83,3%. Vale ressaltar que na trena, 69 numerações ao total foram identificadas através do OCR contra 47 da régua padrão. Além disso, todos os níveis de confiança foram considerados, ou seja, não importa se a identificação da numeração esteja correta ou não.

No caso da régua padrão, a imagem 17 não possui nenhuma numeração identificada através do OCR. Logo, não foi considerada na média do nível de confiança. Analisando individualmente cada imagem e comparando os níveis de confiança, tem-se que a trena possui valores médios acima de 75% enquanto a régua padrão possui valores acima de 61%. Além disso, somente na régua padrão foram obtidos, através do Tesseract, níveis de confiança médio com 100% de certeza.

Podem ser explorados os dados e analisados os casos das imagens que possuem a numeração identificada incorretamente pelo OCR, como o caso das imagens 4, 10, 14, 15, 18 e 20 do Apêndice A. Com isso, a tabela 7 apresenta os níveis de confiança dessas imagens separados entre os identificados corretamente e incorretamente.

Tabela 7 – Nível de confiança médio das imagens com identificação incorreta da numeração

Imagem	Nível de confiança (%)			
	Trena		Régua padrão	
	OK	NOK	OK	NOK
4	96,00	65,00	-	-
10	-	-	-	61,00
14	93,00	94,50	-	-
15	91,50	71,00	-	-
18	93,20	90,00	-	-
20	-	-	93,00	63,00
Média	93,4	80,1	93,0	62,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados da tabela 7, houveram mais imagens com identificação incorreta da numeração analisando a trena em relação a régua padrão. Esses valores também estão expostos no número de identificações incorretas apresentada nas tabelas 5 e 4, respectivamente.

As identificações incorretas da régua padrão possuem em média 62% de confiança contra 80,1% na trena. Com isso, caso o nível de confiança na identificação da numeração através do OCR fosse ajustado para 70%, seria possível eliminar essas duas ocorrências. Porém, no caso da imagem 10 (Apêndice A) todas as numerações da régua padrão seriam classificadas como *Not Found*, já que houve somente uma identificação da numeração por meio do OCR. Além de possibilitar o aumento da

quantidade de numerações identificadas através da inferência ou *Not Found*, conforme análise na média dos níveis de confiança da régua padrão presente na tabela 6.

O ajuste do nível de confiança não teria um efeito positivo analisando as identificações das numerações da trena. Com base nos dados das tabelas 6 e 7, é possível observar que a identificação da numeração incorreta seria eliminada somente na imagem 4. Analisando esta imagem disponível no Apêndice A, realmente a identificação está incorreta, uma vez que o traço foi identificado incorretamente e a numeração está cortada, ou seja, esse problema já poderia ser resolvido com ajustes na detecção do traços.

Porém, os outros casos onde há identificação incorreta da numeração possuem o nível de confiança alto e acima de 70%. Com isso, seria necessário ajustar as ferramentas de pré processamento e processamento com o objetivo de melhorar a remoção dos ruídos e evitar a perda do desenho da numeração na trena.

Além disso, para ajudar a melhorar os níveis de confiança da identificação das numerações, outra melhoria no processo seria o treinamento de uma nova fonte, para ser utilizada pelo Tesseract, com base nas numerações dos instrumentos de medição, sendo necessário uma grande variedade de fontes e instrumentos de medição para tornar a nova fonte genérica.

Como dito anteriormente, durante a etapa de pré processamento e processamento são extraídas informações que permitem realizar os cálculos das distâncias entre os traços e do erro de indicação. Com isso, os dados foram divididos em duas tabelas.

A primeira tabela presente no Apêndice B, contém os erros de indicação e o módulo do erro de indicação médio calculados para cada imagem da amostra. Os erros de indicação foram calculados através da diferença da coordenada do centroide no eixo X de cada traço. Vale ressaltar que as imagens foram analisadas individualmente, ou seja, as imagens não possuem um referencial em comum para o cálculo do erro de indicação.

Com isso, o erro de indicação neste caso representa a diferença das coordenadas dos traços com base nas coordenadas iniciais da imagem e não a diferença com base na marcação zero dos instrumentos de medição.

Analisando os dados presente na tabela do Apêndice B, tem-se que somente três indicações não apresentaram erro de indicação. Porém, a indicação de noventa e cinco centímetros não apresenta erro de indicação na imagem 19, mas apresenta um erro de -10 pixels na imagem 20.

Analisando a imagem 19 e 20 do Apêndice A, verifica-se que na imagem 19 o contorno detectado do traço de 95 centímetros está levemente inclinado, ou seja, essa inclinação durante a detecção do traço pode ter afetado o cálculo do centroide e consequentemente o erro de indicação. Outros dois fatores que podem ter contribuído

para a diferença do erro de indicação entre as duas imagens é a movimentação dos instrumentos de medição durante a passagem da câmera pela estrutura e a não perpendicularidade da câmera e toda a estrutura móvel com os instrumentos de medição.

Além disso, analisando cada imagem da amostra (Apêndice A) juntamente com os dados dos erros de indicação (Apêndice B), é possível observar maiores valores de erros nas indicações próximas das extremidades da imagem, demonstrando o efeito de distorção das bordas das imagens causado pela lente da câmera.

Não foi possível realizar o cálculo de nenhum erro de indicação nas imagens 10 e 17 (Apêndice A), por isso os dados dessas imagens não são apresentados na tabela do Apêndice B. Com isso, tem-se que o valor do erro de indicação médio do módulo dos erros de indicação calculados é de 7 pixels com um desvio padrão de ± 6 pixels.

Já a segunda tabela possui os dados referentes as distâncias médias entre os traços de cada instrumento de medição, conforme os dados disponíveis na tabela 8.

Tabela 8 – Comparação da distâncias entre os traços

Imagem	Distância entre traços da Trena (pixels)	Distância entre traços da Régua padrão (pixels)
1	367,00	358,75
2	366,00	358,50
3	365,25	359,25
4	360,40	359,00
5	362,20	359,25
6	360,67	358,75
7	360,20	358,75
8	362,00	359,00
9	362,25	358,50
10	362,20	359,00
11	362,50	359,00
12	363,50	359,00
13	364,20	359,00
14	365,00	358,75
15	364,75	359,00
16	366,00	359,00
17	366,75	359,20
18	366,40	359,50
19	365,67	359,50
20	365,75	359,50
Média	364	359

Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo da média da distância entre os traços, apresentados na tabela 8,

foram realizados com base nos traços detectados corretamente. Os traços detectados incorretamente ou ruídos foram desconsiderados. Com isso, a distância média entre os traços da trena é de 364 pixels, enquanto a régua padrão possui 369 pixels de distância entre os traços.

No caso das distâncias entre os traços, tem-se os resultados bem próximos e com pequenas variações entre as imagens da amostra. Como dito anteriormente, muito dessas variações podem estar relacionadas com os arredondamentos realizados em todos os processos. Como a manipulação da imagem desde a detecção dos contornos e as coordenadas dos traços são realizadas com base em aproximações, o arredondamento desses valores podem afetar extremamente o resultado.

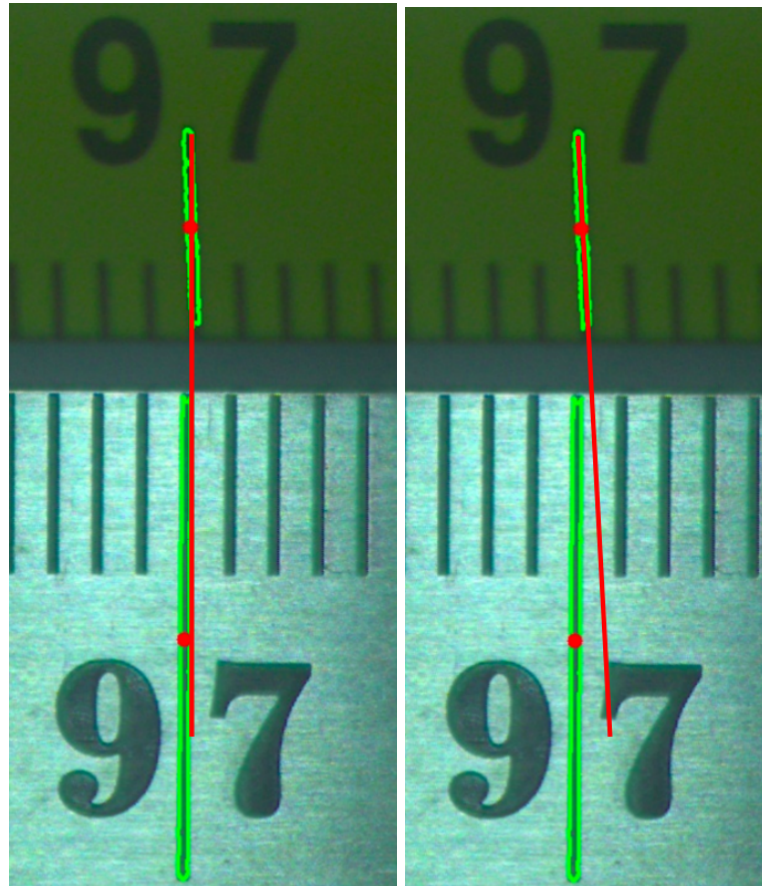
3.2.3.5 Avaliação de melhorias

Com a implementação do fluxo de um projeto de visão computacional, seguida da análise dos resultados obtidos. Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram apresentadas e discutidas algumas propostas de melhorias para os problemas encontrados.

Durante a análise dos resultados das imagens da amostras (Apêndice A), foram observadas inclinações em alguns traços, como por exemplo o traço da trena da numeração de noventa e sete centímetros presente na imagem 20 do Apêndice A. A inclinação do traço afeta as coordenadas do centroide, a distância entre os traços do instrumento de medição e o erro de indicação.

Atualmente é desconsiderada a inclinação do traço, a linha de referência do traço é criada horizontalmente ao longo da coordenada Y do centroide. Na tentativa de solucionar este problema, foi proposta a segmentação do contorno do traço em duas partes, seguido do cálculo do centroide de cada parte do contorno do traço. Com isso, é possível determinar a reta que representa a inclinação do traço e, conseqüentemente, utilizá-la nos cálculos de distância entre os traços do instrumento de medição e o erro de indicação.

Figura 28 – Comparativo solução atual (a esquerda) e solução proposta (a direita)



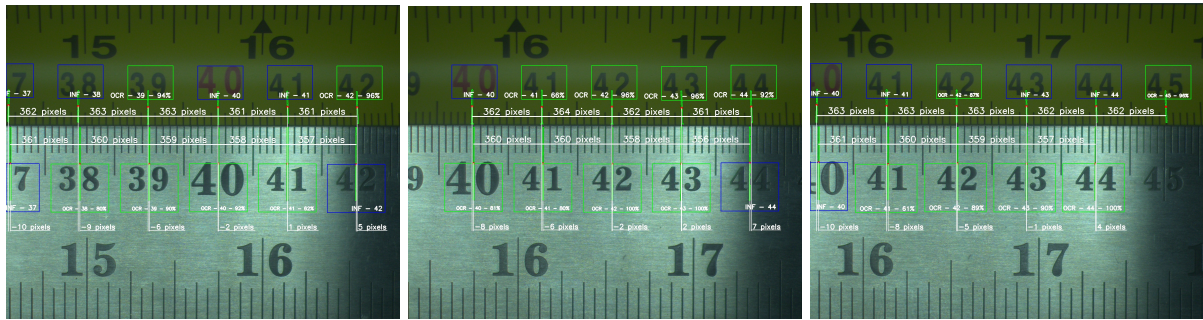
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 28, as duas situações são ilustradas através da linha de referência do traço da indicação. Caso a solução proposta fosse aplicada neste trabalho, o erro de indicação seria maior em relação a situação atual, em razão da maior distância entre o centroide da indicação da régua padrão com a linha de referência. Já a distância entre os traços, teria um valor maior para o intervalo de 96 - 97 centímetros do que o intervalo 97 - 98 centímetros.

A solução para este problema, continua sendo a construção e garantia da perpendicularidade da estrutura de fixação dos dispositivos de aquisição de imagens no portal móvel com os instrumentos de medição. Além disso, existem trenas fabricadas com fita convexa ou plana. Para trenas com fita convexa, seria necessário projetar a fixação da trena na bancada de calibração de forma a garantir a perpendicularidade das marcações do instrumento de medição com a câmera.

A segunda melhoria proposta para o processamento da imagem, seria a utilização de mais imagens para compor o resultado final, ou seja, utilizar a sequência de imagens adquiridas para determinar o melhor resultado com base na média ou no menor valor.

Figura 29 – Comparativo sequência de imagens



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 29, são apresentadas três imagens adquiridas em sequência, sendo que todas possuem a indicação de quarenta e um centímetros. Com isso, seria possível calcular o resultado final da distância entre os traços dos instrumentos de medição e o erro de indicação através da média dos resultados obtidos em cada uma das imagens da sequência ou o menor valor apresentado nas imagens da sequência.

Por exemplo, utilizando-se os resultados obtidos separadamente para cada imagem da sequência apresentada na figura 29. É possível calcular o erro de indicação através da média, obtendo um erro médio de -4 pixels. Enquanto o menor valor de erro de indicação apresentado nas três imagens da sequência é de 1 pixel. Os resultados da distância entre os traços dos instrumentos de medição utilizando a sequência de imagens são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo distância entre os traços para sequência de imagens

Indicação (cm)	Instrumento de medição	Média (pixels)	Menor valor (pixels)
40 - 41	Trena	362	361
	Régua padrão	360	358
41 - 42	Trena	363	361
	Régua padrão	359	357

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados na tabela 9, quando é utilizada a média para criar o resultado final da distância entre os traços do instrumento de medição utilizando uma sequência de imagens. Há uma diferença de um pixel na distância entre os traços da indicação analisada para os dois instrumentos de medição. Porém, a diferença é devido o arredondamento realizado no cálculo da média. Caso fossem utilizadas mais imagens o valor poderia ser o mesmo para os dois intervalos dos instrumentos de medição.

Quando o menor valor é utilizado para definir a distância entre os traços do instrumento de medição utilizando uma sequência de imagens, somente a régua padrão apresenta diferença na distância entre as indicações analisadas. Com isso,

para determinar a eficiência do uso de mais imagens na composição do resultado final seja com base na média, menor valor ou combinação dos dois métodos, é necessário realizar uma análise dos resultados obtidos com base em uma amostra de imagens e o efeito do uso dos métodos no resultado final.

Analisando o desenvolvimento e resultados apresentados até o momento, existem melhorias que podem ser realizadas tanto na definição óptica, quanto em todas as etapas do projeto de visão computacional. Porém, foi demonstrado a viabilidade do uso de ferramentas de visão computacional para calibração de trenas, sendo possível localizar as características importantes, como traços e numerações, e a extração de dados para o processo de calibração, como o erro de indicação. A visão computacional contribui com automação da extração dos dados para calibração de trenas, porém o acompanhamento humano é necessário para a validação dos dados e conseqüentemente dos resultados da calibração.

4 CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar a viabilidade do uso de ferramentas de visão computacional na calibração de trenas, foram realizados testes de *hardware* para definição do dispositivo de aquisição de imagens e o desenvolvimento de *software* para o processamento das imagens.

Toda a análise da viabilidade iniciou-se com os testes dos dispositivos de aquisição de imagens e a definição óptica, seguido do desenvolvimento de códigos para realizar a comunicação, configuração de parâmetros, aquisição e salvamento de imagens utilizando dispositivos GigE. Assim como a implementação das etapas de pré processamento e processamento com o uso de ferramentas de visão computacional.

Além disso, foram implementadas etapas para realizar a extração de dados e a exibição dos resultados. Com isso, foi possível realizar o processamento de um conjunto de vinte imagens onde foram identificados problemas de fabricação dos instrumentos de medição, falhas na definição óptica e nas etapas de pré processamento e processamento das imagens.

Os resultados obtidos demonstraram pontos de atenção para a etapa de definição óptica, sendo esta a etapa fundamental para determinar a qualidade da imagem. Devido o material utilizado na fabricação da régua padrão utilizada neste trabalho, verificou-se a necessidade de melhorar a uniformidade da iluminação em toda a imagem, assim como a remoção da textura do material construtivo dos instrumentos de medição.

Durante todo o trabalho foram observados diversos ruídos decorrentes desses itens. Além disso, outros dois pontos de atenção observados foram a detecção dos contornos dos traços, já que houveram casos onde mais de um traço foram considerados, e com o aperfeiçoamento do reconhecimento dos caracteres.

Este trabalho limitou-se em analisar a viabilidade do uso das ferramentas de visão computacional, não sendo analisado os resultados em relação a qualidade dos dados para elaboração do certificado de calibração, há necessidade de um estudo profundo sobre o efeito do uso de ferramentas de visão computacional nas incertezas de medição.

Com isso, é viável o uso de ferramentas de visão computacional. Porém, como demonstrado neste trabalho deve-se existir a preocupação com a estrutura de realização do processo, qualidade de imagem e eficiência das ferramentas. Além da necessidade humana de avaliação dos resultados extraídos.

Este trabalho já teve a sua versão resumida publicada nos anais do XI Computer on The Beach (CARVALHO; MOREIRA; BECKERT, 2020) e teve uma versão com

resultados parciais, submetida para o XIV Computer on the Beach (2022).

Como trabalhos futuros, propõe-se a construção da bancada para o processo de calibração de trenas, análise do uso de imagens da sequência para definição dos resultados, a junção das imagens e a realização de um único processamento. Por fim, a realização dos cálculos das incertezas de medição na calibração.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012**: Sistema de gestão de medição - requisitos para os processos de medição e equipamentos de medição. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10123**: Instrumentos de medição e controle - trena de fita de aço - requisitos. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10124**: Instrumentos de medição e controle - trena de fita de fibra - requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9000**: Sistema de gestão da qualidade - fundamentos e vocabulário. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001**: Sistema de gestão da qualidade - requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e medição. Rio de Janeiro, 2017.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. 1st. ed. [S.l.]: Prentice Hall Professional Technical Reference, 1982.
- BECKERT, S. F.; MACHADO, A. Proposta para uniformizar a declaração da melhor capacidade de medição para a calibração de trenas. In: *Metrologia 2011*, v. único, 2011. Acesso em: 01 nov. 2022.
- CARVALHO, M. S.; MOREIRA, B. G.; BECKERT, S. F. Desenvolvimento de um software para calibração de trenas utilizando visão computacional. **Computer on the Beach**, 2020, v. 11, n. 1, p. 50–51, Set. 2020.
- CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Diretrizes Estratégicas para a Metrologia Brasileira 2018-2022**. Rio de Janeiro, 2017.
- CUNHA, K.; SANTOS, R. The reliability of data from metrology 4.0. **International Journal on Data Science and Technology**, v. 6, p. 66–69, 2020. Acesso em: 27 fev. 2021.
- EQUIPE FOTOGRAFIA MAIS. **Filtro Polarizador: Como Funciona e Como Utilizar na Fotografia**. 2018. Disponível em: <https://fotografiamais.com.br/filtro-polarizador>.
- EUROPEAN MACHINE VISION ASSOCIATION. **Introduction**. 2022. Disponível em: <https://www.emva.org/standards-technology/genicam/introduction-new/>.
- FILHO, N. P. R. Visão computacional: Um novo campo de pesquisa em cognição visual. **Revista Psicologia Teoria e pesquisa**, v. 3, n. 2, p. 138–150, 2012. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/revistaptp/issue/view/1411>. Acesso em: 10 nov. 2022.

FREIRE, T. A mais nova “medida”. **Revista Controle & Instrumentação**, n. 240, p. 38–45, 2018. Disponível em: https://issuu.com/editora_valete/docs/ci240. Acesso em: 8 out. 2019.

GONZALEZ, R.; WOODS, R. **Digital Image Processing**. 3rd. ed. [S.l.]: Pearson, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Rio de Janeiro, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Orientação para a realização de calibrações no grupo de serviços de calibração em metrologia dimensional**. Rio de Janeiro, 2020.

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION. **What is computer vision?** 2022. Disponível em: <https://www.ibm.com/topics/computer-vision>.

JUNIOR, A. A. G.; SOUZA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manoele, 2008.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; WAHISTER, W. Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0. 2013. Acesso em: 22 fev. 2021.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Diretrizes gerais de calibração Trena de fita de aço DG-ENQUAL-CAL-005-01**. Joinville, 2016.

LOTS. **(LTS-2BR) LOTS Industrial Led Light Bar**. 2021. Disponível em: <https://www.lotsvision.com/product/LOTS-Industrial-Led-Light-Bar.html>.

LOTS. **(LTS-2FT/3FT) High Luminance Back Light Led Lights Products**. 2021. Disponível em: <https://www.lotsvision.com/product/High-luminance-back-light-led-lights-products.html>.

LOTS. **(LTS-3COXR) Right-angle Coaxial Light Led Lighting Solution**. 2021. Disponível em: <https://www.lotsvision.com/product/right-angle-coaxial-light-led-lighting-solution.html>.

LOTS. **(LTS-3DM) Dome Shadowless Light Machine Lighting**. 2021. Disponível em: <https://www.lotsvision.com/product/dome-shadowless-light-machine-lighting.html>.

LOTS. **(LTS-RN) Ring Light Vision Led Lighting**. 2022. Disponível em: <https://www.lotsvision.com/product/ring-light-vision-led-lighting.html>.

MANDERSA, B.; VRIESA, H. J. de; BLIND, K. ISO 9001 and product innovation: A literature review and research framework. **Technovation**, v. 48-49, p. 41–55, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166497215000784?via%3Dihub>. Acesso em: 20 fev. 2021.

OPENCV. **Image Thresholding**. 2022. Disponível em: https://docs.opencv.org/4.6.0/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. **Metrology for the Digitalization of the Economy and Society**. 2018. Disponível em: https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/forschung_entwicklung/digitalisierung/PTB-Digitalisierungsstudie_2018_EN.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. **Digital transformation strategy 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/into-the-future-with-metrology/the-challenges-of-digital-transformation.html>. Acesso em: 30 jan. 2022.

PUNGLER, D.; PUNGLER, R. Machine vision: An important pillar of industry 4.0. **International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)**, v. 6, n. 6, p. 115–124, Jun. 2020.

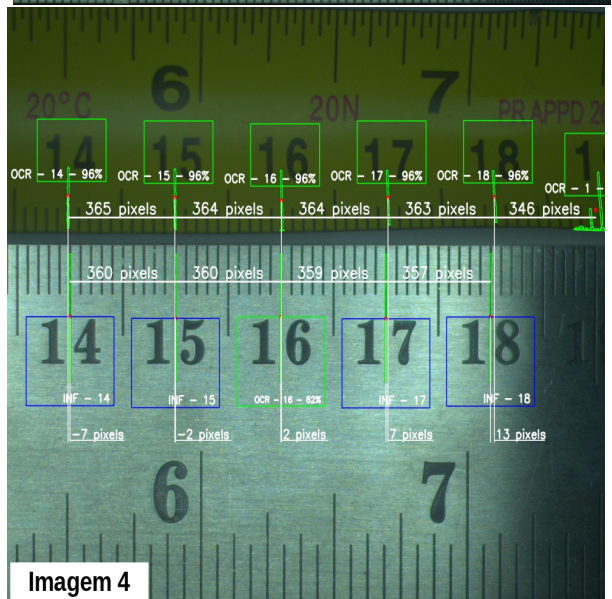
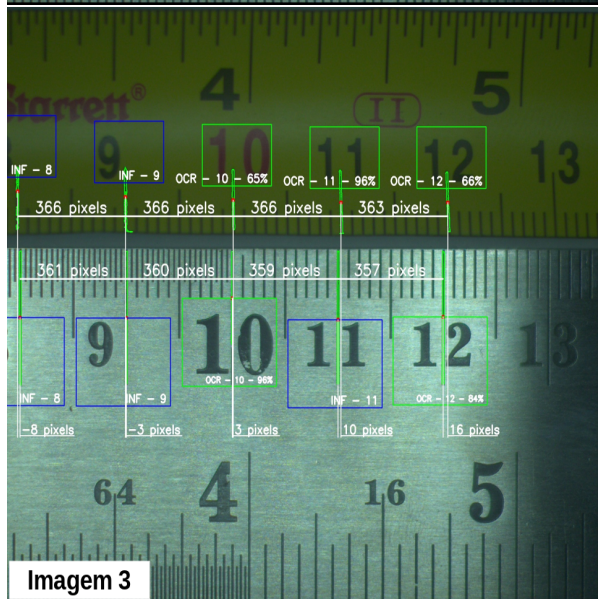
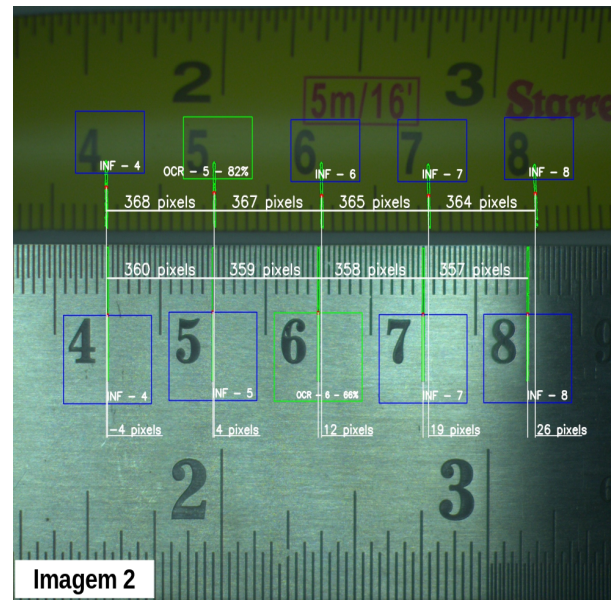
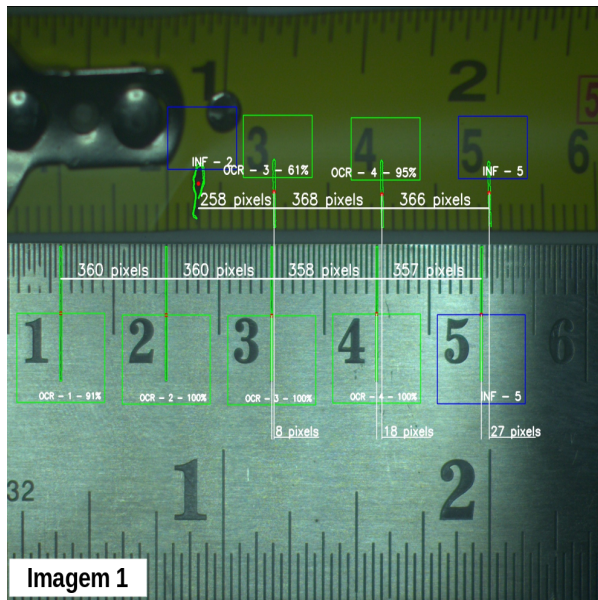
SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. 1nd. ed. [S.l.]: Springer, 2022.

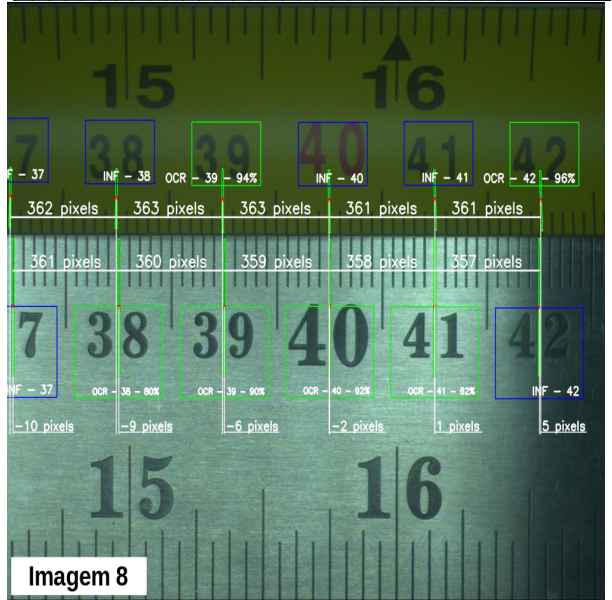
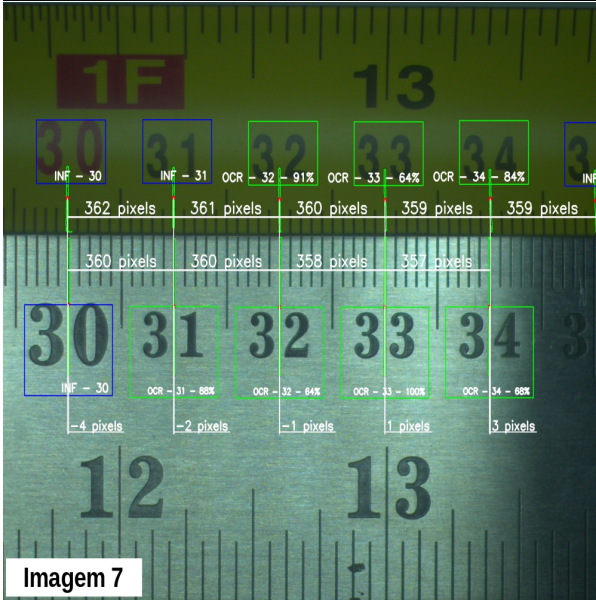
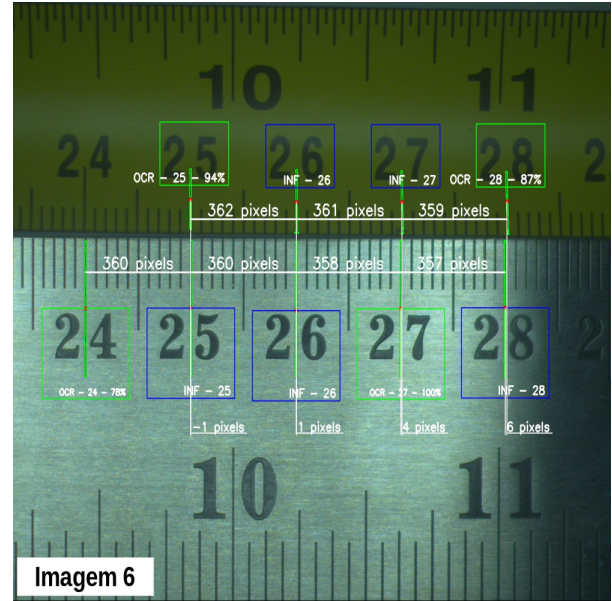
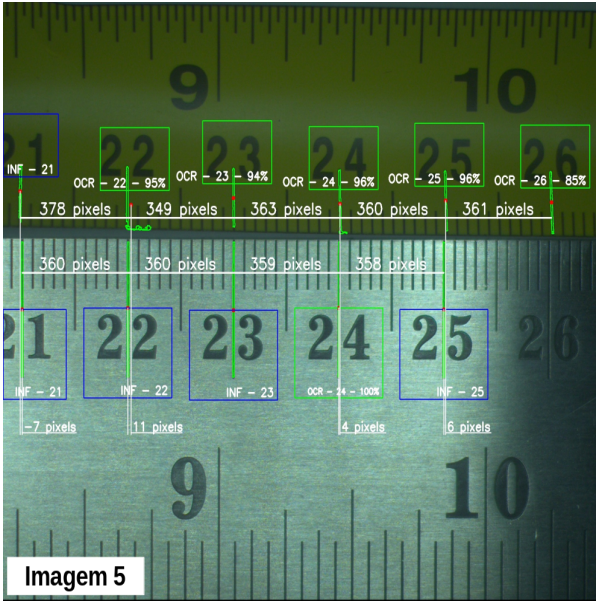
VICTOR, A. et al. Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview. **Procedia Manufacturing**, v. 41, p. 359–366, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919311072>. Acesso em: 14 ago. 2021.

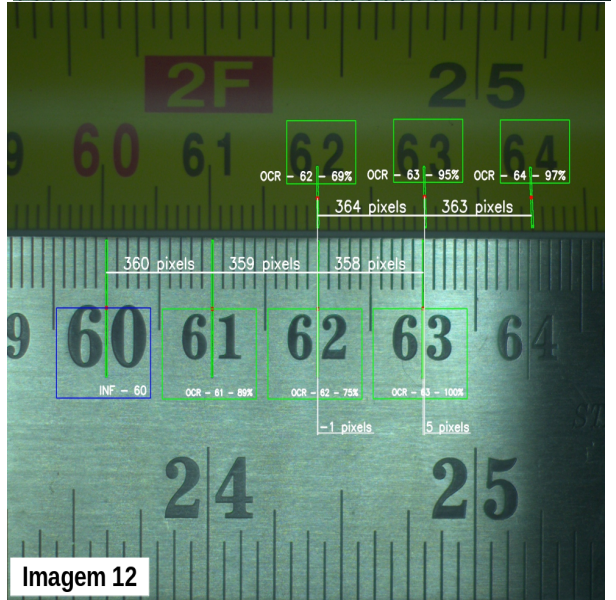
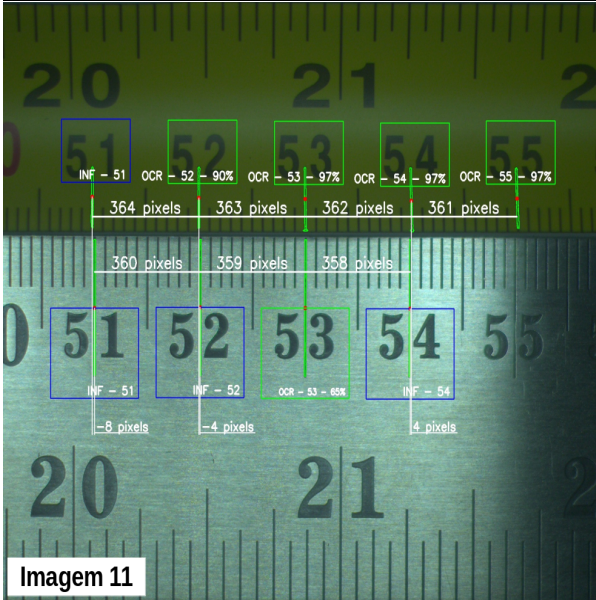
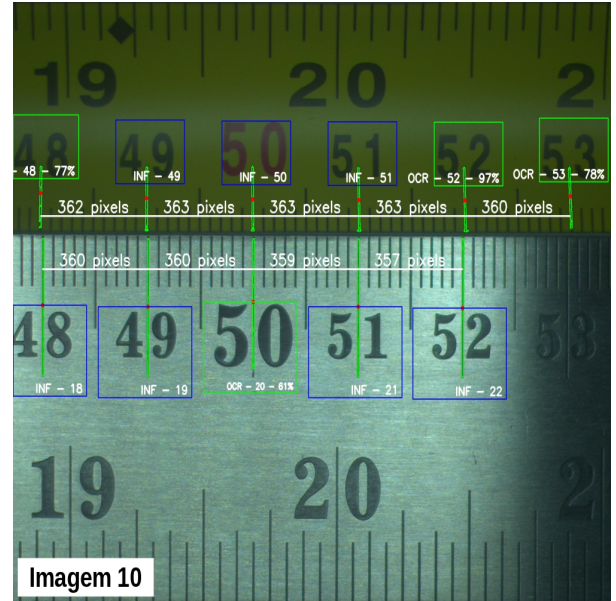
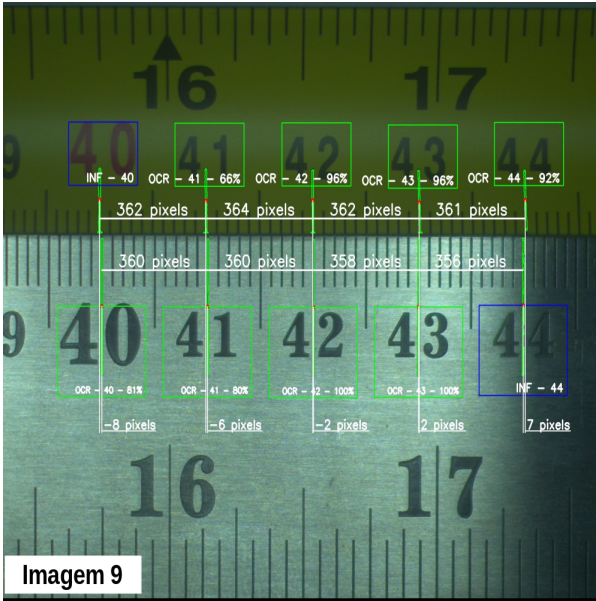
APÊNDICE A - IMAGENS DE 1 A 20

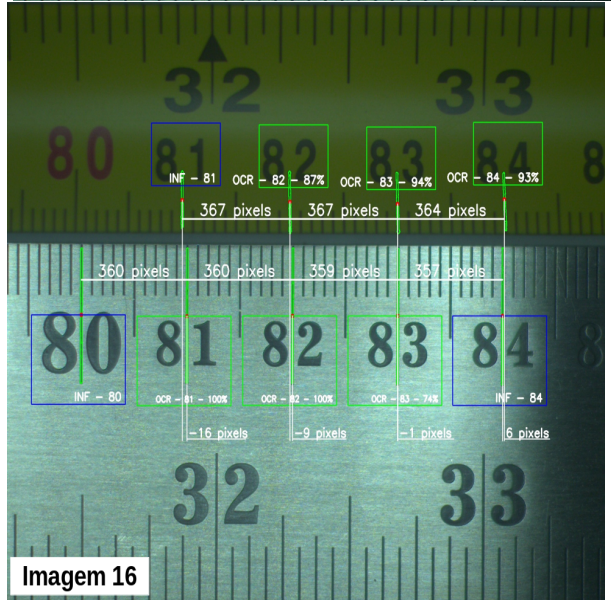
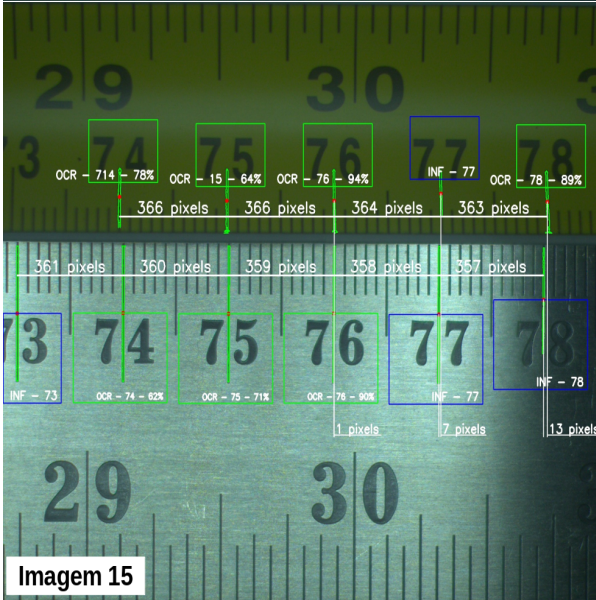
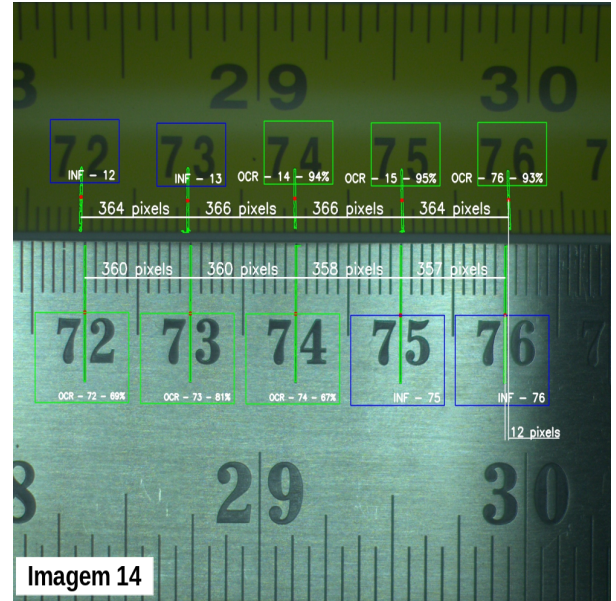
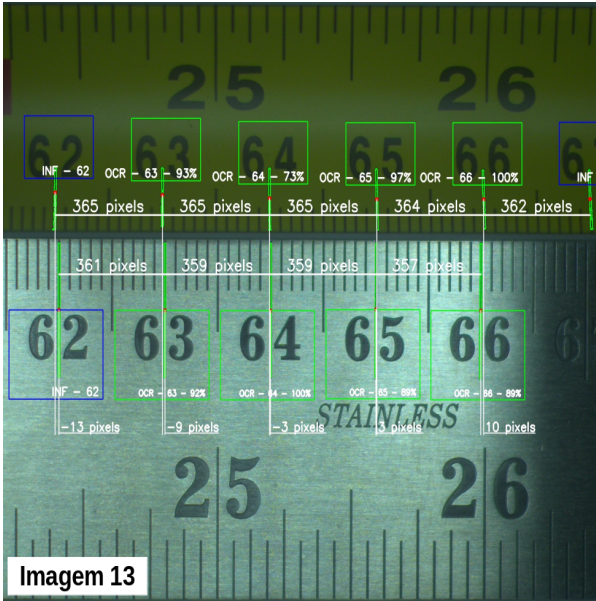
As imagens da amostra foram selecionadas com base no conjunto de imagens adquirido anteriormente de modo que contenha a maioria das marcações dos instrumentos de medição, ou seja, as imagens simulam o deslocamento da câmera no decorrer da estrutura.

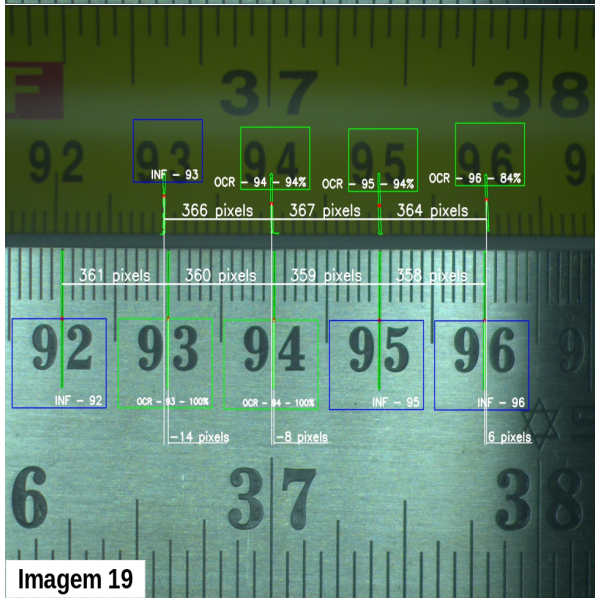
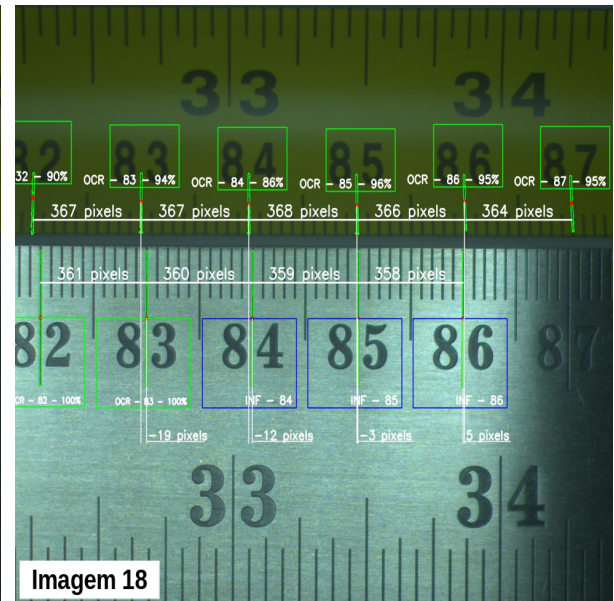
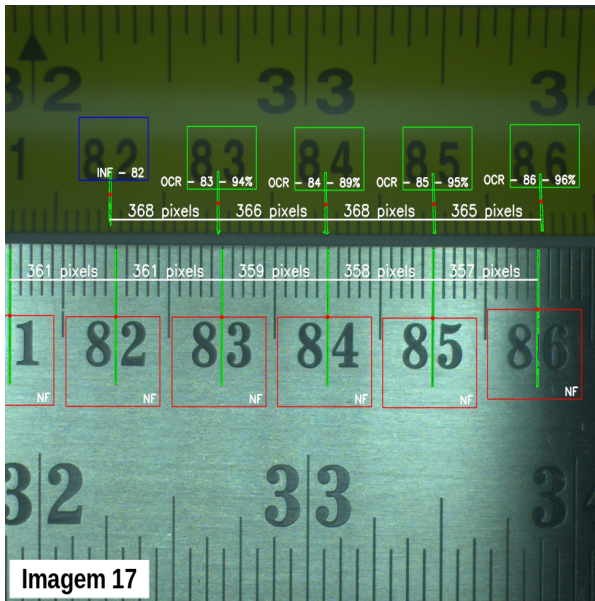
As imagens selecionadas passaram pelas etapas de pré processamento e processamento, conforme detalhado anteriormente. O resultado final da etapa de validação do processamento em cada imagem da amostra pode ser observado nas imagens a seguir.











Com a realização do processamento das vinte imagens da amostra, onze imagens apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, 55% da amostra. Enquanto nos outros 45% restantes foram identificados erros, principalmente, na detecção dos traços e identificação da numeração.

Analisando a imagem 2, tem-se que todos os contornos foram identificados e somente uma numeração em cada instrumento de medição foi identificada através do OCR, o restante das numerações foram determinadas por meio da inferência. Mesmo com a maioria das numerações determinadas através da inferência, os traços tiveram os valores atribuídos corretamente para as marcações. Além disso, foi possível determinar a distância dos traços em cada instrumento de medição e o erro de indicação para cada marcação.

Já na imagem 3, a mesma quantidade de numerações foram determinadas através do OCR e da inferência, cada método identificou cinco numerações. Porém, não foi possível a identificação do traço com numeração de treze centímetros.

As imagens possuem uma região com menor iluminação no lado direito e esta diferença tem afetado as etapas de pré processamento e processamento das imagens, dificultado a identificação de traços e numerações nesta região. Com isso, não foi possível a identificação dos traços próximos a lateral direita das imagens 3, 11 e 13, sendo a maioria dos casos na régua padrão.

Nas imagens 6, 7, 8 e 16, somente os traços de vinte e quatro (imagem 6), trinta e cinco (imagem 7) e oitenta centímetros (imagem 16) não foram identificados durante o processo de pré processamento. Os traços de vinte e quatro e o de oitenta centímetros são integralmente visíveis na trena, o ajuste de parâmetros como área e os limitantes das coordenadas podem fazer com que ambos sejam considerados, porém o resultado do ajuste deve ser analisado em todas as imagens para que não sejam considerados outros traços erroneamente ou ruídos.

Já o traço não identificado na imagem 7, apresenta a numeração cortada e está próximo da lateral direita da imagem. Nessas imagens (6, 7, 8 e 16) são exibidos erros nas indicações entre os instrumentos de medição de \pm um pixel, sabendo que os pixels são números inteiros que compõem a imagem. Este erro pode sofrer grande influência da qualidade da imagem durante a detecção do contornos dos traços. Por menor que seja a falha ou ruído presente na imagem durante o reconhecimento dos contornos, acaba afetando o cálculo da área, a determinação do centroide do contorno e conseqüentemente as coordenadas do traço.

Por fim, as imagens 9, 13 e 19 tiveram todos os traços e numerações correspondentes identificados corretamente, além dos cálculos das distâncias entre os traços e os erros de indicação para cada marcação.

Até o momento, foram realizadas análises das imagens que apresentaram resultados satisfatórios. Porém, conforme informado anteriormente, em 45% da amostras houveram resultados que apresentaram resultados insatisfatórios, seja na identificação de contornos e/ou na identificação da numeração. Com isso, a seguir serão analisados e detalhados os problemas encontradas em todas as etapas do fluxo de execução de um projeto de visão computacional com base nas imagens da amostras.

A imagem 1 corresponde a parte inicial da trena. Os contornos dos traços de um e dois centímetros não foram detectados devido a proximidade dos traços com a fixação da superfície de referência na trena, sendo esta região detectada como um único contorno. Mesmo que fosse possível detectar os traços, não seria possível determiná-los pelo OCR devido a fixação da superfície de referência impedir a visualização das numerações. Além disso, também tem-se nesta imagem a presença de uma deformação na trena que foi considerada como um traço e teve a numeração determinada através da inferência.

Analisando a imagem 4, pode-se passar despercebido pelo problema, uma

vez que a maioria dos traços foram detectados e identificados corretamente. Porém, o problema se encontra na marcação de dezenove centímetros da trena. Na detecção do traço foram considerados o contorno de dois traços, o que gerou o cálculo incorreto das coordenadas do centroide do traço. Além disso, a numeração detectada para este traço pelo OCR possui o nível de certeza de 65%, porém a numeração cortada impede a correta determinação da numeração.

Na imagem 5, tem-se um caso parecido ao da imagem 4, o contorno da indicação de vinte e dois centímetros da trena foi detectado incorretamente, ruídos foram considerados como parte do traço. Isso gerou o deslocamento da coordenada do centroide do traço no eixo X e conseqüentemente o cálculo errado do erro de indicação para esta marcação.

Já a imagem 12 não teve o contorno de dois traços da trena e um da régua padrão identificados, sendo que os traços da trena estão em melhores condições de identificação comparado com o da régua padrão.

As imagens 10, 15, 18 e 20, tiveram problema com a identificação das numerações através do OCR. No caso da imagem 10, somente uma numeração da régua padrão foi determinada por meio do OCR e mesmo assim o resultado foi incorreto, gerando a incorreta identificação da numeração dos outros traços por meio da inferência. A imagem 18 teve a numeração de oitenta e dois centímetros da trena cortada. Já nas imagens 15 e 20, parte do traço da indicação da marcação foi identificado como número um e considerado como parte da numeração, resultando em uma identificação incorreta, com valor maior do que a real marcação, e afetando a inferência do traço seguinte, no caso da imagem 20.

Outro problema encontrado na identificação das numerações através do OCR pode ser observado na imagem 14. De três marcações identificadas pelo OCR, duas foram identificadas incorretamente e afetaram a determinação da numeração através da inferência.

Por fim, a imagem 17 demonstra que não foi possível identificar nenhuma das numerações da régua padrão através do OCR com confiança acima de 60%. Como explicado anteriormente, para determinar as numerações por meio da inferência é necessário que pelo menos uma numeração seja identificada pelo OCR. Além disso, como cada instrumento de medição é analisado individualmente, não é possível utilizar os dados de um instrumento de medição na identificação das numerações de outro instrumento.

Analisando todas as imagens de forma geral, foram identificados dois aspectos problemáticos, sendo a diferença no posicionamento/distância entre os instrumentos de medição e o fato do erro de indicação ser menor para as marcações localizadas no centro da imagem. O primeiro aspecto pode ser observado analisando as imagens 9 e 20, a diferença no posicionamento ao longo dos instrumentos de medição podem

afetar, principalmente, a identificação dos contornos. Já o erro de indicação ser menor no centro da imagem, pode estar relacionado com o efeito de distorção das bordas das imagens causado pela lente da câmera.

Alguns dos problemas estão relacionados com a construção dos instrumentos de medição, enquanto outros estão relacionados na forma como foi realizada a implementação das etapas de pré processamento e processamento, limitações das ferramentas de visão computacional e qualidade da imagens.

APÊNDICE B - TABELA ERRO DE INDICAÇÃO DA AMOSTRA

Imagem	Numeração (cm)	Erro de indicação (pixels)
1	3	8
	4	18
	5	27
2	4	-4
	5	4
	6	12
	7	19
3	8	26
	8	-8
	9	-3
	10	3
4	11	10
	12	16
	14	-7
	15	-2
	16	2
5	17	7
	18	13
	21	-7
	22	11
	23	0
6	24	4
	25	6
	25	-1
	26	1
7	27	4
	28	6
	30	-4
	31	-2
8	32	-1
	33	1
	34	3
	37	-10
	38	-9
8	39	-6
	40	-2
	41	1
	42	5

Continua na próxima página.

Imagem	Numeração (cm)	Erro de indicação (pixels)
9	40	-8
	41	-6
	42	-2
	43	2
	44	7
11	51	-8
	52	-4
	53	0
	54	4
12	62	-1
	63	5
13	62	-13
	63	-9
	64	-3
	65	3
	66	10
14	76	12
15	76	1
	77	7
	78	13
16	81	-16
	82	-9
	83	-1
	84	6
18	83	-19
	84	-12
	85	-3
	86	5
19	93	-14
	94	-8
	95	0
	96	6
20	94	-17
	95	-10
Média do módulo		7
Desvio padrão do módulo		6