



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS
ELETRÔNICOS

VITOR GABRIEL RAMOS

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PLACAS DE
TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO TÉCNICAS DE VISÃO
COMPUTACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Joinville

2023

Vitor Gabriel Ramos

**METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PLACAS DE
TROCADORES DE CALOR UTILIZANDO TÉCNICAS DE VISÃO
COMPUTACIONAL**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Goes Oliveira

Joinville

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ramos, Vitor Gabriel

Metodologia para avaliação dimensional de placas de trocadores de calor utilizando técnicas de visão computacional / Vitor Gabriel Ramos; orientador, Anderson Wedderhoff Spengler, coorientador, Jorge Luiz Goes Oliveira, 2023.

149 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Instrumentação. 3. Algoritmo. 4. Recombinação. I. Spengler, Anderson Wedderhoff. II. Oliveira, Jorge Luiz Goes. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos. IV. Título.

Vitor Gabriel Ramos

Metodologia para avaliação dimensional de placas de trocadores de calor utilizando técnicas de visão computacional

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Eduardo Augusto Bezerra, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Flávio José de Oliveira Morais, Dr.
Universidade Estadual Paulista

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Prof. Dr. Lucas Weihmann
Coordenador do Programa

Prof. Dr. Anderson Wedderhoff Spengler
Orientador

Joinville, 05 de outubro de 2023.

Dedico este trabalho a minha família,
meu alicerce.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, mestre de todos os mestres, por iluminar meus passos nesta grande jornada.

Agradeço a minha esposa, Maria Gabriela, por sempre me apoiar, impedindo que eu desistisse em meio as dificuldades que surgiram neste caminho.

Agradeço aos meus pais, Vitor Hugo e Roselene, e ao meu irmão André Eduardo, os quais sempre me incentivaram a estudar, e nunca duvidaram que eu conseguiria.

Agradeço aos demais familiares, pela compreensão durante os muitos momentos de estudo.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Anderson W. Spengler, o qual esteve presente em todas as etapas desta pesquisa, sendo sempre solícito, esclarecendo dúvidas e compartilhando seu conhecimento.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Dr. Jorge L. G. Oliveira, pelo auxílio na contextualização da pesquisa.

Agradeço ao professor Dr. Kleber V. de Paiva, pelos auxílios em laboratório.

Agradeço aos demais professores do PPGESE, pelos ensinamentos durante todo o curso.

Agradeço aos colegas Thiago Martins, Lara Maria, e Guilherme Araújo, que fizeram parte desta e de outras pesquisas do laboratório T2F.

Agradeço ao amigo José Adriano, pelos momentos de estudo durante o curso das disciplinas.

Agradeço aos demais amigos, pelos momentos de apoio.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, pelos bons conselhos durante este período.

RESUMO

Os trocadores de calor do tipo placas são equipamentos utilizados para implementar a troca térmica entre fluidos, e são amplamente utilizados em processos industriais, como nas indústrias alimentícia, petroquímica e têxtil. Para evitar perdas de desempenho e possíveis paradas por inatividade, são realizados processos de manutenção, que incluem, entre outras, atividades de limpeza e inspeção dimensional das placas. Os métodos de medição tradicionais são lentos e cansativos ao técnico executor, o que pode conferir atrasos ao processo de manutenção, ao passo que métodos avançados, como de medição por coordenadas e dedicados a este tipo de componente, são robustos, comprometendo a portabilidade entre ambientes e contendo custo elevado. Como alternativa, algoritmos de instrumentação virtual, equipados com ferramentas de visão computacional, possuem custos de implementação inferiores e, dependendo da estrutura e do tipo de sensor, possuem também portabilidade, como no caso da utilização de câmeras. O desafio deste tipo de solução está na exatidão do sistema, que depende do conjunto de técnicas de processamento digital de imagem que são embarcadas, sendo estas definidas de acordo com as condições de contorno de cada aplicação. O objetivo desta pesquisa é a elaboração de um sistema de medição baseado em um algoritmo, abarcando a proposição de uma metodologia de processamento digital de imagem. Foram analisados diferentes software que incluem visão computacional, e selecionou-se o conjunto Python e biblioteca OpenCV para a elaboração do algoritmo. Identificou-se como pontos críticos a exatidão do sistema, a operação das técnicas de detecção de bordas e contornos e seu pré-processamento. Foram elaboradas estratégias de recombinação de imagem, orientadas a detecção de bordas, baseadas em diferentes espaços de cor. O algoritmo elaborado foi testado utilizando-se amostras de placas de trocadores de calor, caracterizadas nesta pesquisa, por meio de conceitos de metrologia, estimando a incerteza de forma experimental. Foram desenvolvidos recursos adicionais de processamento, visando a compensação de erros, distorções, e referenciamento, utilizando-se marcadores ArUco. A metodologia de melhor desempenho foi a recombinação lógica tipo OR, sobre as camadas U e V do modelo de cor YUV, que apresentou um erro máximo de 1,87mm, sobre as definidas condições de ensaio.

Palavras-chave: Instrumentação. Algoritmo. Recombinação.

ABSTRACT

Plate-type heat exchangers are equipment used to implement thermal exchange between fluids and are widely used in industrial processes, such as the food, petrochemical, and textile industries. To avoid loss of performance and possible downtime due to inactivity, maintenance processes are carried out, which include, among others, cleaning activities and dimensional inspection of the plates. Traditional measurement methods are slow and tiring for the technician performing them, which can cause delays in the maintenance process. In contrast, advanced methods, such as measurement by coordinates and dedicated to this type of component, are robust, but compromise portability between environments and with high cost. Alternatively, virtual instrumentation algorithms, equipped with computer vision tools, have lower implementation costs and, depending on the structure and type of sensor, also have portability, as in the case of using cameras. The challenge of this type of solution lies in the accuracy of the system, which depends on the set of digital image processing techniques that are embedded, these techniques are defined according to the boundary conditions of each application. The objective of this research is the development of a measurement system based on an algorithm, encompassing the proposition of a digital image processing methodology. Different software with computer vision was analyzed, and the Python set and OpenCV library were selected to develop the algorithm. Critical points were identified as the system's accuracy, the operation of edge and contour detection techniques, and their pre-processing. Image recombination strategies were developed, oriented towards edge detection, based on different color spaces. The developed algorithm was tested using samples of heat exchanger plates, characterized in this research, through metrology concepts, estimating uncertainty experimentally. Additional processing resources were developed, aiming to compensate for errors, distortions, and referencing, using ArUco markers. The best-performing methodology was logical OR recombination, on the U and V layers of the YUV color model, which presented a maximum error of 1.87mm, under the defined test conditions.

Keywords: Instrumentation. Algorithm. Recombination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais partes do trocador de calor a placas gaxetadas.	21
Figura 2 - Espaço de cor RGB.....	28
Figura 3 - Espaço de cor LAB.....	28
Figura 4 - Espaço de cor HSV.....	29
Figura 5 - Espaço de cor YUV.	29
Figura 6 - Exemplos de vizinhança.	31
Figura 7 - Fluxo de etapas dos algoritmos de detecção de bordas.	34
Figura 8 - Fluxo de etapas dos detectores de bordas em imagens coloridas.	35
Figura 9 - Número de citações entre os anos 2004-2006.	36
Figura 10 - Histograma de limiarização de imagens.	38
Figura 11 - Exemplos de diferentes métodos de limiarização.....	39
Figura 12 – Alinhamento ideal do sistema.	40
Figura 13 - Diferentes tipos de distorção.....	42
Figura 14 - Exemplo de marcadores ArUco.....	43
Figura 15 - Detecção de contorno LabVIEW.....	54
Figura 16 - Detecção de contorno Matlab.	55
Figura 17 - Detectores de borda biblioteca OpenCV.	56
Figura 18 - Detector de contorno biblioteca OpenCV.....	57
Figura 19 - Fluxo de operação.....	58
Figura 20 - Padrão de calibração xadrez.	59
Figura 21 - Localização das medições.....	62
Figura 22 - Sistema de medição proposto.	65
Figura 23 - Desenho do <i>banner</i> utilizado.	66
Figura 24 – Conceito elaborado para o sistema de medição.	74
Figura 25 - Aplicativo teste.	77
Figura 26 - Definição das etapas de PDI.	78
Figura 27 - Etapas da recombinação.....	80
Figura 28 - Camadas de cores.....	81
Figura 29 - Histograma das camadas modelos de cor YUV e LAB.....	82

Figura 30 - Histograma das camadas modelo de cor HSV.....	83
Figura 31 – Imagem recombinação.....	84
Figura 32 - Análise de borda.....	85
Figura 33 - Gráfico da corrugação.....	86
Figura 34 - Pontos de calibração.....	88
Figura 35 - Fluxo de ensaios da pesquisa.....	89
Figura 36 - Fluxograma principal do algoritmo.....	90
Figura 37 - Modelos de placas.....	91
Figura 38 - Gráfico das tendências.....	96
Figura 39 - Gráfico das dispersões máximas.....	97
Figura 40 - Gráfico das incertezas expandidas.....	98
Figura 41 - Gráfico de erro máximo.....	99
Figura 42 - Avaliação da metodologia proposta - erros máximos.....	100
Figura 43 - Efeito da calibração.....	102
Figura 44 - Metodologia de PDI proposta no algoritmo.....	104
Figura 45 - Métodos algoritmo grupo 1.....	143
Figura 46 - Métodos algoritmo grupo 2.....	144
Figura 47 - Métodos algoritmo grupo 3.....	145
Figura 48 - Métodos algoritmo grupo 4 parte 1.....	146
Figura 49 - Métodos algoritmo grupo 4 parte 2.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Detectores de contorno.....	36
Tabela 2 – Características dos trabalhos.....	51
Tabela 3 - Localização das medições de caracterização.....	62
Tabela 4 - Coeficientes NBR10123.....	63
Tabela 5 - Incertezas padrão tipo B.....	68
Tabela 6 - Incertezas padrão tipo A.....	69
Tabela 7 - Critérios de seleção da plataforma de programação.....	76
Tabela 8 - Resultado da caracterização das placas.....	91
Tabela 9 - Resultados das Medições - YUV - Recombinação AND.....	92
Tabela 10 - Resultados das Medições - YUV - Recombinação OR.....	93
Tabela 11 - Resultados das Medições - LAB - Recombinação AND.....	94
Tabela 12 - Resultados das Medições - LAB - Recombinação OR.....	95
Tabela 13 - Leituras Placa 1 - YUV - Recombinação AND.....	119
Tabela 14 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - YUV - Recombinação AND.....	120
Tabela 15 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - YUV - Recombinação AND.....	121
Tabela 16 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - YUV - Recombinação AND.....	122
Tabela 17 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - YUV - Recombinação AND.....	123
Tabela 18 - Leituras Placa 3 - YUV - Recombinação AND.....	124
Tabela 19 - Leituras Placa 1 - YUV - Recombinação OR.....	125
Tabela 20 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - YUV - Recombinação OR.....	126
Tabela 21 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - YUV - Recombinação OR.....	127
Tabela 22 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - YUV - Recombinação OR.....	128
Tabela 23 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - YUV - Recombinação OR.....	129
Tabela 24 - Leituras Placa 3 - YUV - Recombinação OR.....	130
Tabela 25 - Leituras Placa 1 - LAB - Recombinação AND.....	131
Tabela 26 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - LAB - Recombinação AND.....	132
Tabela 27 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - LAB - Recombinação AND.....	133
Tabela 28 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - LAB - Recombinação AND.....	134
Tabela 29 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - LAB - Recombinação AND.....	135

Tabela 30 - Leituras Placa 3 - LAB - Recombinação AND.	136
Tabela 31 - Leituras Placa 1 - LAB - Recombinação OR.	137
Tabela 32 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - LAB - Recombinação OR.	138
Tabela 33 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - LAB - Recombinação OR.	139
Tabela 34 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - LAB - Recombinação OR.	140
Tabela 35 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - LAB - Recombinação OR.	141
Tabela 36 - Leituras Placa 3 - LAB - Recombinação OR.	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AND	Operação lógica “E”
CIE	Comissão Internacional de Iluminação
E _{max}	Erro máximo
FPSO	Unidade flutuante de processamento, armazenamento e transferência
HSV	Modelo de cor matiz, saturação e valor
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	Organização Internacional de Padronização
LAB	Modelo de cor luminosidade e coordenadas cromáticas
MP	Megapixel
NBR	Norma brasileira
OR	Operação lógica “OU”
PDI	Processamento digital de imagem
PHE	Trocador de calor tipo placas
RGB	Modelo de cor vermelho, verde e azul
RM	Resultado da medição
ROI	Região de interesse
SM	Sistema de medição
<i>t</i>	Coefficiente <i>t de student</i>
T _d	Tendência
TI	Tecnologia da informação
U	Incerteza de medição expandida
uc	Incerteza-padrão combinada
VIM	Vocabulário internacional de metrologia
VV	Valor verdadeiro
VVC	Valor verdadeiro convencional
<i>v</i>	Número de graus de liberdade
<i>ν_{ef}</i>	Número de graus de liberdade efetivos
YUV	Modelo de cor luminância e cromaticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	CONTEXTO DE APLICAÇÃO	21
1.3	PROBLEMA	24
1.4	METAS E OBJETIVOS DA PESQUISA.....	24
1.4.1	Avaliação do Estado da Arte	24
1.4.2	Aspectos Técnicos	25
1.5	ESTRUTURA	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	CAPTURE E ARMAZENAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS	26
2.2	ESPAÇOS DE COR.....	27
2.3	FUNDAMENTOS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM.....	30
2.3.1	Imagem Digital	30
2.3.2	Propriedades entre pixels	31
2.3.2.1	Vizinhança.....	31
2.3.2.2	Distância Euclidiana.....	32
2.3.3	Máscaras de convolução	32
2.4	DETECÇÃO DE BORDAS E CONTORNOS	33
2.4.1	Primeiros métodos.....	33
2.4.2	Imagens coloridas	35
2.4.3	Classificação de métodos.....	35
2.4.4	Continuidade das pesquisas.....	37
2.5	LIMIARIZAÇÃO DE IMAGENS	38
2.6	FONTES DE ERRO EM MEDIÇÃO POR IMAGEM.....	40

2.7	DISTORÇÃO EM IMAGENS DIGITAIS.....	41
2.8	MARCADORES ARUCO	42
2.9	METROLOGIA CIENTÍFICA	44
2.10	TRABALHOS CORRELATOS.....	48
2.10.1	Considerações	50
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	53
3.1.1	Plataformas e ferramentas disponíveis.....	53
3.1.1.1	LabVIEW	53
3.1.1.2	Matlab.....	55
3.1.1.3	Python e OpenCV.....	56
3.1.2	Fluxo de operação em visão computacional.....	57
3.1.3	Calibração de câmera	58
3.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS GAXETADAS.....	60
3.2.1	Condições ambientais.....	60
3.2.2	Sistema de medição	60
3.2.3	Definição do mensurando	61
3.2.4	Procedimento de medição	61
3.2.5	Fontes de incerteza	63
3.3	SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO	64
3.3.1	Condições ambientais.....	64
3.3.2	Sistema de medição	64
3.3.3	Definição do mensurando	66
3.3.4	Procedimento de medição	66
3.3.5	Fontes de incerteza	67

4	DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA	71
4.1	REQUISITOS DE PROJETO	71
4.1.1	Não Funcionais	71
4.1.2	Funcionais	72
4.2	DEFINIÇÕES INICIAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	72
4.2.1	Apresentação do conceito	73
4.2.2	Seleção da plataforma de programação	74
4.2.2.1	Teste de portabilidade	76
4.3	METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM	77
4.3.1	Definição da etapa de segmentação	79
4.3.2	Definição da etapa de pré-processamento.....	79
4.3.3	Fluxo de etapas para a recombinação de imagens	80
4.4	ANÁLISE DA RECOMBINAÇÃO DE IMAGENS	80
4.5	RECURSOS ADICIONAIS DA METODOLOGIA.....	85
4.5.1	Análise de borda para medição com corrugações	85
4.5.2	Correções e recursos de referenciamento	86
4.5.3	Estratégia para a calibração da câmera.....	87
4.6	FLUXO DE ENSAIOS DA PESQUISA.....	89
4.7	FLUXOGRAMA DO ALGORITMO	90
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	91
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	91
5.2	RESULTADOS DAS TÉCNICAS DE RECOMINAÇÃO ANALISADAS.....	92
5.2.1	Resultados das medições - YUV - Recombinação tipo AND	92
5.2.2	Resultados das medições - YUV - Recombinação tipo OR.....	93
5.2.3	Resultados das medições - LAB - Recombinação tipo AND.....	94

5.2.4	Resultados das medições - LAB - Recombinação tipo OR	95
5.2.5	Discussões e seleção da proposta.....	96
5.3	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	100
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.4.1	Resumo da metodologia proposta	104
6	CONCLUSÃO	105
7	TRABALHOS FUTUROS.....	107
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A - LEITURAS - YUV - RECOMBINAÇÃO AND.....	119
	APÊNDICE B - LEITURAS - YUV - RECOMBINAÇÃO OR.....	125
	APÊNDICE C - LEITURAS - LAB - RECOMBINAÇÃO AND.....	131
	APÊNDICE D - LEITURAS - LAB - RECOMBINAÇÃO OR	137
	APÊNDICE E - MÉTODOS DO ALGORITMO.....	143
	APÊNDICE F - QUALIDADE DA CÂMERA.....	148

1 INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são equipamentos utilizados para implementar a troca térmica entre dois fluidos, em diferentes temperaturas e em contato térmico (MORTEAN, 2014).

Os trocadores do tipo “placas” são construídos com finas placas metálicas corrugadas, comprimidas por parafusos, sendo que entre cada par de placa são usadas gaxetas (elementos de vedação) para formar canais de escoamento, pelos quais os fluídos quente e frio circulam alternadamente, realizando as trocas térmicas (GUT, 2003).

Segundo Moura e Novazzi (2014): *“Os trocadores de calor a placas são equipamentos flexíveis, com boa relação área de troca térmica / volume, proporcionam altos coeficientes de transferência de calor e apresentam facilidade para limpeza.”*

Dentre as principais vantagens do trocador de calor a placas estão: a otimização do espaço, devido ao tamanho reduzido; fácil desmontagem, substituição de placas e manutenção; baixo custo operacional; entre outros (BERMO, 2021).

Os trocadores de calor perdem seu desempenho ao longo do tempo e o mau funcionamento pode afetar a segurança e a qualidade do produto, bem como seus custos. Se a falha levar a inatividade, podem ocorrer grandes perdas na produção. Com a manutenção regular, esse desempenho é preservado, e as operações são mantidas de forma previsível (ALFA LAVAL, 2023).

Os trocadores de calor a placas são amplamente utilizados em diversos processos industriais. Eles podem ser empregados nas indústrias alimentícia, petroquímica e têxtil (MARTINS, SANTIAGO, *et al.*, 2022).

Considerando a vasta utilização deste tipo de equipamento, e conhecendo a necessidade de manutenções e verificações do mesmo, é possível observar a relevância dos estudos sobre os ciclos de vida e operação dos permutadores de calor.

Estratégias de instrumentação eletrônica são grandes aliadas em implementações de análise e controle do ciclo de vida de produtos, tendo em vista o ganho de agilidade atingido em diversas aplicações, entre outras vantagens. Aliado a isso, o conceito de instrumentação virtual tem trazido diversas contribuições, devido aos potenciais ganhos de flexibilidade. O uso destas estratégias para o auxílio no processo de manutenção e inspeção da integridade dos trocadores de calor a placas gaxetadas é motivador desta pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

O crescente avanço tecnológico tem impulsionado constantemente a busca por eficiência e a eliminação de falhas nos processos industriais. Conforme já relatado, os trocadores de calor necessitam de atividades de manutenção periódica para manter tal rendimento e não exibir falhas, que geram elevadas perdas de produção.

A empresa Petrobras, reconhecida mundialmente por exploração e produção de petróleo e gás natural, possui em seu canal de comunicação com os fornecedores de bens e serviços, um conjunto de especificações e normas técnicas para o fornecimento de equipamentos industriais.

Dentre estes documentos, destacam-se a especificação ET-3010.00-1200-456-PPC-002 (2022), que estabelece os requisitos técnicos para fornecimento de placas de troca térmica para permutadores de calor do tipo placas gaxetadas, e a norma N-2931 (2019), que trata do projeto de permutador de calor de placas gaxetadas. Em ambos os documentos, são citadas atividades de inspeção das placas, incluindo a inspeção dimensional.

A empresa Bermo, que iniciou suas atividades em 1973 e atua na área de condução e controle de fluidos, fornece diversos tipos de trocadores de calor. O manual de instrução geral da referida fabricante para os trocadores de calor a placas gaxetadas (2018) cita em seu plano de manutenção a inspeção preditiva das placas a cada seis meses, incluindo a verificação de trincas, deformações e vazamento.

A inspeção dimensional das placas deve ocorrer durante a entrega dos trocadores, com dados em relatório de inspeção, mas principalmente no ciclo de manutenção para evidenciar possíveis deformações. Métodos de medição tradicionais, como a utilização de trenas, por exemplo, podem se tornar lentos e cansativos ao técnico executor, visto o grande número de placas e quantidade de trocadores, o que pode conferir atrasos no processo de manutenção.

Existem no mercado sistemas próprios para a avaliação dimensional de componentes desta natureza, por exemplo, o sistema PLANAR (2023) da empresa Vas Tecnologia Industrial, dedicado a medição de chapas finas, componentes de metal planos e dobrados, gaxetas, entre outros. A desvantagem de um sistema como esse é o espaço necessário, devido a robustez do equipamento, que em muitos casos pode comprometer a portabilidade do mesmo para a aplicação em uma plataforma de extração de petróleo, por exemplo. Além disso, sistemas

complexos e dedicados, de maneira geral, possuem um custo de aquisição elevado. Alternativamente, a inspeção dimensional das placas através da instrumentação eletrônica, em especial por meio da instrumentação virtual, é uma solução que pode ter sua viabilidade analisada.

Um instrumento virtual consiste de um computador industrial ou estação de trabalho equipado com um software, hardware com custo otimizado e acessórios como placas plugáveis. Com a instrumentação virtual o foco deixa de ser o hardware e passa a ser o software e suas soluções gráficas potenciais, dedicadas as necessidades da implementação (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

Os sistemas de instrumentação virtual possuem vários conjuntos de ferramentas, incluindo pacotes de visão computacional. Segundo Milano e Honorato (2010): “*Visão computacional é a ciência responsável pela visão de uma máquina, pela forma como um computador enxerga o meio à sua volta, extraindo informações significativas [...]*”. Por meio dos pacotes de visão computacional é possível agregar considerável portabilidade a instrumentação, através de câmeras e outros sensores sem contato.

A redução do custo das câmeras digitais somada a sua disponibilização em massa, através da integração destas aos *smartphones*, acelera o desenvolvimento de técnicas de processamento digital de imagem, fundamentais para os sistemas de visão computacional baseados em câmeras.

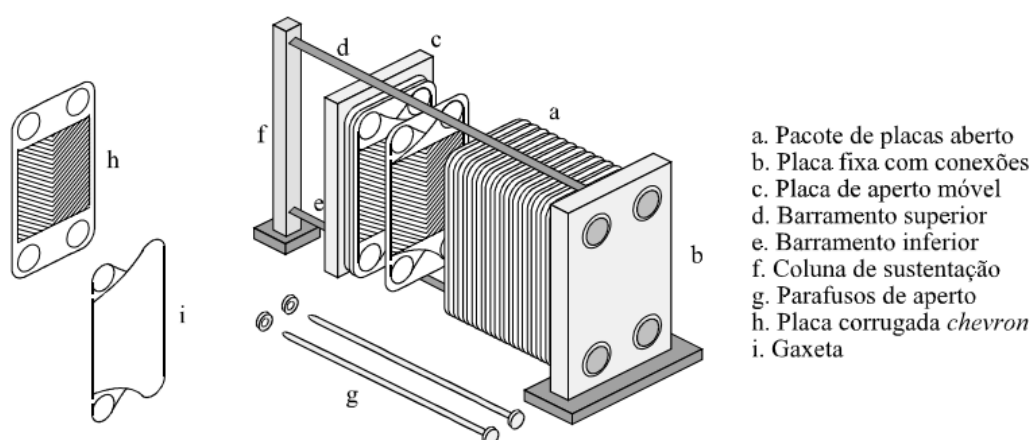
A desvantagem principal desta metodologia é que, para cada tipo de solução são requeridas diferentes técnicas de processamento digital de imagem, de acordo com as condições de contorno da aplicação. Isso acarreta em diferentes resultados de exatidão, que só podem ser mensurados a partir de projeto e ensaios. Feliciano, Souza *et al.* (2005), no artigo intitulado “*Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações Sobre Sua Exatidão*”, afirmam que:

Em sistemas de medição por imagem automatizados, o problema principal consiste em saber combinar a tecnologia a uma aplicação específica de uma maneira econômica e com a qualidade requerida. Não há um sistema que resolva todos os desafios industriais, os sistemas são específicos e configurados para cada aplicação. O desenvolvimento de sistemas de visão industriais robustos e com a necessária exatidão torna-se, portanto, um desafio.

1.2 CONTEXTO DE APLICAÇÃO

Os trocadores de calor do tipo placas, usualmente chamados de PHE (*plate heat exchanger*), são extensamente empregados em processos que exijam alta eficiência e flexibilidade. A Figura 1 ilustra a construção típica de um PHE, sendo que o conjunto de placas seladas forma uma sequência de canais paralelos, dessa maneira, a troca de calor ocorre por meio das finas placas metálicas (GUT, 2003).

Figura 1 - Principais partes do trocador de calor a placas gaxetadas.



Fonte: Gut (2003).

Este tipo de equipamento é extensamente utilizado nas plataformas de extração da indústria de óleo e gás *offshore* (em alto mar), que comportam trocadores de grandes dimensões e formados por um elevado número de placas. Segundo Martins, Santiago *et al.* (2022) as principais causas de parada desses permutadores são manutenções, limpezas e falhas.

Nas rotinas de manutenção desta indústria, os trocadores são desmontados, sendo realizada a limpeza e a inspeção da integridade dos componentes, incluindo a já citada mensuração das placas. Caso alguma placa possua dimensões que superem as tolerâncias informadas pelo fabricante, esta é então substituída.

Como o custo de operação dessas plataformas é elevado, possíveis ganhos de agilidade no processo de manutenção dos trocadores de calor são relevantes, podendo estes serem obtidos na etapa de medição das placas.

O espaço físico disponível no ambiente *offshore* é limitado, o que restringe a adição de um sistema de medição automático robusto. Schoeping (2018) cita que: “*Os custos de exploração na indústria offshore podem ser reduzidos através da redução da escala de equipamentos [...]*”. Carvalho (2022) comenta que: “*Algumas aplicações de processos de resfriamento, como na indústria aeroespacial, submarina e offshore, exigem atenção especial à dimensão ocupada pelo sistema*”.

Outra limitação que deve ser considerada para as plataformas *offshore* é o tipo de equipamento que pode ser utilizado, devido ao risco inerente a este ambiente. A norma N-2918 (2020) da empresa Petrobras, que trata da classificação das áreas em atmosferas explosivas, cita que este estudo:

[...] têm como finalidade a seleção, especificação e aplicação dos equipamentos, dispositivos e materiais elétricos, de instrumentação, eletrônicos, de telecomunicações e mecânicos, em atmosferas de gases e vapores inflamáveis ou de poeiras combustíveis.

Esta mesma norma comenta que: “*Para a realização de serviços de reparos, revisão e recuperação de equipamentos elétricos, de instrumentação e mecânicos para atmosferas explosivas, utilizar a ABNT NBR IEC 60079-19*”. A norma NBR IEC 60079-19 (2020), por sua vez, informa que esse documento: “*[...] indica os procedimentos para reparo, revisão ou recuperação, e verificação do cumprimento contínuo do equipamento com os requisitos do certificado de conformidade ou com as normas dos tipos de proteção aplicáveis [...]*”.

Sintetizando estas informações sobre as limitações do ambiente de extração *offshore*, pode-se inferir que o sistema de medição para o qual é elaborada a metodologia a que se refere esta pesquisa, deve constituir-se de uma solução portátil, que ocupe pouco espaço físico e, que os componentes eletrônicos de instrumentação devem apresentar certificação para operação em áreas relacionadas a atmosferas explosivas. Dessa maneira, pode-se observar que a utilização de equipamentos já certificados para a elaboração do sistema é um fator positivo.

A especificação técnica I-ET-3010.00-5511-768-PPT-001 (2022), que estabelece os critérios e características básicas para o projeto detalhado, fornecimento, instalação e configuração dos equipamentos de TI (tecnologia da informação) que serão instalados na unidade FPSO (*floating, production, storage and offloading*), da empresa Petrobras, relaciona equipamentos como computadores de mesa (*desktop*), computadores portáteis (*notebooks*),

dispositivos móveis (*smartphones* Android) e suas respectivas certificações. Essa unidade consiste em um navio com capacidade para processar e armazenar o petróleo, e prover a transferência do petróleo e gás natural. Evidencia-se aqui que esses equipamentos já fazem parte do instrumental da empresa, atendendo as certificações necessárias para a operação no ambiente *offshore*, sendo uma alternativa viável para a composição do sistema de medição.

Dentre os sistemas de medição que podem ser elaborados com base nestes referidos equipamentos pode-se citar a aplicação da instrumentação virtual por meio dos algoritmos de visão computacional, onde utiliza-se, por exemplo, a aquisição de imagens digitais como elemento sensor.

O módulo Parcerias Tecnológicas (2022), da empresa Petrobras, visa promover o aumento das parcerias de alta competência e melhorar as condições para inovação. Nesta página são listadas oportunidades de parcerias, das quais podem participar universidades, empresas e instituições de ciência e tecnologia. Algumas oportunidades elencadas listam trabalhos baseados na análise de imagens digitais, o que demonstra interesse pela pesquisa nesta área. São exemplos dessas oportunidades:

- OP1846 - Metodologias portáteis aplicadas a matrizes aquosas e complexas (2023). Solução detalhada: O sistema deve obrigatoriamente, ser baseado no conceito do uso de imagens digitais. O método analítico deve ser simples de ser executado, utilizando pouco volume de amostra e reagentes. Deve ser de fácil montagem.
- OP564 - Ferramenta de inspeção de mangotes (2022). Solução detalhada: Desenvolver ferramenta para dar suporte à inspeção externa de Mangotes de *Offloading* (descarga) aplicando sistema de captação de imagem de alta qualidade (câmeras HD) com sistema de limpeza de incrustação de vida marinha, com ajuste de variação de diâmetros e superação de obstáculos.

As características relatadas neste contexto de aplicação para o sistema de medição, ao qual é embarcada a metodologia a que se refere esta pesquisa, foram consideradas na definição dos requisitos de projeto abarcados neste trabalho.

1.3 PROBLEMA

O problema central e generalizável que envolve esta pesquisa consiste em analisar a metodologia de processamento digital da imagem requerida para a operação de um algoritmo equipado com visão computacional, capaz de realizar medições dimensionais em placas de trocadores de calor, para assim conferir sua exatidão e concluir sobre a continuidade de sua aplicação na mensuração.

1.4 METAS E OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo central deste trabalho consiste em: a partir de um conjunto de análises para a metodologia de processamento digital da imagem, propor um algoritmo capaz de realizar medições dimensionais em placas de trocadores de calor e, através de conceitos de metrologia, estimar de forma prática sua exatidão.

1.4.1 Avaliação do Estado da Arte

A avaliação do estado da arte será obtida ao:

- Verificar a existência de trabalhos correlatos e colher dados de execução dos mesmos;
- Analisar os fundamentos de imagem digital e seu processamento básico;
- Analisar as principais técnicas de processamento digital da imagem, envolvidas no funcionamento do algoritmo, para a composição da metodologia;
- Analisar a metodologia geral de operação de algoritmos desta natureza;
- Analisar as plataformas e ferramentas de software disponíveis para a elaboração do algoritmo e ensaio da metodologia.

1.4.2 Aspectos Técnicos

Os objetivos técnicos dessa pesquisa são:

- Analisar os requisitos de projeto para o funcionamento do algoritmo contemplado pela metodologia proposta;
- Selecionar a plataforma de programação mais adequada;
- Selecionar os elementos adicionais possíveis de serem utilizados no sistema de medição;
- Analisar os principais desafios envolvidos para a metodologia proposta, baseando-se nos requisitos de projeto detalhados no capítulo 4.1.
- Propor uma metodologia para operação do algoritmo, buscando soluções para as referidas dificuldades e avaliando os resultados desta, possibilitando a aplicabilidade em projetos similares;
- Realizar um conjunto de ensaios e estimar a incerteza experimental para o sistema proposto;
- Concluir sobre a viabilidade dos resultados e sugerir trabalhos futuros.

1.5 ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado em sete capítulos, sendo estes compostos por:

1. Introdução, justificativa, contexto de aplicação, abordagem do problema e objetivos da pesquisa;
2. Apresentação e fundamentação das bases teóricas;
3. Levantamento de materiais e métodos de desenvolvimento e teste da metodologia;
4. Considerações de projeto e desenvolvimento da metodologia;
5. Resultados dos ensaios, avaliação da metodologia e considerações finais;
6. Conclusões da pesquisa;
7. Trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas as principais bases teóricas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa, incluindo conceitos que foram levantados na pesquisa inicial de trabalhos correlatos, e também nos requisitos de projeto verificados, a que se refere o capítulo 4.1.

2.1 CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

As câmeras digitais, assim como as analógicas, necessitam de iluminação para a captura de imagens. Sem luz não há a formação de fotos.

Segundo Ourique, Giovannini e Catelli (2010):

Nas câmeras analógicas, a imagem é formada sobre um filme, no qual ocorrem reações químicas em decorrência da exposição à luz. Nas câmeras digitais, em lugar do filme existe um dispositivo semicondutor, em geral um CCD ou CMOS, o qual, sob a ação da luz, produz correntes elétricas [...].

Os sensores de imagem digital são formados por uma matriz de pixels, que consistem no menor elemento captador de luz. Quanto maior o número de pixels, mais pontos de detecção de luz existem no sensor, e por consequência maior o nível de detalhamento da imagem. Este detalhamento é chamado de resolução (SERPENTINI, 2009).

Durante a exposição do sensor à luz, ocorre a geração de cargas elétricas, sendo estas cargas armazenadas e posteriormente enviadas para os circuitos de condicionamento de sinal. Por fim, estas cargas são medidas e então convertidas em informação digital.

Como a conversão dos fótons em elétrons é um processo naturalmente monocromático, os sensores das câmeras utilizam técnicas especiais para a captação das cores. Uma dessas técnicas é a sobreposição de sensores, que utiliza três camadas de sensores com filtros para comprimentos de onda diferentes, para a detecção das cores primárias aditivas (vermelho, verde e azul) (SERPENTINI, 2009).

Recebidos os sinais, o hardware de processamento gera então a imagem digital. Na sequência, esta imagem fica disponível para otimização (de maneira manual ou automática) e posteriormente é salva em um formato de arquivo usual, como por exemplo o JPEG (“Joint

Photographic Experts Group”, em referência ao grupo de especialistas que criou o referido formato).

2.2 ESPAÇOS DE COR

Os modelos de cor têm por objetivo possibilitar que as cores sejam especificadas através de formatos padronizados. De modo geral, os modelos de cor são representados por um sistema de coordenadas tridimensional, onde cada cor é representada por um ponto (FILHO e NETO, 1999).

Segundo Costa (2015): *“O conjunto de todas as cores de um modelo de cor chama-se espaço de cor.”*

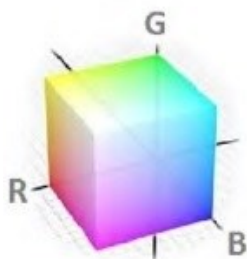
Simões (2000) descreve algumas medidas perceptíveis que fazem parte de modelos de cor, como a luminância, a saturação, a tonalidade (*Hue*) e a cromaticidade. Segundo ele:

- Luminância: *“é uma medida do nível da quantidade de energia percebida por um observador de uma fonte de luz. Na prática, esta grandeza está ligada ao conceito genericamente conhecido como “brilho” da cor.”*
- Tonalidade: *“é uma comparação (subjetiva) entre a cor em observação e exemplos previamente conhecidos. De maneira genérica, trata-se da identificação da cor (ou comprimento de onda) dominante [...]”*
- Saturação: *“refere-se ao grau de pureza de uma cor, ou seja, alguma graduação que represente uma cor qualquer como uma grandeza entre uma onda monocromática [...] e a luz branca [...]. Assim, as cores monocromáticas tem saturação máxima e a luz branca, mínima (zero).”*
- Cromaticidade: *“As grandezas de tonalidade e saturação juntas correspondem à grandeza conhecida como cromaticidade. Em termos simples, a cromaticidade pode ser definida como a parte da cor que é invariante ao brilho.”*

No espaço de cor RGB cada cor é descrita através de seus componentes espectrais primários de vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*). Este sistema é representado pelo cubo ilustrado na Figura 2, sendo que a intensidade máxima dos três componentes primários,

correspondente a cor branca, pode ser observada em um dos cantos superiores do cubo (COLET, 2017).

Figura 2 - Espaço de cor RGB.

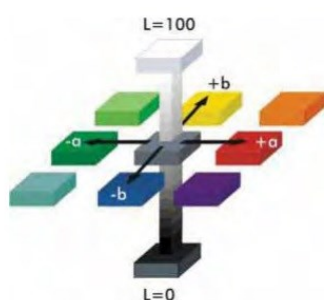


Fonte: Adaptado de Colet (2017).

O espaço de cores LAB foi definido pela CIE, que se trata de uma comissão internacional com trabalhos ligados à luz e iluminação (CIE, 2023).

Este modelo de cor considera três eixos espaciais perpendiculares entre si, constituídos pelos parâmetros: “L”, que corresponde à luminosidade do objeto a ser avaliado, “A”, que se trata da medida de croma no eixo vermelho-verde, e “B”, que traduz a medida do croma no eixo amarelo-azul. A Figura 3 ilustra graficamente a composição do espaço de cores LAB (TAKATSUI, 2011).

Figura 3 - Espaço de cor LAB.

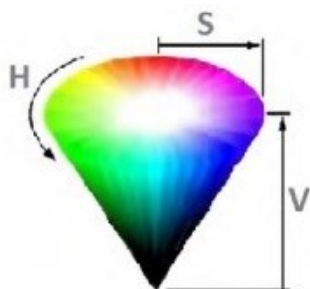


Fonte: Takatsui (2011).

No espaço de cores HSV, o componente de intensidade (*Value*) é desacoplado das informações de cor da imagem, e os componentes de matiz (*Hue*) e saturação (*Saturation*) possuem relação com a percepção humana das cores. Neste espaço, o atributo matiz descreve o

comprimento de onda dominante de uma cor, ao passo que a saturação mede o grau de diluição de uma cor por luz branca. A representação gráfica desse sistema é apresentada através da Figura 4 (COLET, 2017).

Figura 4 - Espaço de cor HSV.

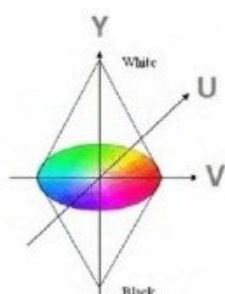


Fonte: Adaptado de Colet (2017).

O espaço de cores YUV tem como base os atributos de luminância e cromaticidade. A luminosidade de uma informação cromática é separada para determinar a matiz. A importância da utilização desse modelo de cor está ligada ao fato de a luminância e a informação de cor serem independentes (COLET, 2017).

O modelo de cor YUV é utilizado por padrões de transmissão de sinais analógicos televisivos, os quais são adotados em diversos países. O canal de cromaticidade U determina a diferença entre o azul e a luminância, enquanto o canal de cromaticidade V determina a diferença entre o vermelho e a luminância (OYAMA, 2014). Graficamente, este sistema é representado pela Figura 5.

Figura 5 - Espaço de cor YUV.



Fonte: Adaptado de Colet (2017).

2.3 FUNDAMENTOS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

O processamento digital de imagens se tornou um recurso presente, de maneira indireta, em um grande número de atividades realizadas pela população. No contexto atual, é muito comum a utilização de sistemas de leitura biométrica, reconhecimento facial, identificação de códigos QR (do inglês “Quick Response” ou resposta rápida), entre outros cujo funcionamento envolve técnicas de processamento digital de imagens.

No meio industrial, sistemas de visão de máquina ou visão computacional incorporam este tipo de processamento em aplicações de instrumentação, dedicadas à seleção de peças, controle de qualidade, inspeção em geral, entre outros.

Este capítulo busca apresentar os conceitos inicialmente necessários para a compreensão das técnicas presentes no capítulo 2.4.

2.3.1 Imagem Digital

As imagens digitais podem ser descritas como funções matemáticas, $f(x, y)$, compondo uma matriz de pixels. Uma imagem monocromática pode ser traduzida como uma função “ f ”, que tem como resultado o valor da amplitude, ou nível de cinza, para uma determinada coordenada espacial “ x ” e “ y ” (MATURANA, 2010).

Esta função representa o produto da interação entre a iluminância (que exprime a quantidade de luz que incide sobre o objeto) e as propriedades de refletância ou de transmitância, próprias do objeto. Em outras palavras, a interação da iluminação local com a capacidade do objeto de refletir e/ou transmitir a luz (FILHO e NETO, 1999).

No caso das imagens coloridas, por exemplo no modelo RGB (do inglês “*Red Green Blue*” ou vermelho, verde e azul), torna-se necessária a utilização de mais funções para descrever as características da imagem. Neste modelo é utilizada uma função para cada banda de frequência ou cor primária (FILHO e NETO, 1999).

2.3.2 Propriedades entre pixels

Esta seção apresenta as principais relações existentes entre os Pixels, indispensáveis a esta fundamentação teórica.

2.3.2.1 Vizinhaça

Um Pixel genérico “p” pode ser referenciado a partir de suas coordenadas “x” e “y”. No processamento de imagens digitais é comum a utilização da coordenada “x” como eixo das linhas e “y” como eixo das colunas, diferentemente das coordenadas cartesianas usuais em geometria analítica (FILHO e NETO, 1999).

No que tange a vizinhaça entre pixels, pode-se apresentar três modelos de padrão de vizinhaça, conforme exemplificado na Figura 6. O primeiro modelo, chamado de “4 Vizinhaça” é composto pelos pixels horizontais e verticais que fazem fronteira direta com o pixel genérico “p”. No segundo caso, denominado “Vizinhaça Diagonal”, os pixels considerados são os que compartilham vértices nos dois sentidos diagonais com o pixel em análise. O terceiro modelo, conhecido como “8 Vizinhaça”, é formado pela união dos dois conjuntos anteriores (FILHO e NETO, 1999).

Figura 6 - Exemplos de vizinhaça.

4 Vizinhaça		
Eixo "x" ↓	-----> Eixo "y"	
		(x,y)
	(x,y-1)	(x,y+1)
		(x+1,y)
Vizinhaça Diagonal		
Eixo "x" ↓	-----> Eixo "y"	
		(x,y)
	(x-1,y-1)	(x+1,y-1)
		(x-1,y+1)
		(x+1,y+1)
8 Vizinhaça		
Eixo "x" ↓	-----> Eixo "y"	
		(x,y)
	(x-1,y-1)	(x+1,y-1)
		(x-1,y)
		(x,y+1)
		(x+1,y)
		(x+1,y+1)

Fonte: Autor (2023).

2.3.2.2 Distância Euclidiana

O conceito de distância euclidiana é bastante utilizado no processamento digital de imagens. Através da medição de distância entre dois pontos contidos em um espaço bidimensional (matriz de pixels), torna-se possível, por exemplo, a aplicação de conceitos de medição de objetos através de imagens digitais. A distância euclidiana “ D ” entre dois pixels “ a ” (x, y) e “ b ” (r, s) pode ser definida conforme (FILHO e NETO, 1999):

$$D = \sqrt{(x - r)^2 + (y - s)^2} \quad (1)$$

2.3.3 Máscaras de convolução

Tendo em vista a tratativa de imagens digitais como matriz de pixels, pode-se denominar esse conjunto de pontos dispostos em um sistema de coordenadas cartesianas como domínio espacial, e os procedimentos operacionais desses pixels como métodos no domínio espacial. A Equação 2 apresenta, de forma genérica, a aplicação de funções de processamento de imagens no domínio espacial, onde “ $f(x, y)$ ” é a imagem de entrada, “ $g(x, y)$ ” o resultado ou imagem processada e, “ T ” o operador que modificará a imagem, definido sobre alguma vizinhança “ (x, y) ” (MATURANA, 2010).

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2)$$

Segundo Maturana (2010): “*O processo pelo qual duas imagens são combinadas através de operações de deslocamento, multiplicação e adição é chamado de convolução.*”

Em outras palavras, as máscaras de convolução são operadores aplicados sobre imagens, que possuem uma função específica, como por exemplo filtragem, detecção de bordas, entre outros. Muitas técnicas de processamento de imagens utilizam a filtragem por derivação como ferramenta para a detecção de bordas.

Maturana (2010) explica que: “*Para o processamento de imagem, o método mais comum de diferenciação é o gradiente*”, e descreve sua formulação conforme Equação 3:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde é apresentado o gradiente “f” das coordenadas “(x, y)”.

2.4 DETECÇÃO DE BORDAS E CONTORNOS

A detecção de bordas e contornos é uma função de grande valor ao processamento digital de imagens, no que tange as aplicações em sistemas de visão computacional.

Ontiveros, Yagüe, et al. (2013), no artigo intitulado “*Computer Tomography 3D edge detection comparative for metrology applications*”, relataram que o processo de tomografia computadorizada para aplicações de metrologia é bastante complexo, devido aos vários fatores que influenciam a perda de precisão durante as medições, sendo um dos mais críticos a detecção de bordas.

Segundo Campos (1998): “*A detecção de uma borda (extração do contorno) pode ser encarada como uma parte de um processo mais geral, a segmentação de uma imagem (exclusão de um objeto em uma cena)*”.

Para Wangenheim et al. (2013): “*Na segmentação procura-se distinguir as partículas umas das outras e do fundo. Esta distinção permitirá ao programa interpretar pixels contíguos e agrupá-los em regiões.*”

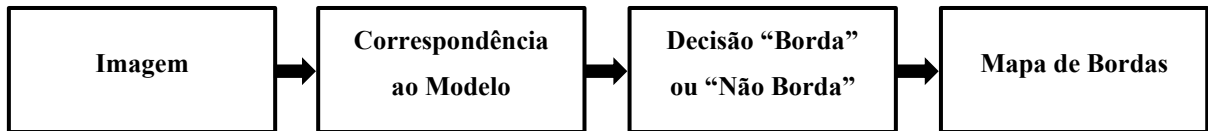
Costa (2015) afirma que: “*As segmentações orientadas a bordas entre atributos buscam descontinuidades nas imagens.*” O mesmo conceitua também que “*Uma borda é o limite entre duas regiões apresentando tons (ou cores) relativamente distintos.*”

2.4.1 Primeiros métodos

Os primeiros métodos de detecção de borda, e também os mais simples, foram baseados na aplicação de máscaras de convolução. O operador cruzado de Roberts foi o primeiro, seguido de Sobel e Prewitt, com trabalhos publicados entre as décadas de 1960 e 1970. Estas máscaras apresentam variação de tamanho e geralmente eram ajustadas para

diferentes orientações. Caso se utilizassem duas orientações, as máscaras calculavam as derivadas e as combinavam em uma estimativa de gradiente. A Figura 7 apresenta o fluxo de etapas dos algoritmos de detecção de bordas (RUZON, 2000).

Figura 7 - Fluxo de etapas dos algoritmos de detecção de bordas.



Fonte: Autor (2023), proposto por Ruzon (2000).

Rosenfeld (1970) propôs o algoritmo *Border following* (seguidor de borda), que segundo ele, tem a vantagem de requerer menos etapas do que algoritmos anteriormente propostos. Entretanto tende a ser um pouco mais complicado.

Hueckel (1971) formulou um conjunto de requisitos que devem ser atendidos por um operador de reconhecimento de borda e cita que a consideração mais importante na escolha dos requisitos é a compensação entre velocidade e confiabilidade na presença de ruídos.

Marr e Hildreth (1980) propuseram uma técnica para detecção de borda um tanto diferente. Essa técnica é basicamente composta por dois passos, sendo o primeiro a detecção de mudanças de intensidade, que é realizada separadamente em diferentes escalas, por meio de um filtro apropriado (que na prática pode ser o laplaciano). A segunda etapa consiste em combinar essas informações de diferentes canais em uma descrição da imagem.

Suzuki e Abe (1985) desenvolveram o algoritmo *Border Following*, como uma extensão do proposto por Rosenfeld. Neste novo algoritmo foi adicionada uma marca única em cada borda (etiquetagem) e também um procedimento para obter bordas “pai”.

Canny (1986) desenvolveu um detector de bordas que utiliza limiares adaptativos com histerese, que possibilitam eliminar listras indesejadas dos contornos. Os limites são definidos de acordo com o ruído presente na imagem.

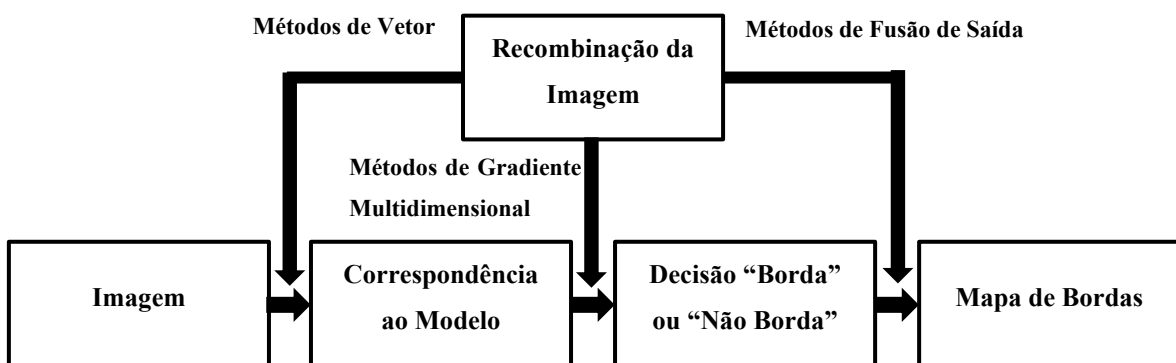
Bueno (2016) descreveu este detector em quatro estágios: uniformização da imagem (através de uma função gaussiana); diferenciação (cálculo dos gradientes); omissão dos pontos de mínima intensidade (as bordas ocorrem nos pontos de maior taxa de variação da intensidade ou maior gradiente); e limiarização da borda (aplica os conceitos de histerese).

2.4.2 Imagens coloridas

A utilização de imagens coloridas possibilita a inserção de novas tecnologias de detecção de borda. O uso dessas imagens adiciona uma etapa ao fluxo anteriormente citado para tal tarefa, a recombinação. As imagens são separadas em suas componentes de cor, e então são executados conjuntos de operações sobre cada componente. Estes resultados intermediários são então combinados para que se tenha o resultado final. Diferentes categorias de métodos de detecção de borda para imagens coloridas podem ser identificadas através do ponto em que a recombinação ocorre (RUZON e TOMASI, 2001).

A Figura 8 apresenta o fluxo de etapas dos algoritmos de detecção de bordas em imagens coloridas.

Figura 8 - Fluxo de etapas dos detectores de bordas em imagens coloridas.



Fonte: Autor (2023), proposto por Ruzon e Tomasi (2001).

2.4.3 Classificação de métodos

Papari e Petkov (2011) publicaram o artigo intitulado “*Edge and line oriented contour detection: State of the art*”, onde realizaram uma revisão abrangendo técnicas de detecção de contornos de forma bastante completa. Neste estudo, foram listados os principais detectores de contorno citados na literatura, sendo divididos em classes. Na Tabela 1 é apresentada a proposta dos autores, que relacionam as classes, o tipo de método, e as características principais. Este artigo se baseou em 292 referências bibliográficas, e na data de 11/09/2023, conta com 465 citações, segundo o site Google Acadêmico.

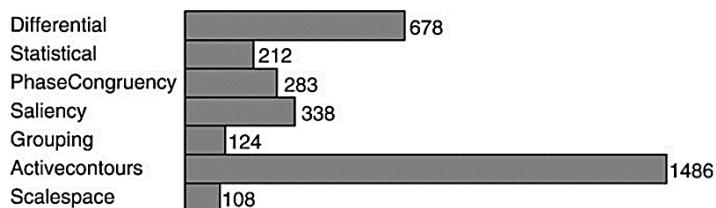
Tabela 1 - Detectores de contorno.

Local methods	Differential (simple, fast)	Basic concepts Zero-crossings, Marr–Hildreth, Optimal edge detection, Canny, Local fitting
	Statistical (texture boundaries)	Distribution of gray-levels Distribution of color and texture attributes Distribution of the gradient vector field
	Phase congruency (idempotence)	Quadrature filters, Gabor, Monogenic signal Applications
	VOS and morphological (color, salt and pepper noise) Features combination (optimization)	
Contextual and global methods	Saliency (low-contrast contours)	Surr. suppr. and facilitation Tensor voting Relaxation labelling
	Gestalt grouping (from edge pixels to contours)	Good continuation Closure Symmetry Directional dilation
	Active contours (user interaction)	Key concepts Gradient vector flow Region-based energy Shape priors
Multiresolution methods	Edge behavior in the scale space	
	Edge focusing (good localization and noise rejection)	
	Local scale control (different types of blurring)	

Fonte: Adaptado de Papari e Petkov (2011).

Neste mesmo estudo, os autores também apresentaram um levantamento da relação entre o número de citações e os principais tipos de métodos de detecção de contornos. A Figura 9 ilustra o número de Citações entre os anos 2004-2006 dos cinco artigos mais citados sobre detecção de contorno de cada área.

Figura 9 - Número de citações entre os anos 2004-2006.



Fonte: Papari e Petkov (2011).

Conforme pode ser observado na Figura 9 os métodos do tipo Diferencial e Contornos Ativos foram bastante citados, demonstrando a relevância de tais técnicas. Com relação aos

métodos locais do tipo Diferencial, os mesmos autores os categorizaram entre Formulações Contínuas e Formulações Discretas.

As formulações discretas compreendem as primeiras abordagens de filtragem, como os detectores de borda de Roberts, Sobel e Prewitt, além do detector de Canny, que propôs um filtro otimizado em relação aos critérios de: boa detecção, boa localização, e baixas respostas múltiplas. As formulações contínuas compreendem análises de descontinuidades no perfil de luminância, como pontos de alta magnitude de gradiente, a exemplo do operador laplaciano. De maneira geral, os métodos do tipo diferencial podem ser classificados como simples e rápidos (PAPARI e PETKOV, 2011).

Os métodos globais (que não consideram somente regiões vizinhas) do tipo Contornos Ativos, também conhecidos como Modelos Deformáveis ou *Snakes*, são abordagens baseadas na detecção de contorno de forma interativa. O princípio inicial é obter uma curvatura desenhada pelo usuário em torno de um objeto, para então, através da minimização da energia funcional, obter a detecção do contorno (PAPARI e PETKOV, 2011).

Segundo Leal et al. (2010): “*As Snakes inovaram na solução de problemas em que a detecção das bordas por gradiente forte não obteve êxito, devido aos contornos com pouco contraste, a presença de ruído, entre outros motivos.*”

2.4.4 Continuidade das pesquisas

A criticidade das ferramentas de detecção de bordas em aplicações que realizam medições e requerem certos níveis de exatidão, estimula o estudo dos localizadores de contorno e seu pré-processamento, de maneira contínua, visando a elaboração de novas técnicas e buscando incrementos de desempenho, bem como avaliando estas técnicas em diferentes contextos.

A exemplo destes trabalhos, Dutta e Chaudhuri (2009) desenvolveram um algoritmo para a detecção de bordas em imagens coloridas no espaço de cores RGB. Em seu artigo, estes apresentaram um método em quatro etapas: suavização por filtro de mediana adaptativo, cálculo da diferença de cor direcional, técnica de limiar e afinamento das arestas.

Os resultados deste tipo de pesquisa são então comparados a metodologias já presentes na literatura, elencando as principais vantagens e fragilidades das técnicas desenvolvidas.

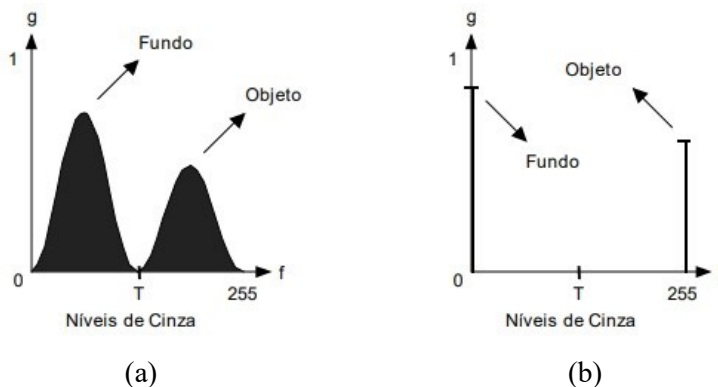
2.5 LIMIAÇÃO DE IMAGENS

Filho e Neto (1999) conceituaram acerca da limiarização de imagens:

“O princípio da limiarização consiste em separar as regiões de uma imagem quando esta apresenta duas classes (o fundo e o objeto). [...] A forma mais simples de limiarização consiste na bipartição do histograma, convertendo os pixels cujo tom de cinza é maior ou igual a um certo valor de limiar (T) em brancos e os demais em pretos [...]”

A forma de definição do limiar “ T ” (*Threshold*) está relacionada ao tipo de limiarização aplicado. A Figura 10 ilustra o efeito da aplicação do processo de limiarização sobre uma imagem monocromática, sendo: (a) o histograma de uma imagem original e, (b) o histograma desta imagem limiarizada.

Figura 10 - Histograma de limiarização de imagens.



Fonte: Filho e Neto (1999).

Para o processo de limiarização simples, o limiar T é escolhido arbitrariamente, ou seja, para cada pixel, o mesmo valor de limite é aplicado. Sendo o pixel inferior a este limite, este é definido como um valor mínimo, caso contrário, é definido como um valor máximo.

Alguns métodos de limiarização definem o limiar T de forma local. Sobre limiar adaptativo, Oliveira (2019) conceituou:

“A limiarização pode ser feita de formas diversas para cada região de vizinhança da imagem. Essa técnica é conhecida como limiarização adaptativa. Nesse processo, o valor do limiar é alterado para diferentes partes da imagem.”

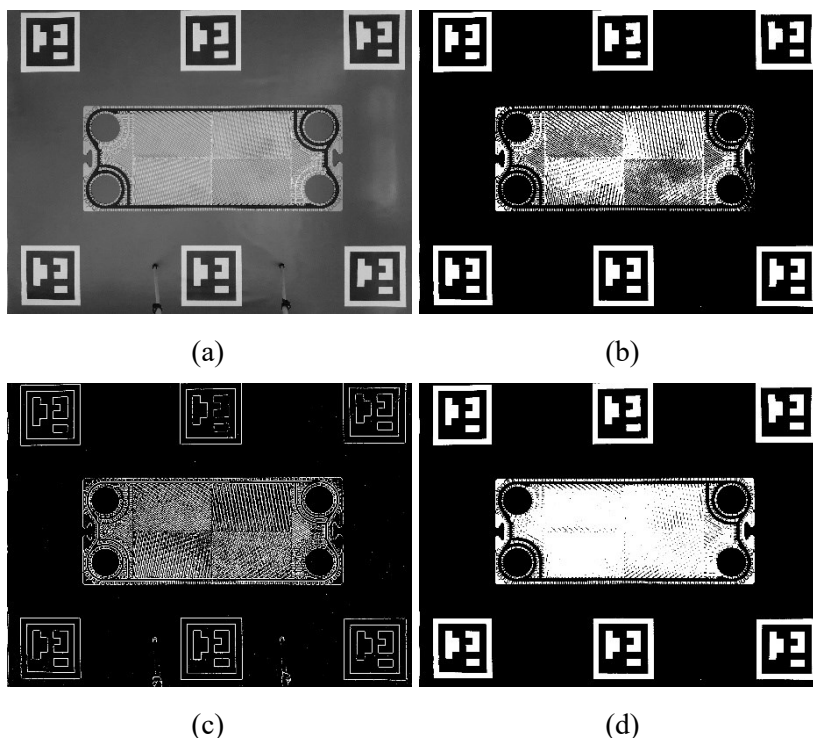
Os limites regionais da limiarização adaptativa podem ser calculados por diferentes técnicas como, por exemplo, através do cálculo da média ponderada dos elementos, subtraída uma constante. Este método pode também ser definido para diferentes tamanhos de vizinhança (OPENCV, 2023).

O método de limiarização proposto por Otsu (1979), assim como na limiarização simples, aplica um limiar global na imagem, entretanto, neste método, T é calculado de maneira automática. Esta técnica busca calcular o limite ideal a partir do histograma da imagem. Para um histograma bimodal (que consiste em dois picos), T seria calculado para estar entre estes dois valores (OPENCV, 2023).

Segundo Otsu (1979), em sua metodologia: *“Um limite ótimo é selecionado pelo critério discriminante, ou seja, de modo a maximizar a separabilidade das classes resultantes em níveis de cinza.”*

A Figura 11 ilustra os diferentes tipos de limiarização, sendo: (a) a imagem em escala de cinza (canal de cor B), (b) o limiar simples utilizando $T = 150$, (c) o limiar adaptativo da média ponderada sobre uma vizinhança = 21, subtraída a constante $C = 10$, (d) o limiar de Otsu.

Figura 11 - Exemplos de diferentes métodos de limiarização.



Fonte: Autor (2023).

2.6 FONTES DE ERRO EM MEDIÇÃO POR IMAGEM

Sistemas de medição de objetos baseados em visão computacional possuem fontes de erro típicas, que precisam ser consideradas no desenvolvimento de algoritmos.

Dentre estas fontes, pode-se citar o desalinhamento entre o objeto a ser medido e o sistema de captura da imagem. Segundo Ribeiro (2015):

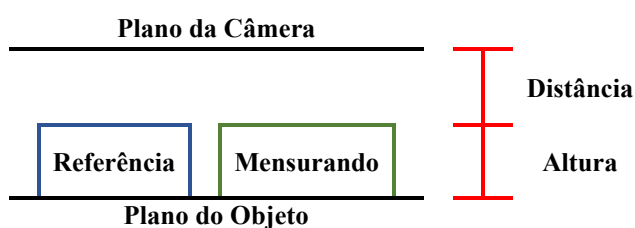
Para obter uma imagem, cujas proporções e forma sejam fidedignas ao objeto, é preciso que o sistema de captura de imagem e mensurando estejam alinhados. [...] Quando o alinhamento não atende aos requisitos exigidos, podem surgir fontes de incertezas relacionadas à distorção de perspectiva e à projeção 2-D.

A distância entre o objeto em questão e o sistema de captura da imagem também é um fator crítico. Essa distância afeta diretamente a relação entre pixels e milímetros, o que impacta diretamente na resolução do sistema de medição (RIBEIRO, 2015).

Sintetizando estas informações, sabe-se que caso a identificação da relação entre pixels e milímetros seja executada através de uma referência na própria imagem, deve-se garantir que esta referência esteja no mesmo plano do objeto a ser medido, e possua a mesma altura deste mensurando, para que a proporção identificada na referência seja a mesma do objeto.

A Figura 12 ilustra o alinhamento do sistema visando a minimização de erros.

Figura 12 – Alinhamento ideal do sistema.



Fonte: Autor (2023).

A iluminação do ambiente também é um fator que influencia diretamente no funcionamento de um aplicativo de visão computacional. As tarefas de processamento digital de imagem de baixo nível, inerentes a estes aplicativos, como por exemplo a segmentação, requerem uma iluminação boa e uniforme para que funcionem de forma robusta e com confiabilidade (KOPPARAPU, 2006).

Yi, Haralick e Shapiro (1995) relataram que o desempenho de um sistema de visão computacional depende da qualidade da imagem, que é diretamente afetada pela iluminação do sistema. Estes também discorrem que, para a obtenção de um melhor resultado, o objeto deve ser iluminado de tal maneira que as distinções entre as superfícies do mesmo sejam tão claras quanto possível.

2.7 DISTORÇÃO EM IMAGENS DIGITAIS

As câmeras digitais são constituídas de um conjunto de lentes, além dos elementos sensores. Sabino (2013) definiu:

Uma objetiva é uma lente óptica ou conjunto de lentes acoplada em uma câmera a fim de focar a luz emitida e refletida por um objeto e de reproduzir em uma mídia capaz de armazenar uma imagem quimicamente (filme) ou eletronicamente (sensores).

Sobre distorção das lentes, Côrtes (2010) conceituou:

São consideradas aberrações do sistema de lentes todas as perturbações sofridas pelos raios de luz ao atravessar o sistema de lentes que compõe uma objetiva e prejudicam a qualidade visual e geométrica de uma imagem.

Para o mesmo assunto, Junior (2014) afirmou:

[...] a distorção da lente é um problema significativo no estudo de imagens digitais, sendo a correção do efeito degradativo causado pela mesma uma tarefa essencial em fotogrametria e em visão computacional, principalmente em aplicações que requerem informação de medida e resultados precisos.

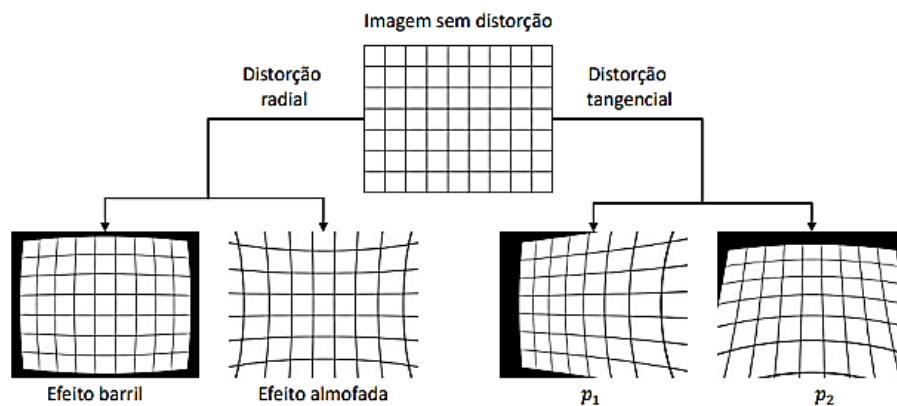
As principais fontes de distorção em imagens digitais podem ser modeladas em componentes radiais e tangenciais, em relação ao centro ótico da lente. As distorções radiais são ocasionadas principalmente por características físicas da lente utilizada, ao passo que as distorções tangenciais estão normalmente associadas à falta de alinhamento entre a superfície de captação do sensor e o eixo ótico da lente, ou a falhas na construção da lente (LOBÃO, 2004).

Segundo Santos (2018):

[...] a distorção radial gera dois tipos de fenômeno, denominados de barril e almofada. A perturbação do tipo barril é causada, nesse modelo, pela distorção radial negativa, realiza o deslocamento dos pontos aproximando-os do ponto principal da imagem [...]. Enquanto o efeito almofada é produzido, nesse modelo, pela distorção radial positiva, afastando os pontos em relação ao ponto principal da imagem [...]. A distorção tangencial é causada pela descentralização e desalinhamento dos elementos físicos da lente. Os efeitos da distorção tangencial são menos perceptíveis na maioria das câmeras [...].

A Figura 13 exemplifica os diferentes tipos de distorção radial e tangencial.

Figura 13 - Diferentes tipos de distorção.



Fonte: Santos (2018).

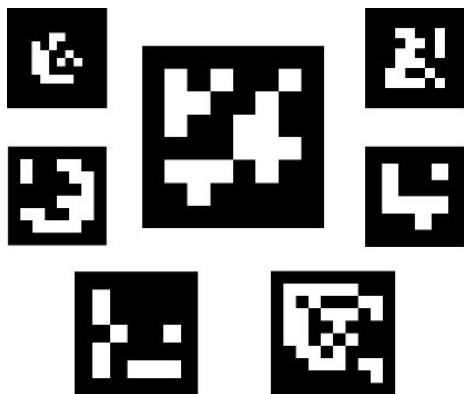
2.8 MARCADORES ARUCO

A estimativa de posição é uma tarefa de vasta utilização em aplicações de visão computacional, realidade aumentada, entre outros. A correspondência entre pontos no mundo real e as coordenadas de sua projeção na imagem 2D são uma tarefa de certa complexidade, sendo comum a utilização de modelos desenvolvidos especificamente para este fim, como os marcadores sintéticos ou fiduciais. Uma abordagem bastante utilizada são os marcadores quadrados binários, como os marcadores ArUco, desenvolvidos por Rafael Muñoz e Sergio Garrido (OPENCV, 2022).

O módulo ArUco faz parte da biblioteca de visão computacional OpenCV, descrita em mais detalhes na seção 3.1.1.3. Os marcadores consistem em um quadrado sintético composto

por uma borda preta e uma matriz binária interna, que tem por função determinar o seu identificador (OPENCV, 2022). A Figura 14 ilustra exemplos de marcadores ArUco.

Figura 14 - Exemplo de marcadores ArUco.



Fonte: OpenCV (2022).

Diversas pesquisas utilizam os marcadores ArUco para implementar funcionalidades em algoritmos de visão computacional, visando avaliar as capacidades e limitações dos mesmos frente a instrumentação convencional.

Pham, Tran, *et al.* (2021) desenvolveram um sistema de medição de nivelamento entre superfícies planas utilizando marcadores ArUco. Tal processo, por exemplo, tem aplicabilidade nas indústrias montadoras de automóveis, no alinhamento de peças mecânicas.

Hoefgeest, Garcia e Gonzalez (2021) propuseram um sistema para a localização de robôs móveis. Tal implementação utiliza um anel de câmeras, a instalação de marcadores ArUco no ambiente e um algoritmo capaz de realizar o mapeamento. Tal projeto visa evitar o uso dos sensores laser, devido ao seu custo elevado, e tem sua possível aplicabilidade na indústria, para a inspeção e o reparo de chapas de aço.

Tian, Chen, *et al.* (2020) elaboraram um programa para a detecção de marcadores ArUco embarcado em uma plataforma *Raspberry Pi*. As imagens são capturadas por uma câmera conectada a placa, que através do algoritmo, coletam os dados de posicionamento. Tal programa tem por objetivo controlar a movimentação de dispositivos de assistência médica elétricos, como por exemplo da cadeira de rodas que foi objeto do estudo. Combinado com o modelo cinemático da cadeira, este método pode realizar a navegação e o posicionamento da mesma, visando a redução nos custos de assistência médica.

Lupu, Herghelegiu, *et al.* (2017) desenvolveram um sistema de realidade virtual para recuperação de AVC (Acidente Vascular Cerebral) em membros superiores, utilizando marcadores ArUco. Este sistema fornece um *feedback* (opinião ou avaliação) visual ao paciente, nas tarefas de recuperação motora. O membro do paciente que está sujeito a tarefas de recuperação é monitorado por uma câmera, que rastreia os movimentos dos marcadores, fixados no próprio membro. As imagens são processadas em tempo real e o avatar do membro é exibido ao paciente.

As câmeras, que são peças-chave nos aplicativos de visão computacional, contribuem com distorções em imagens digitais, conforme discutido na seção 2.7. O processo de compensação de parte destes erros ocorre por meio da calibração da câmera, que é tratada com mais detalhes na seção 3.1.3. Alguns trabalhos utilizam a tecnologia dos marcadores ArUco para auxiliar no processo de calibração de câmeras.

Kroeger, Huegle e Niebuhr (2019) desenvolveram uma abordagem para a calibração automatizada de um sistema de múltiplas câmeras e um robô. O robô é utilizado para a calibração de parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera, facilitando a captura de imagens de pontos de vista diferentes. Para a calibração extrínseca são utilizados dois marcadores ArUco na base do robô. Tal processo visa facilitar aplicações industriais onde ocorrem reconfigurações de ambiente, ou movimentos acidentais por toque ou vibração, que alteram o posicionamento das câmeras, requerendo uma nova calibração.

2.9 METROLOGIA CIENTÍFICA

A palavra metrologia tem definição etimológica de origem grega, *metron*: medida e *logos*: ciência. A metrologia é aplicada a todos os ramos da ciência em que são necessárias tecnologias de medição, sendo assim uma atividade de suma importância no Brasil e no mundo, tendo em vista que, por exemplo, a qualidade e a confiabilidade de um produto dependem da análise e padronização pertencentes a Metrologia e à medição (NETO, 2012).

No Brasil, o INMETRO é o órgão (autarquia federal) responsável por executar as políticas nacionais de metrologia e da qualidade, dentre outras competências e atribuições (INMETRO, 2023).

Esta instituição publicou o documento intitulado: *Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados* (2012), onde são definidos conceitos importantes desta temática. O VIM é baseado em um documento originalmente construído por instituições de reconhecimento internacional, ligadas a área de metrologia, e é uma referência para as literaturas deste setor. Esse documento visa uma harmonização internacional de terminologias utilizadas nos campos da metrologia e instrumentação (NETO, 2012).

Tal documento define metrologia como: “*Ciência da medição e suas aplicações. A metrologia engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação.*”

O mesmo conceitua também medição, como:

Processo de obtenção experimental dum ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza. A medição não se aplica a propriedades qualitativas. A medição implica a comparação de grandezas ou a contagem de entidades. A medição pressupõe uma descrição da grandeza que seja compatível com o uso pretendido dum resultado de medição, segundo um procedimento de medição e com um sistema de medição calibrado que opera de acordo com o procedimento de medição especificado, incluindo as condições de medição.

As operações de medição podem ser classificadas como manuais ou automáticas. A medição manual é feita a partir do conhecimento e da habilidade do operador. Um exemplo de medição manual é a leitura de um paquímetro universal. Este processo requer do profissional responsabilidade, cuidado e domínio dos instrumentos, entre outros. As medições automáticas são feitas por máquinas ou instrumentos, sem a interferência direta do operador, como por exemplo máquinas que medem automaticamente a dimensão de peças, utilizando sensores eletrônicos. Em ambos os casos a peça ou objeto a ser medido se chama mensurando (NETO, 2012).

O mensurando é o objeto da medição, ou seja, a grandeza específica submetida à medição. A operação de medição é realizada por um dispositivo denominado instrumento de medição, ou de forma mais abrangente, sistema de medição (SM), incluindo desde instrumentos mais simples até aqueles compostos por vários módulos interligados. Denomina-se processo de medição o conjunto de métodos e meios utilizados para efetuar uma medição, sendo que fazem

parte, além do mensurando e do SM, o operador, os procedimentos de medição utilizados e as condições em que as medições são efetuadas (JR e SOUSA, 2018).

Todas as medições são acometidas de erros. Para realizar uma medição onde não existissem erros, seriam necessários: um SM perfeito; um ambiente controlado e perfeitamente estável; um operador perfeito; e que o mensurando tivesse um valor único, perfeitamente definido e estável. Na prática estas condições não costumam ocorrer isoladamente, tão pouco simultaneamente, sendo assim os erros de medição estão sempre presentes (JR e SOUSA, 2018).

Lira (2010) descreveu erro de medição como: *“o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando.”*

O valor verdadeiro (VV) de um mensurando é consistente com a definição de uma dada grandeza específica, ou seja, seria obtido por uma medição perfeita. Dessa forma, valores verdadeiros são por natureza indeterminados. Na prática, é utilizado o conceito de valor verdadeiro convencional (VVC), que consiste no valor atribuído a uma grandeza específica e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza apropriada para uma dada finalidade (LINK, 1997).

O erro de medição pode ser decomposto em erro sistemático e erro aleatório. O erro sistemático corresponde ao valor médio do erro de medição, ao passo que o erro aleatório é a parcela imprevisível do erro de medição, responsável pelas variações encontradas em medições repetidas. O erro sistemático é a parcela previsível do erro de medição, sendo passível de compensação (JR e SOUSA, 2018).

Segundo Lira (2010): *“O erro sistemático pode ser causado por um desgaste do sistema de medição, por um dos ajustes, por fatores construtivos, pelo método de medição, por condições ambientais etc.”*

Na prática, realiza-se uma estimativa aproximada do erro sistemático, denominada tendência (JR e SOUSA, 2018). O cálculo da tendência (Td) é expresso na Equação 4, onde \bar{I} é a média de um número finito de indicações e, VVC o valor verdadeiro convencional do mensurando.

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (4)$$

Sobre o erro aleatório, Lira (2010) comentou: *“Os fatores que contribuem para o aparecimento do erro aleatório podem ser devido aos atritos, vibrações, folgas, flutuações de rede, instabilidade interna, condições ambientais etc.”*

Conforme já citado, todas as medições incluem a ocorrência de erros. Não são possíveis o conhecimento e a correção total do erro de medição. Sendo assim, uma parcela de dúvida sempre estará presente em qualquer medição efetuada. A dúvida associada a uma medição é denominada incerteza de medição (JR e SOUSA, 2018).

Link (1997) abordou incerteza de medição como: *“Parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser, fundamentalmente, atribuídos a um mensurando.”*

Para Lira (2010), incerteza de medição pode ser conceituada como: *“Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.”*

Segundo Jr e Sousa (2018): *“Incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a faixa de valores dentro da qual, para uma dada probabilidade de abrangência, estará o valor verdadeiro do mensurando.”*

Sobre as fontes de incerteza de medição, e a combinação destas, Jr e Sousa (2018) comentaram:

Todos os fatores que fazem parte do processo de medição têm influência sobre sua incerteza de medição. [...] Fonte de incerteza é qualquer fator que gera dúvidas no resultado de um processo de medição e contribui para sua incerteza. [...] As contribuições das diversas fontes de incerteza que agem simultaneamente em um processo de medição devem ser combinadas para formar parâmetros únicos equivalentes e válidos para o processo de medição como um todo [...]. [...] A incerteza de medição combinada é a incerteza de medição equivalente à ação simultânea de todas as fontes de incerteza que agem sobre o processo de medição.

Em determinadas situações, algumas fontes de incerteza certamente têm um peso muito maior que outras. Para Jr e Sousa (2018):

Uma fonte de incerteza será considerada dominante se seus efeitos forem sensivelmente maiores que os efeitos das demais. [...] Embora possa parecer uma condição artificial, não é raro encontrar processos de medição nos quais existe uma fonte de incertezas dominante em relação às outras.

2.10 TRABALHOS CORRELATOS

Em diversas áreas de conhecimento são analisados e elaborados algoritmos equipados com pacotes de visão computacional e metodologias de processamento digital de imagem, almejando identificar limitações e potencialidades e se apropriar de novas ferramentas de trabalho. Os trabalhos citados na sequência são exemplos destes estudos.

Martins e Junior (2011) propuseram um sistema de inspeção de solda baseado em visão computacional. Tal sistema consiste na captura de imagens (fotos de corpos de prova em secção transversal) e posterior processamento digital da imagem, identificando a região de interesse (filete de solda) e realizando medições dimensionais sobre esta região. A calibração do tamanho do pixel é realizada através da interface, onde o usuário indica a espessura da chapa superior.

Salis (2008) revisou e discutiu sobre aplicações da visão computacional na indústria siderúrgica, nos ramos de inspeção automática, metrologia, supervisão e controle de processos entre outras aplicações. Neste trabalho foram também levantados quatro estudos de caso, para os quais foram desenvolvidos protótipos de aplicações para a análise de viabilidade, sendo estes: Detecção de Perfis na Entrada da Serra Fixa da Laminação de Perfis; Rastreamento de Perfis na Entrada da Serra de Pontas; Inspeção Automática Por Partículas Magnéticas Fluorescentes; Detecção de Entupimentos nos Sopradores de Carvão do Alto-Forno.

Li, Han e Li (2015) desenvolveram um sistema de medição sem contato baseado em visão computacional, orientado a medição de peças mecânicas. Esse sistema é composto por um hardware, que contém uma estrutura mecânica, fonte de luz, lente, câmera, cartão de aquisição de imagem e computador, e um software que contém algoritmos de processamento digital de imagem. Tal sistema se assemelha a sistemas de escaneamento.

Oliveira (2015) desenvolveu um sistema de visão computacional para a medição e inspeção de estatores. Tal aplicação visa identificar a ocorrência de falhas na fabricação de estatores de motores elétricos. Foram analisadas soluções para três grupos de falhas, sendo estas: condutores das bobinas em contato com o rotor e condutores das bobinas na trajetória de inserção do rotor; isolantes ausentes ou fora do lugar; e cabos fixados incorretamente dentro da caixa de tomadas. Para cada tipo de solução foi utilizado um conjunto de técnicas de processamento digital de imagem para a detecção das falhas.

Röper (2019) elaborou um sistema de visão computacional para a inspeção de produtos gerados em máquina refiladeira de madeira, capaz de identificar imperfeições laterais nas tábuas serradas, e realizar a medição da largura de matéria prima aproveitável. O sistema é composto de uma estrutura mecânica (incluindo esteira de transporte), motores, drivers, circuito microcontrolador, sensores, e uma câmera para a aquisição das imagens, que são recebidas pelo software de gerenciamento do ensaio, que executa o processamento digital da imagem.

Oselame e Neves (2014) propuseram um sistema de hardware e software para o acompanhamento de lesões dermatológicas. O hardware foi construído a partir da adequação de uma câmera webcam, adicionando um conjunto de LEDs para o aumento da iluminação, e também uma lente de aumento. O software implementado utiliza técnicas de processamento digital de imagem para contabilizar os pixels existentes no contorno da área de interesse, e posteriormente converte os resultados em centímetros quadrados, após um processo de calibração.

Faustinelli (2021) desenvolveu um sistema de alinhamento de prótese de membro inferior baseado em visão computacional. Tal sistema captura imagens do paciente e, através do processamento digital da imagem e da interação com usuário, retorna distâncias entre os pontos anatômicos de interesse ao alinhamento.

Belan, Araújo e Librantz (2012) propuseram a utilização de técnicas de visão computacional aplicadas na calibração de instrumentos de medição com display digital sem interface de comunicação de dados. Visando a produtividade dos laboratórios de calibração e a fidelidade de resultados, tal trabalho utiliza o processamento digital de imagem para colher os dados de indicação dos instrumentos de medição. As principais etapas do algoritmo são: a aquisição da imagem; determinação da região de interesse; pré-processamento (que promove a remoção de ruídos); reconhecimento dos dígitos; e obtenção dos dados.

Fabre (2019) desenvolveu um sistema mecatrônico para a identificação de defeitos geométricos dimensionais de placas cerâmicas por meio de técnicas de visão computacional, visando a inspeção automatizada de peças na indústria da cerâmica. Tal sistema é composto por uma estrutura mecânica (contendo uma esteira transportadora e uma câmara para a captura das imagens) e um hardware, incluindo: motor de passo e driver de acionamento; circuito microcontrolador; câmera; e um emissor de linha laser.

Othman, Salur, *et al.* (2018) propuseram um sistema de visão computacional para detectar e calcular a dimensão de objetos em tempo real. Tal sistema foi embarcado na plataforma Raspberry Pi, e adquire as imagens através do acessório Raspberry Câmera. Para o cálculo das dimensões no sistema métrico é realizada a calibração do sistema através da medição de um objeto de referência.

Junji, Li, *et al.* (2010) desenvolveram um sistema para a detecção rápida do tamanho de tijolos refratários baseado em visão computacional, visando a aplicação no controle de qualidade dos mesmos. Esse sistema é composto por uma câmera, iluminação de LED e um computador equipado com o algoritmo para o processamento digital da imagem.

Chen, Men, *et al.* (2018) projetaram um algoritmo baseado em visão computacional para identificar as bordas da madeira laminada bruta e ajustar o centro da mesma, na máquina de corte de arestas, através do cálculo desta dimensão e do acionamento do motor.

Megel, Kutsenko, *et al.* (2021) propuseram um sistema para automatização de processos de detecção, reconhecimento e medição de objetos biológicos. Esse sistema é baseado em um algoritmo de visão computacional, e além de detectar os animais, permite estimar algumas características físicas dos mesmos, como o grau de gordura do animal (estimativa de peso sem contato), que é um dos componentes utilizados na determinação de seu estado de saúde.

Ghodrati, Mohseni e Kandi (2019) propuseram um método de avaliação de rugosidade com base em algoritmos de detecção de bordas de imagens. Tal método foi aplicado para investigar a rugosidade superficial da mistura polipropileno/etileno-propileno-dieno-monômero.

2.10.1 Considerações

Para a execução dos estudos elencados, foram utilizadas diferentes plataformas de software, dentre estas: Python, C++, Matlab, LabVIEW, e a biblioteca OpenCV, que possui integração com a linguagens C++, Python e Java.

Cada pesquisa avaliou uma metodologia diversa de processamento digital de imagem, buscando atender as especificidades de cada aplicação. A Tabela 2 ilustra as principais características destes trabalhos.

Tabela 2 – Características dos trabalhos.

Referência	Área	Objetivo Técnico	Linguagem de Programação	Principais Etapas do Processamento Digital de Imagem (PDI)
Martins e Junior (2011)	Mecânica	Inspeção de Solda	-	Leitura; Calibração(proporção); Normalização (0 a 1); Binarização; Segmentação; Medição; Resultados.
Salis (2008)	Siderúrgica	Caso: Rastreamento de Perfis na Entrada da Serra de Pontas	Biblioteca OpenCV; Plataforma Visual C++	Seleção do ROI; Conversão para HSV; Decompor H, S, V; Binarização "V" e "H"; Inversão de H; Operação AND; Erosão da imagem; Procura pelas estruturas contínuas; Busca das referências de início e fim; Retorna resultados.
Li, Han e Li (2015)	Mecânica	Medição de Peças Mecânicas	Plataforma Visual C++	Filtro de Mediana; Limiarização; Detecção de borda; Transformada de Hough modificada; Coeficiente de conversão (calibração); Resultado.
Oliveira (2015)	Elétrica	Caso: Algoritmo de Detecção de Condutores no Estator	LabVIEW	Identificação do ROI; Obtenção dos níveis de cinza; Aplicação de limiar; Detecção de bordas; Filtro de suavização; Detecção de bordas; Resultado visual.
Röper (2019)	Beneficiamento de Madeira	Otimização de Corte de Madeira	Plataforma QT Creator C++	Transformação para escala de cinza; Binarização; Escolhe os limiares de madeira limpa; Seleciona o maior componente; Analisa e mostra o resultado.
Oselame e Neves (2014)	Saúde	Acompanhamento de Lesões Dermatológicas	Matlab	Segmentação dos canais de cores; Aplicação de limiar; Contabilização dos pixels do contorno; Conversão para cm ² ; Resultados.
Faustinelli (2021)	Saúde	Alinhamento de Prótese de Membro Inferior	Python; OpenCV	Aquisição manual de pontos; Cálculo da relação pixels/mm; Obtenção do ângulo de rotação; Realização de giro; Nova aquisição de pontos; Cálculo das distâncias resultado.
Belan, Araújo e Librantz (2012)	Metrologia	Leitura Automática de Displays	C++; Biblioteca Proeikon	Determinação do ROI; Limiarização; Remoção de pequenos componentes conexos; Cálculo do histograma de projeção; Reconhecimento dos dígitos; Resultados.
Fabre (2019)	Indústria da Cerâmica	Inspeção em Peças da Indústria da Cerâmica	C++; OpenCV	Segmentação dos canais de cores; Opção pelo canal vermelho (laser); Binarização; Homografia; Calcular as distâncias; Resultados.
Othman, Salur, <i>et al.</i> (2018)	Computação	Detecção e Medição de Objetos em Tempo Real	Python; OpenCV	Conversão para escala de cinza; Filtro Gaussiano; Detecção de bordas; Dilatação e erosão; Detecção do contorno; Cálculo da relação mm/px; Calcular as distâncias; Resultado.
Junji, Li, <i>et al.</i> (2010)	Civil	Medição do Tamanho de Tijolos Refratários	-	Detecção de bordas; Ligação da borda; Segmentação das arestas; Cálculo das distâncias entre as arestas; Resultados.
Chen, Men, <i>et al.</i> (2018)	Beneficiamento de Madeira	Corte de Bordas de Maneira Laminada	-	Conversão para escala de cinza; Filtro de Mediana; Subtração do fundo; Detecção de bordas; Cálculo do ajuste de posição; Acionamento dos motores para o corte.
Megel, Kutsenko, <i>et al.</i> (2021)	Agronegócio	Reconhecimento e Medição de Objetos Biológicos	-	Segmentação de canais; Conversão para escala de cinza; Detecção de bordas; Conversão de espaço de cores; Cálculo dos parâmetros do animal; Resultados.
Ghodrati, Mohseni e Kandi (2019)	Materiais	Avaliar a Rugosidade de Materiais a partir de diferentes detectores de bordas	-	Aquisição das imagens (diferentes resoluções); Filtro de mediana; Detecção de borda; Cálculo da frequência de borda; Ajuste de curva; Cálculos finais; Resultados.

Fonte: Autor (2023)

Conforme explanado na seção 2.4 as técnicas de detecção de bordas e contornos e seu pré-processamento são etapas críticas ao processamento digital de imagem, principalmente, quando da elaboração de algoritmos voltados a realização de medições, onde é requerido certo nível de exatidão. Continuamente estão sendo realizados estudos visando a elaboração de novas técnicas, bem como avaliando as técnicas já existentes em diferentes contextos.

Com relação a etapa de pré-processamento, foram identificadas três opções principais de abordagem. A primeira, aplicada na pesquisa de Röper (2019), por exemplo, consiste na conversão direta da imagem original para escala de cinza, seguido das operações subsequentes. A segunda alternativa, realizada na pesquisa de Fabre (2019), por exemplo, consiste na decomposição da imagem em seus canais de cores e, a seleção de camadas específicas para a execução das operações seguintes.

Nesta pesquisa será abordada a tratativa citada por Ruzon e Tomasi (2001), que consiste na recombinação de imagens digitais. Para tanto, é realizada uma análise das configurações possíveis de recombinação, que atendem as demais características da metodologia em proposição, com posterior seleção da proposta mais adequada, visando assim, maximizar o aproveitamento das características que estão adicionalmente presentes em imagens coloridas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os principais métodos e os materiais utilizados na análise e no desenvolvimento desta pesquisa, na caracterização das amostras de placas gaxetadas e nos testes do sistema de medição a que se refere a metodologia proposta neste trabalho.

3.1 ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da metodologia de PDI, foram analisadas primariamente diferentes plataformas de programação, o fluxo de operação dos algoritmos de visão computacional e técnicas de calibração de câmeras, itens constantes neste capítulo.

3.1.1 Plataformas e ferramentas disponíveis

Neste capítulo serão apresentadas as principais plataformas de programação que possuem suporte para elaboração de algoritmos de visão computacional e os principais conjuntos de ferramentas disponíveis.

3.1.1.1 LabVIEW

O software LabVIEW consiste em um ambiente de programação gráfica que os engenheiros usam para desenvolver pesquisas automatizadas, validação e sistemas de teste de produção (NATIONAL INSTRUMENTS, 2023).

Esta linguagem abarca os conceitos de instrumentação virtual e possui um grande número de ferramentas e bibliotecas já desenvolvidas, incluindo recursos voltados para aplicações de visão computacional.

O módulo de desenvolvimento *Vision* auxilia no desenvolvimento de aplicativos de visão de máquina e processamento de imagens através de abordagens adaptáveis. Esse módulo pode ser utilizado para configurar câmeras, personalizar a análise de imagens e gerar resultados de testes de produção e validação (NATIONAL INSTRUMENTS, 2023).

Dentre as ferramentas disponíveis no módulo *Vision*, alinhadas aos objetivos desta pesquisa, pode-se citar a *IMAQ Clamp*, que consiste em um instrumento virtual capaz de localizar bordas e medir distâncias. Esta ferramenta possui variações para medições de máximo e mínimo, bem como medições horizontais e verticais.

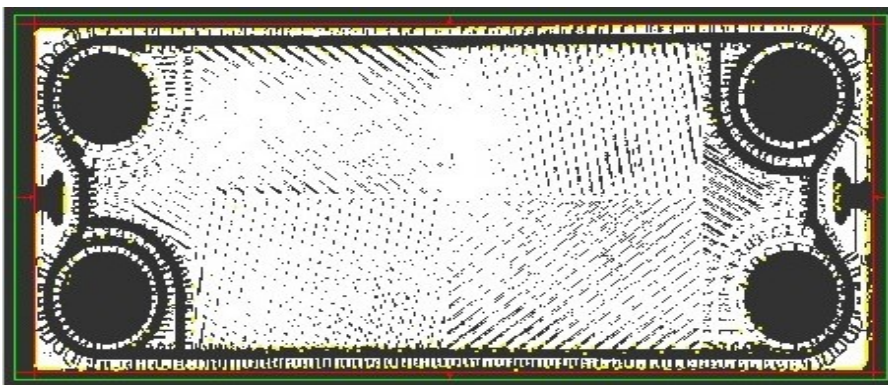
Tal abstração se baseia na ferramenta *IMAQ Rake*. Trata-se de um código capaz de encontrar pontos de borda em múltiplos contornos. Essa ferramenta trabalha através de uma região de busca retangular, e do ponto de vista de detecção de borda, comporta-se como o código *IMAQ Edge Tool* (NATIONAL INSTRUMENTS, 2004).

O pacote *Vision* possui duas técnicas para realizar a detecção de borda. Esses dois métodos calculam a força da borda ao longo de um perfil de uma dimensão. A ferramenta *IMAQ Rake* estende o uso desta detecção para um perfil de duas dimensões. Com relação a técnicas para a detecção de borda, pode-se citar o método simples, que funciona bem quando há pouco ruído na imagem e uma demarcação definida entre o objeto e o fundo, bem como o método de detecção avançada (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

O algoritmo de detecção de bordas avançado funciona através da aplicação de um *Kernel* operador. Este operador é uma aproximação local de uma transformada de Fourier da primeira derivada, e é aplicado sobre cada ponto na região de pesquisa onde as bordas devem ser detectadas (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

A Figura 15 apresenta a imagem de saída após a detecção de contorno de um objeto e captura das distâncias máximas de altura e largura. Os respectivos medidores de distância podem ser observados na cor vermelho.

Figura 15 - Detecção de contorno LabVIEW.



Fonte: Autor (2023).

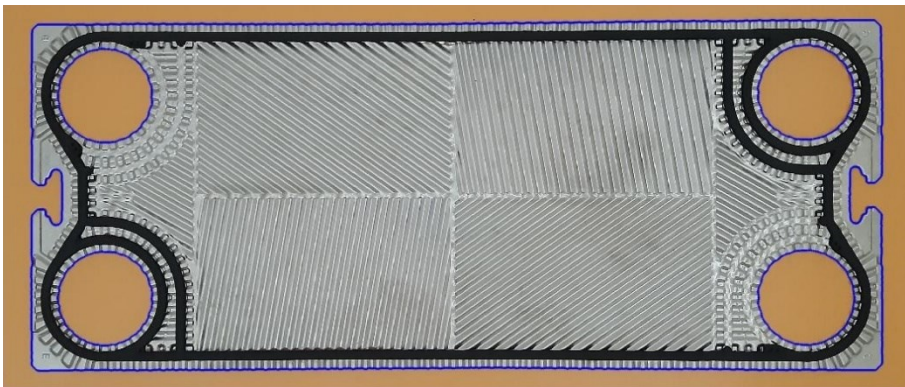
3.1.1.2 Matlab

O software Matlab consiste em uma plataforma de programação e computação numérica utilizada por engenheiros e cientistas para a análise de dados, desenvolvimento de algoritmos e criação de modelos (MATHWORKS, 2023).

Para implementações envolvendo processamento de imagens digitais, a plataforma Matlab possui o conjunto de ferramentas *Image Processing Toolbox*, que fornece um pacote abrangente de algoritmos para auxiliar em tarefas como: segmentação de imagens, aprimoramento de imagens, redução de ruído, transformações geométricas, entre outros. Dentre as ferramentas existentes, esse módulo possui filtros de detecção de borda, seguindo as metodologias de Sobel, Prewitt, Canny e Laplaciano (MATHWORKS, 2023).

Esse conjunto de ferramentas integra também uma função específica para a detecção de contornos em objetos. A aplicação desta função pode ser observada na Figura 16, com o contorno detectado apresentado em azul. Tal função é baseada na função elaborada por Gonzalez et al. (2004) (MATHWORKS, 2023).

Figura 16 - Detecção de contorno Matlab.



Fonte: Autor (2023).

Gonzalez et al. (2004) aborda a representação de uma imagem segmentada, definindo uma região como um componente conectado, e o limite (também chamado de borda ou contorno) de uma região, como o conjunto de pixels na região que tem um ou mais vizinhos que não estão na região, sendo estes vizinhos os pontos do fundo.

A função em Matlab elaborada por Gonzalez et al. (2004) é implementada a partir de imagens binárias, e baseia-se nos conceitos de vizinhança e conectividade entre pixels. Tal função é apresentada pela Equação 5, onde “ f ” é a imagem binária, “ $coon$ ” representa a conectividade entre pixels (podendo ser 4 ou 8) e, “ dir ” representa a direção (podendo ser “ cw ” para sentido horário ou “ ccw ” para anti-horário).

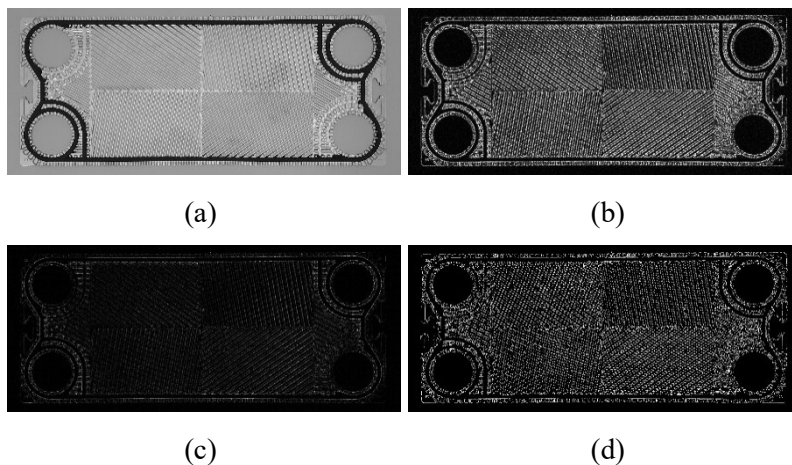
$$B = boundaries(f, coon, dir) \quad (5)$$

3.1.1.3 Python e OpenCV

A linguagem de programação Python possui código aberto e é utilizada em uma vasta gama de algoritmos, podendo ser aplicada em diversas plataformas como Windows e Linux, por exemplo (PYTHON S. F., 2023). OpenCV é uma biblioteca de visão computacional e aprendizado de máquina, também de código aberto, que possui diversas interfaces, incluídas através da linguagem Python (OPENCV, 2023).

Através deste conjunto é possível a elaboração de algoritmos capazes de realizarem tarefas de detecção de bordas e contornos. Dentre as ferramentas existentes na biblioteca OpenCV, estão disponíveis filtros de detecção de bordas com os operadores de Sobel, Canny e Laplaciano. A Figura 17 apresenta o resultado da aplicação dos operadores de Sobel (b), Laplaciano (c) e Canny (d) sobre uma imagem em escala de cinza (a).

Figura 17 - Detectores de borda biblioteca OpenCV.

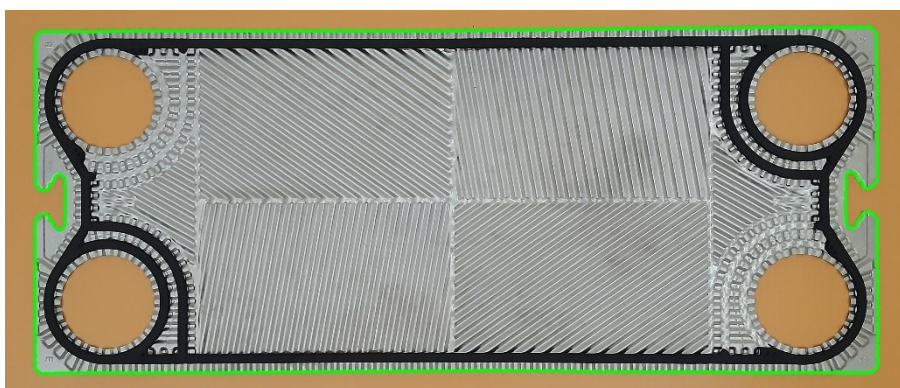


Fonte: Autor (2023).

A biblioteca OpenCV possui também uma função específica para a detecção de contornos. Essa função recupera contornos através do algoritmo de detecção de bordas proposto por Suzuki e Abe (1985), que já foi citado neste trabalho. Os contornos detectados são uma ferramenta útil para análise de formas e detecção de objetos (OPENCV, 2022).

Na Figura 18 é apresentada uma imagem após a detecção do contorno do objeto, utilizando-se desta função. O contorno detectado pode ser observado pela marcação na cor verde.

Figura 18 - Detector de contorno biblioteca OpenCV.



Fonte: Autor (2023).

3.1.2 Fluxo de operação em visão computacional

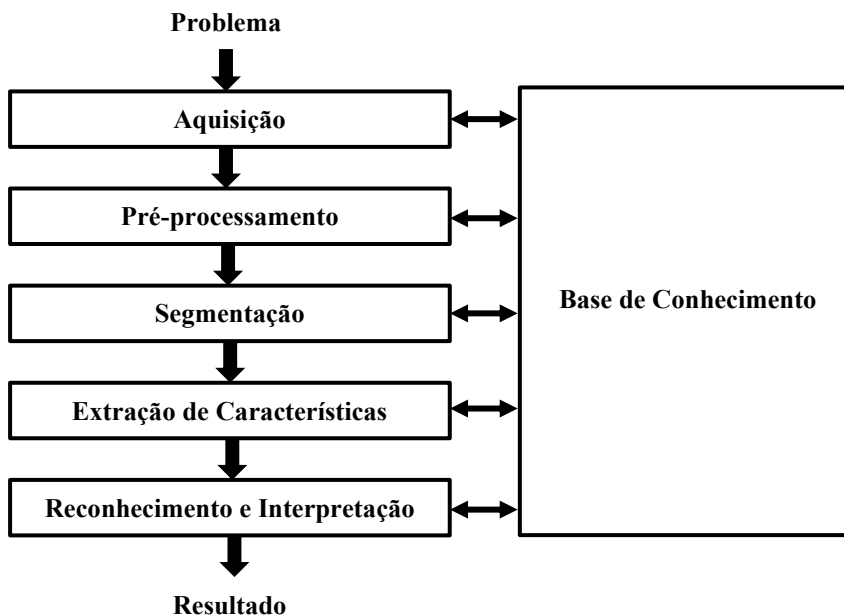
Os sistemas de visão computacional, de maneira geral, seguem um fluxo de operação estruturado. Tal fluxo é citado de maneira semelhante em diversos trabalhos e na literatura da área. Filho e Neto (1999) definiram: “*Sistema de Visão Artificial (SVA) como um sistema computadorizado capaz de adquirir, processar e interpretar imagens correspondentes a cenas reais*”.

A primeira etapa de operação consiste em adquirir as informações dos sensores e câmeras digitais, que serão a base para o processamento digital da imagem. Obtidas estas informações, o algoritmo inicia o pré-processamento, que consiste na aplicação de filtros, entre outros ajustes, que auxiliem nas atividades de remoção de ruídos e aprimoramento da qualidade da imagem (FILHO e NETO, 1999).

Com a imagem preparada, é realizada então a segmentação de objetos e/ou zonas de interesse, ou seja, a divisão da imagem em zonas significativas, para que no passo seguinte sejam extraídas as características relevantes ao processamento principal do algoritmo. Por fim, os dados são reconhecidos e interpretados, de forma a produzir os resultados do sistema. Em todas as etapas podem ser consultadas as informações alocadas nas bases de conhecimento, guiando o processo e permitindo as realimentações necessárias (FILHO e NETO, 1999).

Filho e Neto (1999) apresentaram esta estrutura de operação conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Fluxo de operação.



Fonte: Autor (2023), proposto por Filho e Neto (1999).

3.1.3 Calibração de câmera

A calibração de câmeras é uma etapa necessária em visão computacional, quando se trata da extração de informações métricas em imagens 2D (ZHANG, 2000).

As plataformas de programação citadas no capítulo 3.1.1 possuem funções específicas para os processos de calibração de câmeras, visando corrigir e minimizar as distorções descritas em 2.7.

A biblioteca OpenCV possui a função *Calibrate Camera*, que estima os parâmetros intrínsecos da câmera e os parâmetros extrínsecos de uma visualização, através de um algoritmo baseado nos métodos e implementações de Zhang (2000) e Bouguet (2003) (OPENCV, 2023).

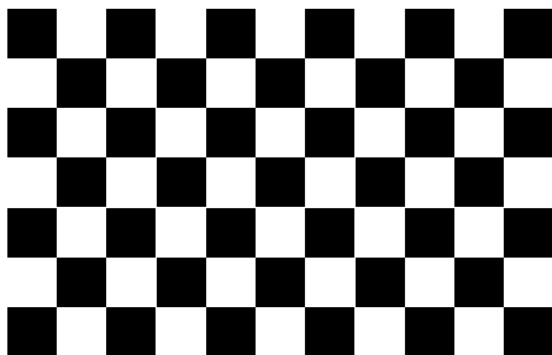
Para Silvatti (2013):

Calibração de câmeras é um processo realizado para determinar os parâmetros intrínsecos e extrínsecos das câmeras. Parâmetros intrínsecos estão associados às características físicas internas de uma câmera, como a geometria de montagem da câmera, as características e configuração das lentes, as características do elemento sensor, a distância focal, as coordenadas do centro da imagem, o tamanho do pixel da imagem e os parâmetros de distorção da imagem. Parâmetros extrínsecos são definidos pela posição tridimensional e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas do mundo.

No processo de calibração de câmeras as coordenadas dos pontos do objeto 3D e suas projeções 2D precisam ser especificadas e, para isso, deve ser utilizado um objeto com geometria conhecida e pontos facilmente detectáveis, sendo este objeto denominado padrão de calibração (OPENCV, 2023).

Dentre os padrões de calibração disponíveis, diversos trabalhos citam a utilização do padrão do tipo xadrez, que pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Padrão de calibração xadrez.



Fonte: Laureano (2013).

O módulo OpenCV possui a implementação de detecção automática de padrões do tipo xadrez, por meio da função *findChessBoardCorners* (LAUREANO, 2013).

Dentre as alternativas de uso de padrão de calibração, pode-se citar a aplicação dos marcadores autocodificados, como por exemplo os marcadores ArUco, já citados na seção 2.8.

Laureano (2013) comenta sobre a utilização de marcadores autocodificados na calibração de câmeras:

Essa abordagem é interessante por promover uma representação mais controlada dos pontos de controle no ambiente com o objetivo de reduzir a detecção de falsos positivos. Sua robustez baseia-se na regularidade do marcador e também em sua unicidade na cena, sendo muito difícil a ocorrência natural de marcas idênticas em uma mesma imagem.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS GAXETADAS

Neste capítulo serão abordados os materiais e as metodologias aplicadas na caracterização das amostras de placas gaxetadas que são utilizadas nos ensaios do sistema de medição proposto nesta pesquisa, como padrões.

Segundo Jr e Sousa (2018):

Padrão é uma medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

3.2.1 Condições ambientais

Os ensaios de caracterização das placas gaxetadas foram realizados em um ambiente com temperatura controlada, em aproximadamente 23°C.

3.2.2 Sistema de medição

Para a caracterização das amostras foi utilizado o instrumento de medição: Trena com fita de aço. Suas principais características são: Modelo Profissional; Marca Irwin; Indicação Máxima de 5 metros; Resolução de 1mm (Visual 0,5mm); Classe 2 de exatidão.

3.2.3 Definição do mensurando

As placas gaxetadas são produzidas por meio da estampagem de chapas de aço inoxidável. Para este tipo de mensurando, o principal efeito que pode acarretar variabilidade é a dilatação térmica.

Segundo Jr e Sousa (2018):

Dilatação térmica é a propriedade que os materiais têm de modificarem suas dimensões em função das variações da temperatura a que estão sujeitos. [...] Para a maioria dos tipos de aço, o valor típico do coeficiente de dilatação térmica é de $= 11,5 \mu\text{m} / (\text{m.K})$.

O aumento das dimensões lineares da peça obedece à equação da dilatação térmica, e podem ser expressos por meio de (JR e SOUSA, 2018):

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T \quad (6)$$

onde ΔL é a variação do comprimento, α o coeficiente de dilatação térmica do material, L o comprimento inicial e, ΔT a variação de temperatura. Admitindo-se um comprimento inicial L de 1m (tamanho superior as maiores medidas das três amostras de placas), e uma tolerância da condição ambiental de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$, ou seja, um ΔT de 2°C (2K), para o citado coeficiente α de $11,5 \mu\text{m} / (\text{m.K})$, obtém-se uma variação de comprimento ΔL de $23\mu\text{m}$ (0,023mm).

Segundo Jr e Sousa (2018): “O mensurando será considerado invariável se suas variações forem inferiores à resolução do sistema de medição utilizado”.

Como o SM detalhado em 3.2.2 possui resolução de 1mm (visual de 0,5mm), o mensurando é considerado invariável.

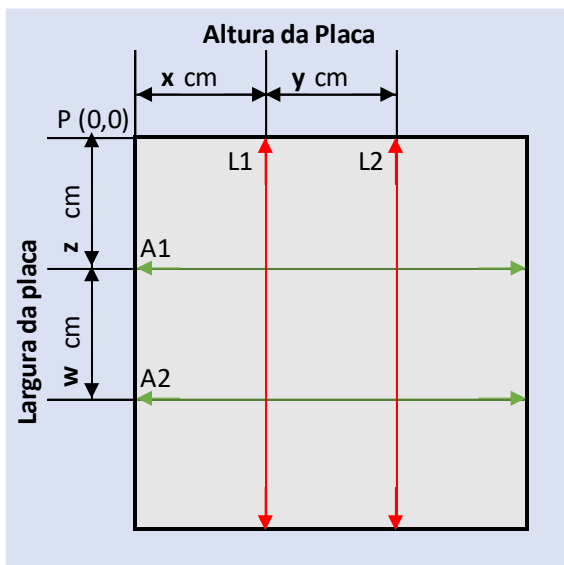
3.2.4 Procedimento de medição

Foram realizadas duas medições ao longo da altura e duas ao longo da largura de cada placa, em regiões de interesse, em pontos onde as mesmas tangenciam o solo (mesmo plano da

referência, conforme abordado na seção 2.6), ou em corrugações. A Figura 21 exemplifica a localização das medições em relação ao ponto P.

O ponto P é localizado no quadrante superior esquerdo dos três modelos de placas utilizados como amostra nesta pesquisa, posicionado no cruzamento das linhas de menor largura e menor altura.

Figura 21 - Localização das medições.



Fonte: Autor (2023).

A Tabela 3 apresenta as dimensões aproximadas onde são realizadas as medições de caracterização das placas. Tais distâncias foram medidas com o mesmo instrumento relatado para as medidas de caracterização.

Tabela 3 - Localização das medições de caracterização.

Modelo da placa	Medições a serem realizadas			
	Largura 1 (L1)	Largura 2 (L2)	Altura 1 (A1)	Altura 2 (A2)
	Localização Aproximada			
	x	y	z	w
Modelo 1	45 cm	5 cm	15 cm	8 cm
Modelo 2	4 cm	78 cm	5 cm	27 cm
Modelo 3	40 cm	7 cm	14 cm	10 cm

Fonte: Autor (2023).

3.2.5 Fontes de incerteza

Para a utilização das placas gaxetadas como padrão para os ensaios de funcionamento do SM proposto nesta pesquisa, necessita-se que as mesmas sejam caracterizadas, ou seja, que se identifique o VVC deste mensurando, acompanhado de sua referida incerteza.

Como o processo de medição em questão foi realizado sob temperatura estável e o mensurando foi claramente definido, a fonte de incerteza que afeta de forma significativa este processo é o próprio erro de indicação da trena, que será considerado como incerteza dominante.

A estimativa do erro sistemático não é conhecida, portanto não será compensada. Dessa maneira, os resultados das medições serão tratados em termos de erro máximo (técnica explanada na seção 3.3.5).

Tendo como base as proposições já citadas, pode-se dizer que a incerteza de medição para o processo de caracterização das placas será o próprio erro máximo de indicação da trena, que pode ser calculado conforme definido em norma. Segundo a norma NBR10123 (2012), elaborada pela ABNT, para instrumentos de medição e controle, de maneira específica aos requisitos das trenas de fita de aço: *“O erro máximo admissível de indicação das trenas, para mais ou para menos, para o comprimento nominal e para qualquer distância compreendida entre duas referências quaisquer, não consecutivas, é expresso, em milímetros, pela fórmula:”*

$$(x + y \cdot L) \quad (7)$$

onde x e y são coeficientes cujos valores estão estabelecidos, para cada classe de exatidão e, L é o valor do comprimento considerado, arredondado para o número inteiro de metros, por excesso (ABNT, 2012). Os coeficientes aplicados na Equação 7 podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes NBR10123.

Classe de exatidão	Coeficientes	
	x	y
I	0,1	0,1
II	0,3	0,2

Fonte: ABNT (2012).

Esta mesma norma define também que, para o caso de medições mistas (entre uma superfície de referência e uma marca de indicação da trena), o erro máximo admissível é incrementado em: 0,1mm para as medidas da classe 1; e 0,2mm para as medidas da classe 2 (ABNT, 2012).

Com base nas informações relatadas nesta seção e sabendo que o comprimento máximo a ser medido nas amostras, de forma inteira e por excesso, é de 1m, pode-se concluir que a incerteza de medição do processo de caracterização das placas, oriunda do erro máximo de indicação da trena, é de 0,7mm.

3.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO

Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto bem como estimar a incerteza do sistema de medição de forma experimental foram realizadas baterias de testes, os quais tem seus materiais e metodologias descritas neste capítulo.

3.3.1 Condições ambientais

Os ensaios de funcionamento do algoritmo foram realizados no mesmo ambiente onde foram caracterizadas as placas gaxetadas, a uma temperatura aproximada de 23°C. Os testes foram realizados com iluminação artificial, por meio de lâmpadas LED, totalizando aproximadamente 400 Lux. O valor médio foi obtido através de medições com o instrumento Luxímetro Digital LD-400 marca Instrutherm.

3.3.2 Sistema de medição

O SM proposto consiste em um algoritmo Python, com sua metodologia de operação descrita em mais detalhes no capítulo 4, que opera em um *notebook* e realiza as medições a partir de fotos das placas, capturadas de maneira padronizada por um *smartphone*.

O *smartphone* Samsung Galaxy A30 foi utilizado nos ensaios. O mesmo possui um conjunto de câmeras com sensor principal de 16 MP e abertura f1.7. O algoritmo foi implementado em um *notebook* Acer Aspire A315-56, que possui processador Intel Core i3 de

1,2 GHz e 8GB de memória. Ambos estes equipamentos foram selecionados em virtude da disponibilidade ao autor desta pesquisa. A Figura 22 apresenta a estrutura montada para a realização dos ensaios.

Figura 22 - Sistema de medição proposto.



Fonte: Autor (2023).

Para a padronização das imagens, as fotos foram capturadas com o aparelho fixo em um suporte, com a câmera voltada para o solo, a partir de uma altura de aproximadamente 116 cm (medida através do mesmo instrumento descrito na seção 3.2.2).

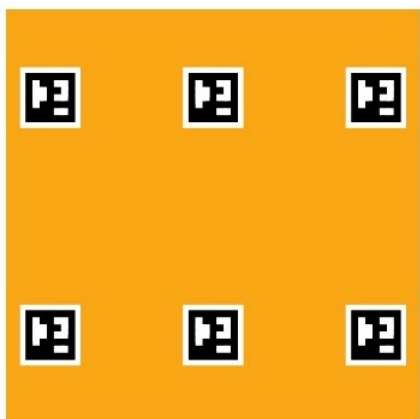
Este suporte consiste em um tripé desmontável, de uso comum em equipamentos como nível a laser, por exemplo. Foram adicionadas ao suporte uma haste de apoio (tubo metálico) e um grampo de fixação (usualmente utilizado para fixação de *smartphones* em veículos).

Sobre o solo, foi posicionado um *banner* (no qual foi impresso o sistema de referenciamento do algoritmo) e sobre este, foi centralizado o mensurando dos ensaios, que são as amostras de placas gaxetadas.

Para a padronização do posicionamento do *smartphone* no suporte, foi utilizado o aplicativo de nivelamento “Nível de bolha” disponível na plataforma Android.

A Figura 23 ilustra o *banner* utilizado, que possui dimensões externas de 1500 mm por 1500 mm e inclui seis marcadores ArUco de dimensões 180 mm por 180 mm.

Figura 23 - Desenho do *banner* utilizado.



Fonte: Autor (2023).

3.3.3 Definição do mensurando

Os ensaios do SM proposto utilizam como mensurando seis amostras de placas gaxetadas, as quais foram caracterizadas conforme resultados listados na seção 5.1. Conforme abordado em 3.2.3, estes são considerados invariáveis para a condição de temperatura definida.

3.3.4 Procedimento de medição

Para a padronização dos testes realizados com o SM proposto, o procedimento de medição foi repetido durante os diferentes ensaios.

Inicialmente, a placa gaxetada foi disposta sobre o plano de fundo (*banner* com marcadores ArUco), de maneira centralizada. O *smartphone* foi posicionado sobre a placa, e com o auxílio do já citado aplicativo de nivelamento, foi tomado esse plano como zero.

Na sequência, o *smartphone* foi fixado no suporte montado para a captura das fotos, a uma altura de aproximadamente 116 cm em relação a placa (melhor enquadramento do *banner*), e seu posicionamento foi ajustado para um ângulo inferior a 1° , em relação ao plano tomado como referência.

Com a estrutura montada, foram capturadas as fotos da placa, para que posteriormente fossem processadas pelo algoritmo Python, que foi configurado para realizar as medições nas mesmas regiões onde foram realizadas as medidas de caracterização das placas.

3.3.5 Fontes de incerteza

A incerteza do processo de medição realizado nos testes do algoritmo desenvolvido nesta pesquisa, não é conhecida, e será estimada de forma experimental, sendo esta estimativa um dos objetivos deste trabalho.

A tendência deste processo não é conhecida, portanto não será compensada. Dessa forma os resultados serão tratados em termos de erro máximo.

O resultado da medição (RM) de um mensurando invariável, quando os erros sistemáticos não são compensados e o erro máximo associado ao processo de medição é conhecido, é descrito na Equação 8 (JR e SOUSA, 2018):

$$RM = I \pm E_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

onde RM é a faixa correspondente ao resultado da medição, I a indicação ou média das indicações de “n” medições repetidas e, $E_{m\acute{a}x}$ o erro máximo do processo de medição para as condições de medição.

A incerteza de medição para o sistema proposto nesta pesquisa, que corresponde ao próprio erro máximo deste SM sob estas condições, pode ser estimada considerando fontes de natureza estatística e não estatísticas.

As incertezas-padrão são associadas a um número de graus de liberdade (ν) com que foram estimadas, que reflete o grau de segurança com que a estimativa do desvio-padrão é conhecida. Quando a incerteza-padrão é estimada através do desvio-padrão da amostra, o número de graus de liberdade corresponde ao número de medições efetuadas menos um. Já para os casos onde é definida analiticamente, o número de graus de liberdade é considerado infinito (JR e SOUSA, 2018).

A incerteza relacionada ao processo de caracterização do padrão (descrito em detalhes na seção 3.2) é considerada uma incerteza do tipo não estatística, descrito por diversos autores como incerteza “tipo B”.

A Tabela 5 expressa as incertezas-padrão “tipo B” relacionadas ao processo de caracterização das amostras e os graus de liberdade apresentados por essas incertezas. Conforme citado anteriormente, quando a incerteza-padrão é definida analiticamente, o número de graus de liberdade é considerado infinito.

Tabela 5 - Incertezas padrão tipo B.

Padrão	Descrição	Origem	Símbolo	Valor	Graus de Liberdade(ν)
P1	Modelo 1	Altura 1	u_1	0,7 mm	∞
P1	Modelo 1	Altura 2	u_2	0,7 mm	∞
P1	Modelo 1	Largura 1	u_3	0,7 mm	∞
P1	Modelo 1	Largura 2	u_4	0,7 mm	∞
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Altura 1	u_5	0,7 mm	∞
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Altura 2	u_6	0,7 mm	∞
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Largura 1	u_7	0,7 mm	∞
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Largura 2	u_8	0,7 mm	∞
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Altura 1	u_9	0,7 mm	∞
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Altura 2	u_{10}	0,7 mm	∞
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Largura 1	u_{11}	0,7 mm	∞
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Largura 2	u_{12}	0,7 mm	∞
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Altura 1	u_{13}	0,7 mm	∞
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Altura 2	u_{14}	0,7 mm	∞
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Largura 1	u_{15}	0,7 mm	∞
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Largura 2	u_{16}	0,7 mm	∞
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Altura 1	u_{17}	0,7 mm	∞
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Altura 2	u_{18}	0,7 mm	∞
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Largura 1	u_{19}	0,7 mm	∞
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Largura 2	u_{20}	0,7 mm	∞
P6	Modelo 3	Altura 1	u_{21}	0,7 mm	∞
P6	Modelo 3	Altura 2	u_{22}	0,7 mm	∞
P6	Modelo 3	Largura 1	u_{23}	0,7 mm	∞
P6	Modelo 3	Largura 2	u_{24}	0,7 mm	∞

Fonte: Autor (2023).

Outra fonte de incerteza que será considerada, é a precisão de medição do SM proposto, ou seja, o fato das indicações de medições repetidas não apresentarem sempre o mesmo valor. Esta fonte de incerteza é comumente relacionada por autores como de natureza

estatística, ou “tipo A”, e corresponde ao desvio-padrão da amostra de “n” medições repetidas do mensurando. Para este fator de incerteza será considerada uma distribuição de probabilidade tipo normal, com 95,45% de abrangência.

A Tabela 6 apresenta a simbologia das incertezas-padrão “tipo A” relacionadas à precisão do SM proposto, bem como seu respectivo número de graus de liberdade. O valor destas incertezas será calculado na seção de resultados 5.2, já que depende diretamente destes resultados.

Tabela 6 - Incertezas padrão tipo A.

Padrão	Descrição	Origem	Símbolo	Graus de Liberdade(ν)
P1	Modelo 1	Altura 1	u_{25}	19
P1	Modelo 1	Altura 2	u_{26}	19
P1	Modelo 1	Largura 1	u_{27}	19
P1	Modelo 1	Largura 2	u_{28}	19
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Altura 1	u_{29}	19
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Altura 2	u_{30}	19
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Largura 1	u_{31}	19
P2	Modelo 2 / Amostra 1	Largura 2	u_{32}	19
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Altura 1	u_{33}	19
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Altura 2	u_{34}	19
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Largura 1	u_{35}	19
P3	Modelo 2 / Amostra 2	Largura 2	u_{36}	19
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Altura 1	u_{37}	19
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Altura 2	u_{38}	19
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Largura 1	u_{39}	19
P4	Modelo 2 / Amostra 3	Largura 2	u_{40}	19
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Altura 1	u_{41}	19
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Altura 2	u_{42}	19
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Largura 1	u_{43}	19
P5	Modelo 2 / Amostra 4	Largura 2	u_{44}	19
P6	Modelo 3	Altura 1	u_{45}	19
P6	Modelo 3	Altura 2	u_{46}	19
P6	Modelo 3	Largura 1	u_{47}	19
P6	Modelo 3	Largura 2	u_{48}	19

Fonte: Autor (2023).

A quantificação da ação simultânea de várias fontes de incerteza é realizada através da incerteza combinada (u_c).

Para estimar a incerteza combinada de “ k ” fontes, todas estatisticamente independentes, utiliza-se a Equação 9 (JR e SOUSA, 2018):

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_k^2 \quad (9)$$

onde u_c é a incerteza-padrão combinada e, u_i a incerteza-padrão da “ i -ésima” fonte de incerteza.

Após a determinação da incerteza combinada, o número de graus de liberdade equivalente a esta operação pode ser determinado, resultando no número de graus de liberdade efetivos (ν_{ef}), que pode ser calculado pela Equação 10, a partir do número de graus de liberdade e da incerteza-padrão de cada uma das “ k ” fontes de incerteza (JR e SOUSA, 2018):

$$\frac{u_c^4}{\nu_{ef}} = \frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2} + \dots + \frac{u_k^4}{\nu_k} \quad (10)$$

onde ν_{ef} é o número de graus de liberdade efetivo, u_c a incerteza-padrão combinada, u_i a incerteza-padrão da “ i -ésima” fonte de incerteza e, ν_i o número de graus de liberdade da “ i -ésima” fonte de incerteza.

Com a obtenção da incerteza-padrão combinada e do número de graus de liberdade efetivos, pode ser determinada a incerteza de medição expandida (U). Segundo Jr e Sousa (2018): “*Incerteza expandida é o intervalo dentro do qual, para a probabilidade de enquadramento de 95,45%, espera-se encontrar a componente aleatória dos erros de um processo de medição.*” O cálculo da incerteza expandida é apresentado na Equação 11:

$$U = t \cdot u_c \quad (11)$$

onde U é a incerteza de medição expandida, t o coeficiente *t de student* correspondente ao número de graus de liberdade efetivo e, u_c a incerteza-padrão combinada.

O Coeficiente *t de student* para cada número de graus de liberdade efetivo e probabilidade de abrangência pode ser obtido em tabelas na literatura da área.

4 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os requisitos de projeto e as estratégias adotadas durante a elaboração do sistema de medição, e, em especial, os detalhes de desenvolvimento da metodologia proposta.

4.1 REQUISITOS DE PROJETO

Os requisitos de projeto para o SM proposto nesta pesquisa foram divididos entre requisitos funcionais e não funcionais, os quais são abordados nos tópicos seguintes. Tais requisitos foram concebidos a partir do conhecimento do problema e do contexto de aplicação a que se referem as seções 1.3 e 1.2, respectivamente.

Nestes requisitos, não foram selecionadas metas específicas de exatidão, uma vez que um dos objetivos da pesquisa é estimar a incerteza de medição do sistema de forma experimental, para posteriormente discorrer sobre sua viabilidade.

4.1.1 Não Funcionais

- O sistema de medição deve se apresentar como uma solução que ocupe pouco espaço físico. Entende-se que, para essa aplicação, os componentes móveis do sistema de medição possam ser transportados em uma única mala de equipamentos;
- O sistema de medição deve se apresentar como uma solução portátil, baseado em um algoritmo de instrumentação virtual equipado com ferramentas de visão computacional. Entende-se por portátil, nessa aplicação, a capacidade de os componentes móveis do sistema serem transportados por um único operador, sem demasiado esforço;
- O sistema de medição deve ser composto de equipamentos similares aos utilizados no ambiente da aplicação, como *notebooks* e *smartphones*, por exemplo;

- O sistema de medição deve apresentar facilidade de uso. Entende-se por facilidade de uso, neste caso, como requerer um treinamento de no máximo 60 minutos;
- O sistema de medição deve apresentar facilidade para montagem e desmontagem. Entende-se que, para este caso, o tempo de montagem ou desmontagem deve ser de no máximo 60 minutos;
- O algoritmo integrado ao sistema de medição deve ser escrito em uma linguagem de programação que favoreça a portabilidade para outras plataformas, visando a continuidade da pesquisa.

4.1.2 Funcionais

- O algoritmo deve realizar medições dimensionais de altura e largura de placas gaxetadas;
- O algoritmo deve receber como sinal de entrada fotos das placas, capturadas por meio de um SM específico;
- O algoritmo deve retornar resultados de medições em pontos específicos, e resultados médios, na própria imagem;
- A metodologia de PDI do algoritmo deve basear-se em técnicas analisadas e selecionadas a partir da literatura da área;
- A metodologia de PDI do algoritmo deve utilizar técnicas reconhecidas pela literatura, para a compensação de erros comuns em processos de medição por imagem e distorções em imagens;
- A metodologia de PDI do algoritmo deve utilizar recursos para compensar pequenas variações de montagem do sistema de medição.

4.2 DEFINIÇÕES INICIAIS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as principais definições adotadas, que antecedem o desenvolvimento da metodologia, tendo como base os requisitos de projeto e os conceitos revisados na fundamentação teórica.

4.2.1 Apresentação do conceito

Atendendo aos requisitos de projeto já estabelecidos e conhecendo o contexto de aplicação do sistema de medição, optou-se pelo desenvolvimento de um SM baseado em um *smartphone*, utilizando sua câmera como sensor e, um *notebook*, onde é embarcado o algoritmo.

Um SM composto por estes instrumentos tende a ser compacto e flexível. Apesar dos componentes utilizados nos ensaios não terem a certificação necessária para o ambiente de aplicação, entende-se que esta metodologia pode ser compatível com os equipamentos certificados já pertencentes ao inventário de empresas deste setor.

Tendo como base os conhecimentos revisados na fundamentação teórica, no que diz respeito as principais fontes de erro em medição por imagem, o sistema de medição deve estar alinhado ao mensurando e sob boa iluminação. Note que a distância da câmera ao mensurando é um fator crítico para a obtenção de bons resultados.

Pensando nisso, optou-se por utilizar um suporte de fixação para o *smartphone*, que permite o alinhamento do sistema e o travamento da distância, conferindo melhores resultados e também estabelecendo padronização para os experimentos. O suporte selecionado é comumente utilizado para a fixação de equipamentos, como nível laser, podendo ser facilmente desmontado e transportado, atendendo aos requisitos de projeto.

Para o referenciamento do algoritmo, optou-se pela utilização dos marcadores sintéticos, tendo em vista a gama de funcionalidades ligadas à estimativa de posição, que estes marcadores fornecem. Além disso, estes marcadores podem ser impressos e fixados em diferentes ambientes, operando como a parte fixa do sistema de medição, mantendo a portabilidade do SM na aplicação. Para tanto, foram adotados os marcadores ArUco, já apresentados na seção 2.8.

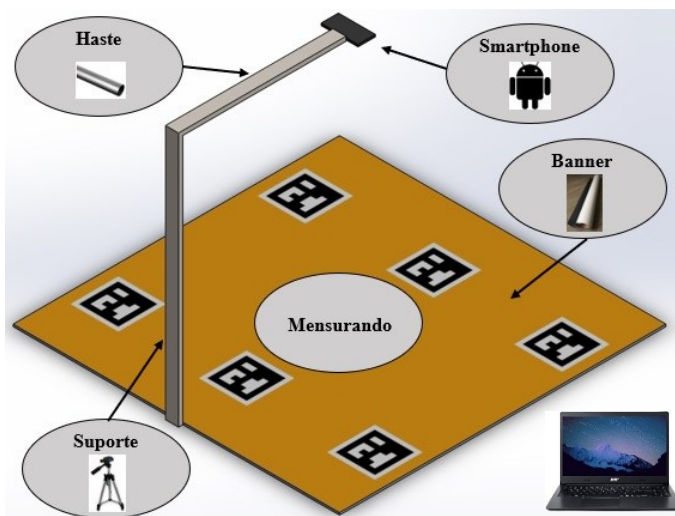
Para a realização dos ensaios, foi impresso um *banner* contendo seis marcadores ArUco, conforme ilustrado anteriormente na Figura 23. Para a confecção deste *banner*, foi levado em consideração o tamanho das amostras disponíveis para a realização desta pesquisa.

Optou-se por utilizar a cor amarelo para o fundo do *banner*, para que se tivesse um contraste adequado entre o mensurando e o *banner*, proporcionando uma boa diferenciação e favorecendo a detecção de contornos. Não foi utilizado a cor preto, que proporcionaria uma

diferenciação ainda maior, pois, em testes iniciais, verificou-se que esta cor acentuava os reflexos de iluminação do ambiente.

A Figura 24 ilustra um conceito de montagem para o sistema de medição proposto neste trabalho. O sistema prático montado pode ser observado em Materiais e Métodos, na seção 3.3.2, por meio da Figura 22.

Figura 24 – Conceito elaborado para o sistema de medição.



Fonte: Autor (2023).

4.2.2 Seleção da plataforma de programação

A seleção da plataforma de programação mais adequada é um dos objetivos desse trabalho, de suma importância para o atendimento aos requisitos funcionais de projeto, já que, é necessária uma plataforma que possibilite o desenvolvimento de técnicas de processamento digital de imagem.

A partir do estudo de trabalhos correlatos, foi possível mapear linguagens de programação comumente utilizadas na elaboração de algoritmos de instrumentação virtual e visão computacional, bem como a percepção de fluxos estruturados de operação.

Conforme apresentado na seção 3.1.2, os algoritmos de visão computacional possuem etapas de funcionamento bem definidas, sendo que a depender dos requisitos de cada projeto, é necessária uma metodologia de PDI diferente, ou seja, grupos de técnicas específicas de análise e processamento de imagem, para que se obtenham resultados superiores de exatidão.

Considerando os requisitos de projeto que estabelecem que o algoritmo deve realizar medidas de dimensão de placas gaxetadas a partir de fotos e, analisando as instruções da seção 2.10.1, entendeu-se que as técnicas de processamento de imagens primordiais a serem estudadas e aplicadas estão ligadas a detecção de bordas e contornos e seu pré-processamento.

Outro requisito de projeto, com impacto direto na seleção da plataforma de programação, é o requisito de portabilidade de software. Uma linguagem que favoreça que o algoritmo seja portado, torna-se mais vantajosa, sob um olhar científico. Uma vez identificadas as limitações e potencialidades através desta pesquisa, o projeto pode ser portado para outra plataforma, testando novas técnicas e aprimorando os métodos que justificarem-se viáveis, com menores dificuldades.

Outro fator que acompanha a portabilidade é o uso de software livre. Um algoritmo baseado em software livre proporciona a redução do custo de implementação do SM, além da vasta liberdade de customização, dessa maneira, linguagens de programação baseadas em software livre seriam notoriamente mais favoráveis ao desenvolvimento desta pesquisa.

Com base nas informações apresentadas, a linguagem de programação deve satisfazer as seguintes indagações:

- a. A plataforma possui suporte ao desenvolvimento de algoritmos de visão computacional, seguindo o fluxo de operação descrito na literatura?
- b. A plataforma possui suporte, ou pacotes de ferramentas, para a implementação de técnicas de detecção de bordas e contornos e seu pré-processamento?
- c. A plataforma favorece à portabilidade do algoritmo para outras linguagens de programação?
- d. A plataforma possui software livre?

As linguagens de programação inicialmente levantadas para o desenvolvimento do algoritmo foram Python, C++, Matlab e LabVIEW, conforme pode ser observado na seção 2.10.1. As linguagens Python e C++ possuem a já citada biblioteca OpenCV, com uma vasta gama de recursos ligados à visão computacional. Esta biblioteca possui também suporte à linguagem Java. Como estas linguagens utilizam da mesma biblioteca, optou-se por selecionar entre o conjunto Python e OpenCV em contraponto a plataforma Matlab e LabVIEW.

Para que fossem respondidas as questões relativas a estes critérios, foi realizado um breve levantamento de cada linguagem, incluindo alguns testes de detecção de bordas e contornos, conforme disponível em Materiais e Métodos, na seção 3.1.1. A Tabela 7 apresenta as respostas aos critérios de seleção.

Tabela 7 - Critérios de seleção da plataforma de programação.

Critério	Plataforma de Programação		
	Python + OpenCV	LabVIEW	Matlab
a.	Sim	Sim	Sim
b.	Sim	Sim	Sim
c.	Sim	Não	Não
d.	Sim	Não	Não

Fonte: Autor (2023).

Considerando os resultados obtidos na Tabela 7, pode-se observar que a linguagem Python em conjunto com a biblioteca OpenCV atende de maneira mais efetiva aos critérios de seleção obtidos no desenvolvimento desta pesquisa, sendo então a plataforma escolhida para a elaboração do algoritmo.

4.2.2.1 Teste de portabilidade

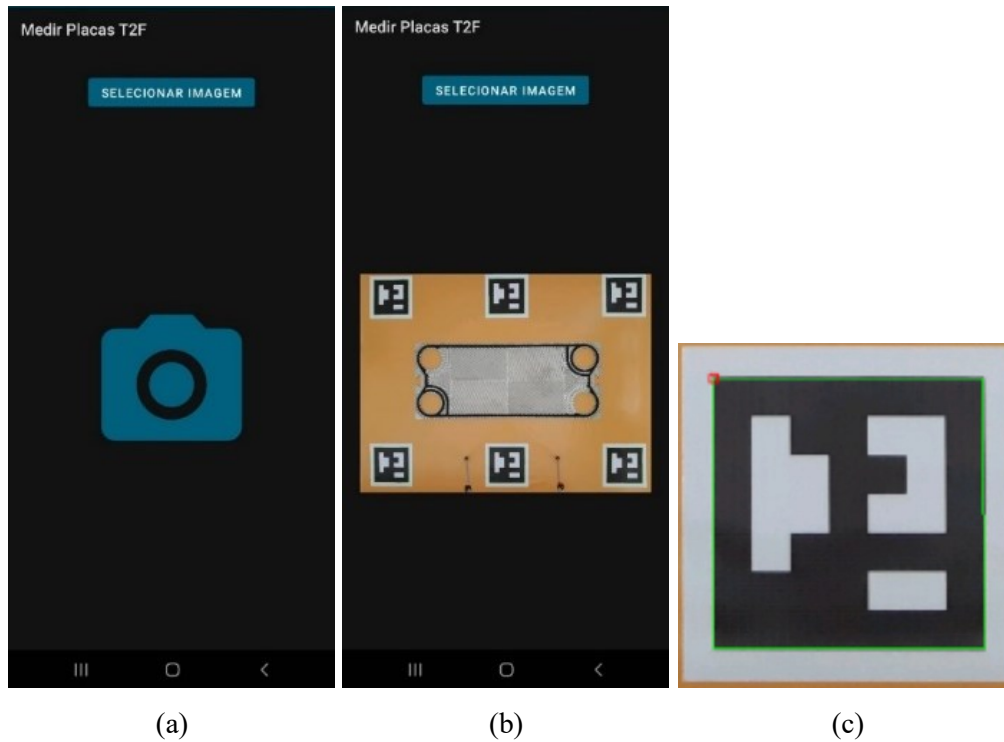
Tomando como base a definição da plataforma de programação utilizada para a implementação da metodologia, optou-se por realizar um teste de portabilidade de código da biblioteca OpenCV, incluindo o módulo ArUco, para a linguagem de programação Java para Android.

Nesse teste, foi elaborado um breve aplicativo na plataforma Android Studio, que identifica os marcadores ArUco, a partir das fotos capturadas com o sistema de medição. A Figura 25 exemplifica o funcionamento deste aplicativo, sendo, respectivamente, (a) a tela de execução principal e (b) após o carregamento da imagem.

Conforme pode ser observado na Figura 25 (a), o aplicativo possui um botão que permite a seleção da imagem, diretamente da galeria do *smartphone*. Após a seleção, o mesmo retorna os cantos de referência dos marcadores ArUco, de forma ilustrativa, assinalando o contorno destas marcas, conforme apresentado na Figura 25 (c). Esta figura consiste em uma

aproximação da tela de saída do aplicativo, podendo-se visualizar a identificação do marcador, através do contorno em verde.

Figura 25 - Aplicativo teste.



Fonte: Autor (2023).

Neste teste verificou-se que foi possível a identificação dos marcadores ArUco diretamente pelo *smartphone*, sugerindo que em um estudo futuro possa ser avaliada a migração da metodologia desenvolvida, de forma completa, para o funcionamento no próprio *smartphone*, favorecendo ainda mais a portabilidade do sistema de medição.

4.3 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

Tendo como ponto de partida as definições inicialmente adotadas para o sistema de medição, elaborou-se um esboço contemplando as técnicas possíveis de serem aplicadas na metodologia de processamento digital de imagens do algoritmo.

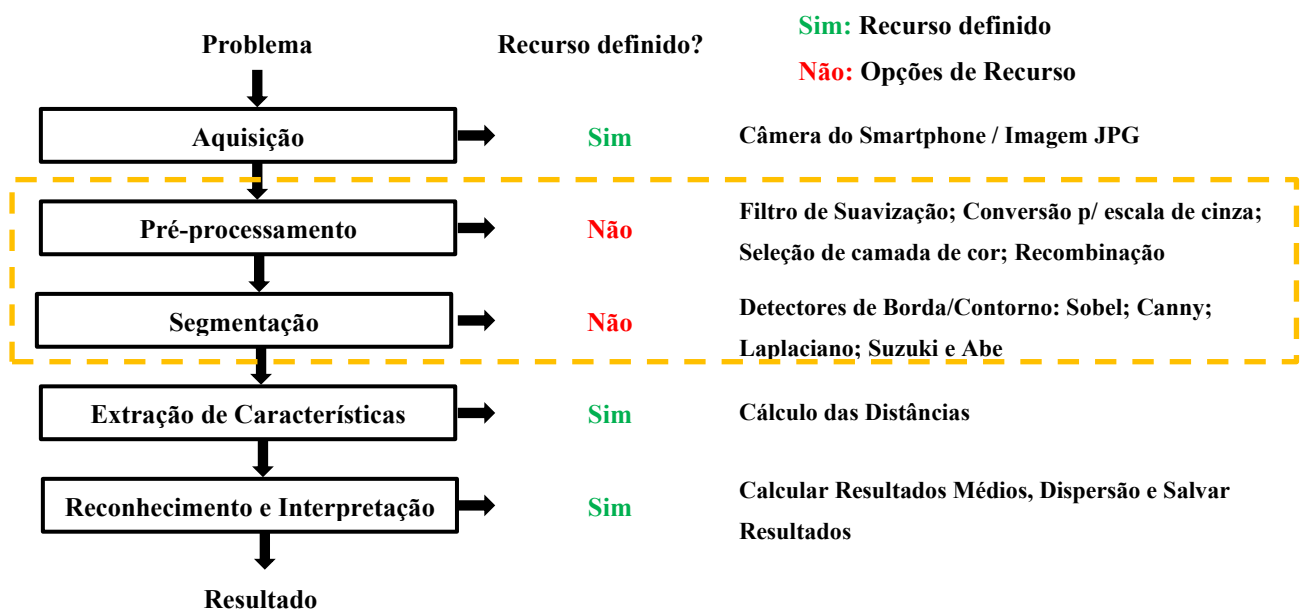
Em uma primeira instância, foi avaliado o fluxo de operação de algoritmos de visão computacional, conforme abordado na seção 3.1.2, para que a partir deste, fossem listadas as

opções. A Figura 26 ilustra o levantamento para a seleção das etapas de processamento digital da imagem, com os métodos a serem delineados sob o grifo em amarelo.

Neste esboço, foram elencados os métodos ligados as etapas de aquisição, extração de características, e reconhecimento e interpretação, com base nos requisitos de projeto e nas designações que surgiram destes. Estas etapas são assinaladas na Figura 26 como “recursos definidos”.

Para as etapas de pré-processamento e segmentação, diversas são as técnicas possíveis, conforme pode ser observado nas diferentes pesquisas a que se refere a Tabela 2, e nas bases teóricas como um todo, de acordo com o capítulo 2. Estas etapas são assinaladas na Figura 26 como “recursos não definidos”.

Figura 26 - Definição das etapas de PDI.



Fonte: Autor (2023).

Os métodos de detecção de bordas e contornos, bem com a preparação da imagem para este processo (pré-processamento), são pontos importantes de estudo para a proposição da metodologia a qual se refere esta pesquisa. As seções 4.3.1 e 4.3.2 tratam da definição das etapas que serão analisadas através da metodologia proposta, ligadas aos métodos de detecção de bordas e contornos.

4.3.1 Definição da etapa de segmentação

Para a definição da etapa de segmentação do algoritmo, considerando as técnicas analisadas pela literatura, foi realizada a revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2. A partir desta fundamentação teórica, identificou-se os principais métodos de detecção de bordas e contornos.

Os métodos de detecção de borda locais, como os do tipo diferencial, estão entre os mais estudados e, possuem os conceitos de máscaras de convolução, que são aplicados desde os primeiros métodos desenvolvidos. Esta vasta utilização e estudo contínuo ocorre devido a simplicidade e rapidez desses métodos.

As ferramentas presentes nas plataformas de software para a detecção de bordas e contornos, que foram apresentadas na seção 3.1.1, são baseadas em métodos de detecção locais. Essas utilizam, em sua maioria, conceitos de operadores diferenciais de convolução e algoritmos de seguimento de borda, que tendem a ter menor complexidade computacional.

Tomando como base as informações relatadas, optou-se por utilizar, nesta pesquisa, a ferramenta de detecção de contorno da biblioteca OpenCV, visando resultados fidedignos a um baixo custo computacional, que favorece uma portabilidade futura do algoritmo.

Tal ferramenta, conforme já citado na seção 3.1.1.3, baseia-se no algoritmo de detecção de bordas proposto por Suzuki e Abe (1985). Frente as demais opções disponíveis (Sobel, Canny, Laplaciano) apresentou-se como a solução mais adequada, sendo rápido e eficaz na detecção de bordas da amostra e, possibilitando o isolamento de seu contorno mais externo a partir de imagens binárias.

4.3.2 Definição da etapa de pré-processamento

A etapa de pré-processamento de imagens digitais visa prepará-las para a etapa de segmentação, filtrando ruídos e favorecendo a detecção das características que serão contabilizadas no processo posterior.

Conhecendo a definição da etapa de segmentação, que se baseia em um algoritmo seguidor de bordas em imagens binárias, sabe-se que a função principal do pré-processamento

é de produzir estas imagens limiarizadas, buscando ao máximo preservar as características de bordas do mensurando.

Para a limiarização da imagem, podem ser utilizadas diferentes técnicas, sendo estas abordadas na seção 2.5, sobre uma imagem em uma escala única. As imagens originais são obtidas no modelo de cor RGB, abordado na seção 2.2, ou seja, possuem três canais de cores.

O caminho mais objetivo é a conversão da imagem original para escala de cinza, seguido da limiarização, como abordado na pesquisa de Röper (2019). Uma segunda opção é a decomposição da imagem em seus canais de cores, e a seleção de uma única camada para a aplicação do limiar, conforme realizado na pesquisa de Fabre (2019).

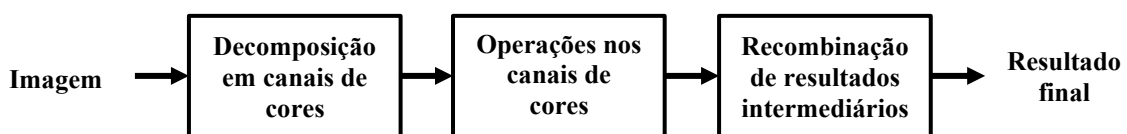
O terceiro caminho é a tratativa citada por Ruzon e Tomasi (2001), que consiste na recombinação de imagens digitais, visando maximizar o aproveitamento das características que estão adicionalmente presentes em imagens coloridas.

Buscando um ganho de exatidão, optou-se por avaliar a técnica de recombinação.

4.3.3 Fluxo de etapas para a recombinação de imagens

A técnica de recombinação de imagens digitais consiste em, a partir de uma imagem de entrada, separar suas componentes de cor, executar operações sobre estas (como por exemplo, a limiarização), para então recombinar os resultados intermediários e, obter-se os resultados finais. A Figura 27 ilustra este fluxo de etapas.

Figura 27 - Etapas da recombinação.



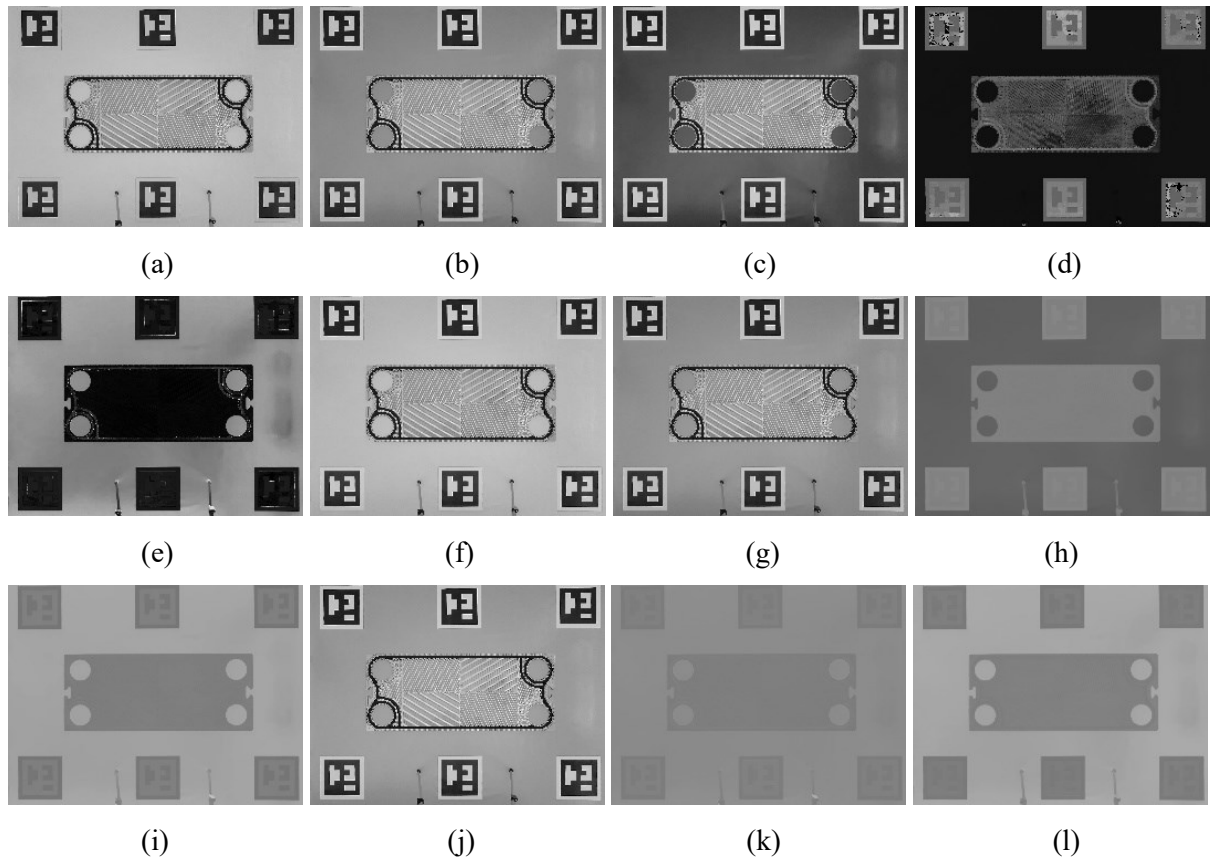
Fonte: Autor (2023).

4.4 ANÁLISE DA RECOMBINAÇÃO DE IMAGENS

Para a elaboração das técnicas de recombinação que serão testadas, foi realizada a decomposição de uma imagem capturada com o SM montado, em diferentes modelos de cores suportados pela biblioteca OpenCV, sendo estes RGB, HSV, YUV e LAB. As camadas de cores

obtidas são ilustradas na Figura 28, sendo, respectivamente, para o modelo RGB (a), (b) e (c); HSV (d), (e) e (f); YUV (g), (h) e (i); e LAB (j), (k) e (l).

Figura 28 - Camadas de cores.



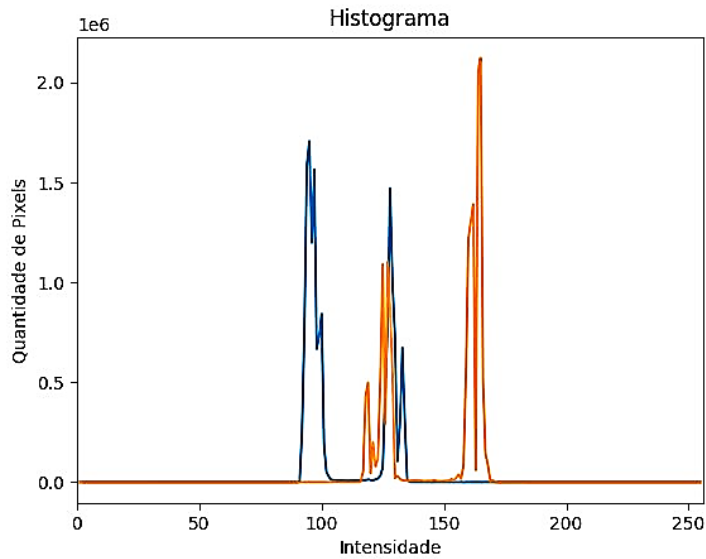
Fonte: Autor (2023).

Para o correto desempenho do algoritmo de detecção de contorno, busca-se, após a recombinação, diferenciar a amostra do plano de fundo. Dessa maneira, em uma primeira etapa, avaliou-se as camadas de cores ilustradas na Figura 28, com o intuito de identificar quais camadas, em relação aos espaços de cor testados, possuem uma diferenciação mais efetiva.

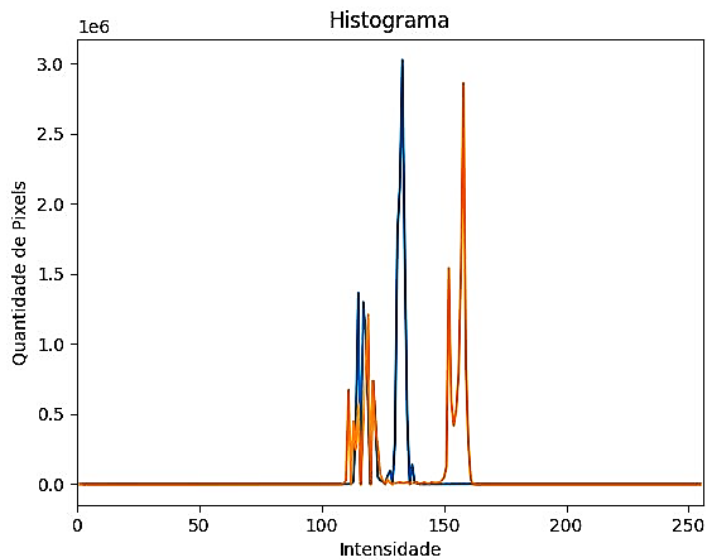
Analisando a Figura 28, pode-se verificar que as camadas que possuem melhor diferenciação, apresentando certa homogeneidade na região da amostra e na região do plano de fundo, são tonalidade e saturação do modelo de cor HSV, as camadas de crominância U e V do modelo de cor YUV, e as coordenadas cromáticas A e B do modelo de cor LAB.

Tais componentes de cor podem ser avaliadas por meio dos gráficos de histograma da Figura 29, sendo: (a) modelo de cor YUV, com a camada de crominância U em azul e V em laranja; e (b) modelo de cor LAB, com a coordenada cromática A em azul e B em laranja.

Figura 29 - Histograma das camadas modelos de cor YUV e LAB.



(a)



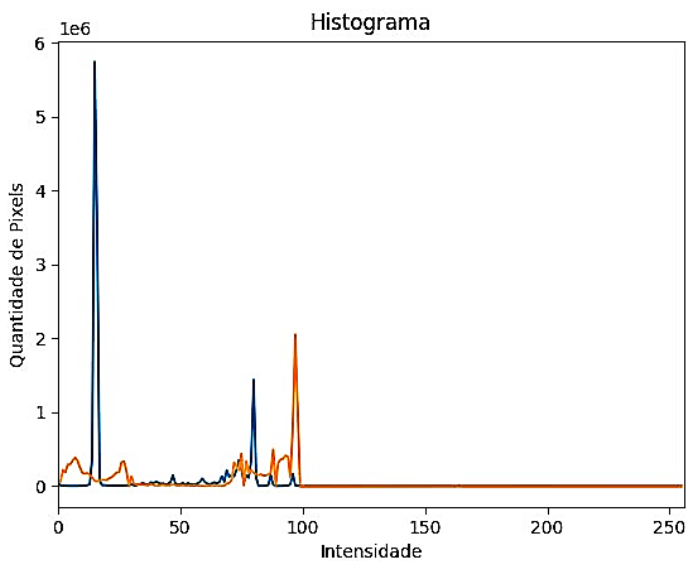
(b)

Fonte: Autor (2023).

Avaliando estes histogramas, que ilustram a quantidade de pixels para uma dada intensidade, pode-se verificar que as componentes de cor selecionadas do modelo YUV e do modelo LAB apresentam picos (ou concentrações de pixels) em duas regiões bem definidas, sendo a região da amostra e dos marcadores ArUco e, a região do plano de fundo do *banner*.

A Figura 30 ilustra o gráfico de histograma do modelo de cor HSV, com a camada de tonalidade em azul e saturação em laranja. Analisando o histograma da Figura 30, pode-se verificar que as camadas de cor selecionadas para o modelo de cor HSV apresentaram um comportamento semelhante aos demais modelos. Entretanto, ocorreu uma menor definição da região dos picos, o que reflete menor homogeneização na intensidade dos pixels da amostra e do plano de fundo.

Figura 30 - Histograma das camadas modelo de cor HSV.



Fonte: Autor (2023).

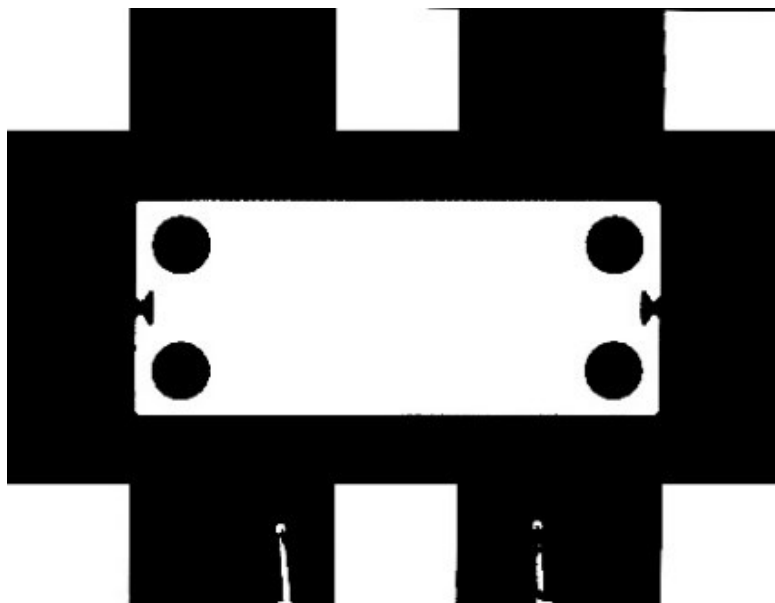
Tais resultados estão ligados à natureza dos modelos de cor em questão, que tem sua fundamentação teórica abordada na seção 2.2. Nos espaços de cores YUV e LAB, a informação de luminosidade é tratada em um canal separado, isolando as informações de crominância, que são as camadas que melhor realizam a diferenciação entre as amostras e o plano de fundo. Dessa maneira, optou-se por avaliar técnicas de recombinação a partir das camadas U e V, do modelo de cor YUV, e das camadas A e B, do modelo LAB.

Selecionadas as camadas dos respectivos modelos de cor que serão avaliadas nas técnicas de recombinação, procedeu-se com a seleção das operações que serão realizadas sobre as mesmas. Optou-se por realizar a limiarização dos canais de cores, conforme abordado na seção 2.5, para preparar a imagem para a etapa de segmentação.

Dentre as possíveis técnicas de limiarização, identificou-se que a metodologia de Otsu (1979) é a mais adequada para o funcionamento do algoritmo, uma vez que esta permite o cálculo automático do limiar, identificando o ponto ideal de separação do histograma bimodal, que representa o isolamento entre a amostra e o plano de fundo. Com a utilização deste método, o limiar T é recalculado a cada imagem, o que traz maior robustez ao processo quando o SM exposto a diferentes condições de iluminação.

Após a execução das operações de limiarização, a etapa final deste processo consiste em recombinar os resultados intermediários em uma imagem de resultados finais. Optou-se por recombinar as imagens limiarizadas através de operações lógicas *bit a bit*, do tipo *AND* e do tipo *OR*, para que em seguida fossem avaliados os resultados. A Figura 31 ilustra uma imagem do resultado após o processo de recombinação.

Figura 31 – Imagem recombinada.



Fonte: Autor (2023).

4.5 RECURSOS ADICIONAIS DA METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados alguns recursos que foram adicionados ao algoritmo, buscando a obtenção de maior exatidão nos resultados e maior versatilidade do mesmo.

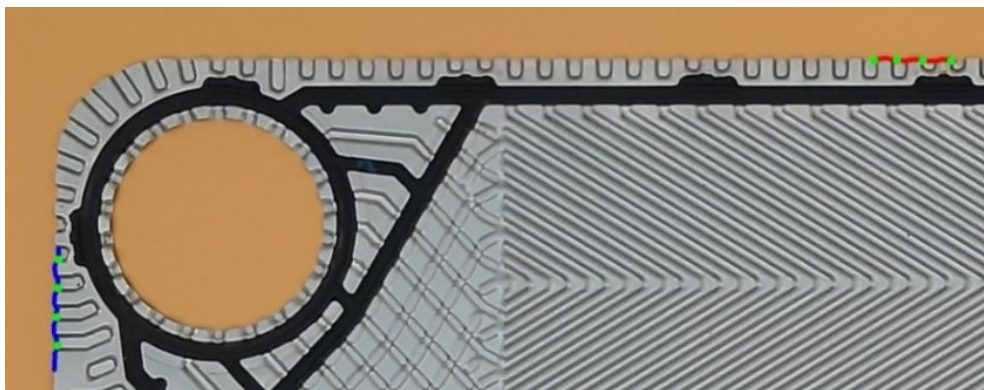
4.5.1 Análise de borda para medição com corrugações

Para o atendimento aos requisitos de projeto que estabelecem que o algoritmo deve realizar a compensação de erros comuns em processos de medição por imagem, foi realizada revisão bibliográfica a que se refere a seção 2.6. A partir desta fundamentação, identificou-se que, para a minimização de erros, as medições devem ser realizadas com o mensurando estando no mesmo plano de referenciamento do sistema de medição, onde se localiza o *banner* no qual estão impressos os marcadores ArUco.

Placas gaxetadas possuem corrugações, sendo objetos com dimensões representativas nas três coordenadas. Para evitar que as medições fossem realizadas sobre a corrugação, que adicionaria uma altura em relação ao sistema de referenciamento, incrementando os erros do processo de medição, foi elaborada uma técnica para analisar a borda onde está sendo realizada a medição.

Esta técnica consiste em analisar um pequeno perfil a partir do ponto onde está sendo realizada a medição. A Figura 32 ilustra um perfil de detecção de altura da placa, em azul, e de largura, em vermelho.

Figura 32 - Análise de borda.

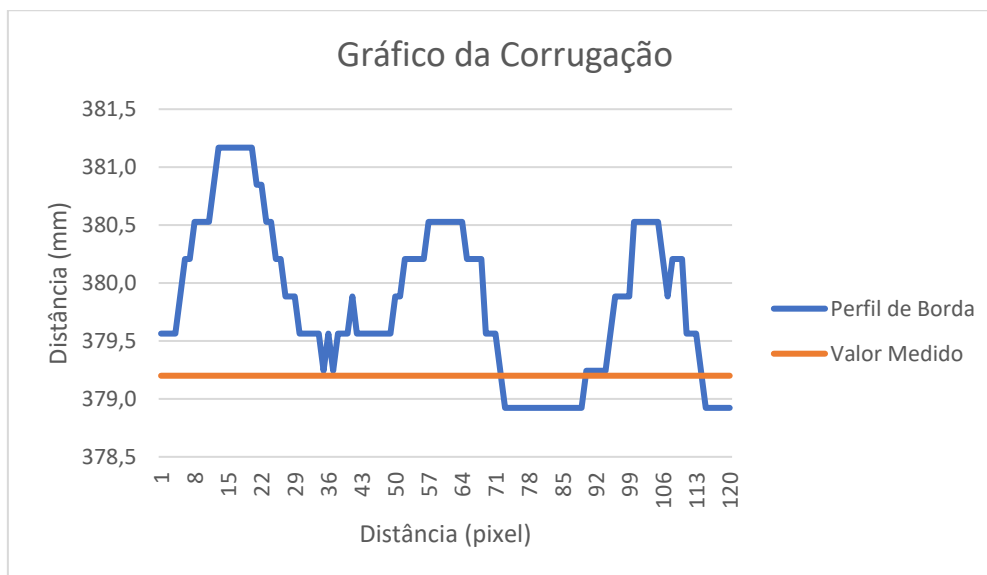


Fonte: Autor (2023).

Este perfil é dividido pelo algoritmo em quatro regiões, onde são identificados os pontos de mínimos, que consistem nos pontos onde as placas tocam o *banner*. Os pontos mínimos identificados podem ser observados na Figura 32, onde encontram-se assinalados na cor verde.

Após a identificação dos mínimos, o algoritmo calcula a média destes pontos, obtendo assim o resultado final da medição desta referida região. O gráfico da Figura 33 ilustra um exemplo de detecção de uma corrugação, em azul, e o resultado obtido com a medição, em laranja, que consiste no valor médio obtido das regiões de vales desta corrugação.

Figura 33 - Gráfico da corrugação.



Fonte: Autor (2023).

4.5.2 Correções e recursos de referenciamento

Para o cálculo das dimensões das placas gaxetadas, uma etapa de suma importância é a definição da relação entre pixels e milímetros no plano onde está sendo realizada a medição. Tal relação é calculada com o auxílio dos marcadores ArUco. A partir do conceito de distância euclidiana, explanado em 2.3.2.2, é possível o cálculo das distâncias entre os pontos de referência destes marcadores, e conhecendo estas dimensões físicas, torna-se possível o cálculo dessa relação para diferentes alturas em que a câmera esteja posicionada.

Considerando o requisito de projeto que estabelece que o algoritmo deve realizar a compensação de pequenas variações de montagem do sistema de medição, e conhecendo as principais fontes de erros em medição por imagem, relatadas na seção 2.6, sabe-se que o algoritmo deve aplicar correções de alinhamento da imagem.

Uma das correções realizadas pelo mesmo se refere ao ângulo de rotação das imagens capturadas em relação ao plano de medição. O programa identifica o ângulo de rotação do mensurando e realiza a devida compensação diretamente na imagem, através da transformação de giro no sentido oposto.

Outra compensação realizada pelo algoritmo consiste na transformação de perspectiva. Este recurso visa corrigir diferenças angulares entre o plano da câmera e o plano do mensurando. Para esta transformação, são utilizados os marcadores ArUco, por meio dos pontos de referência também utilizados na calibração da câmera, conforme ilustrados na Figura 34. O algoritmo calcula as distâncias relacionadas a estes pontos para então definir a matriz de homografia entre os componentes e, por fim, realizar a transformação da imagem.

4.5.3 Estratégia para a calibração da câmera

A seção 2.7 aborda os conceitos básicos envolvidos com as distorções óticas, radiais e tangenciais, produzidas em imagens digitais. Tendo em vista a necessidade apontada nos requisitos de projeto para a análise de técnicas buscando a compensação destes efeitos, avaliou-se as metodologias tratadas no capítulo 3.1.3.

A calibração de câmera é um processo pelo qual são estimados os parâmetros intrínsecos da câmera e os parâmetros extrínsecos de uma visualização, que permitem que sejam aplicadas correções, minimizando os efeitos de distorção.

A plataforma de programação selecionada, que integra a biblioteca OpenCV, possui um algoritmo específico para a calibração de câmeras. Neste processo, as coordenadas dos pontos do objeto 3D e suas projeções 2D precisam ser especificadas e, para isso, são utilizados padrões de calibração.

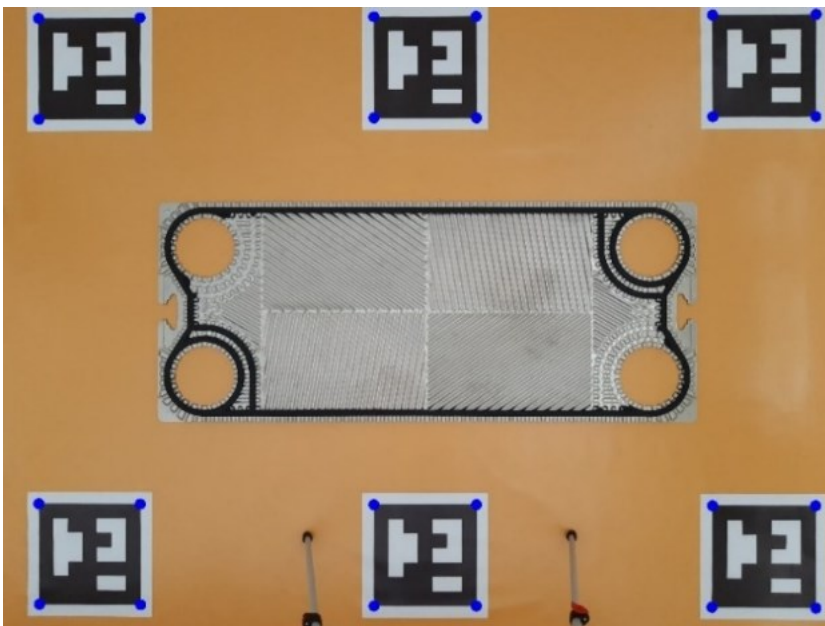
Na calibração de câmeras, é comum a utilização de padrões simples, como o já citado padrão do tipo xadrez, devido à facilidade de reconhecimento e identificação dos pontos de interesse neste tipo de alvo. Outra alternativa é a utilização dos marcadores autocodificados,

que tem como principal vantagem a robustez no processo de identificação para diferentes qualidades de cena.

Nesta pesquisa, optou-se pela utilização dos marcadores ArUco, explanados na seção 2.8, para a aquisição dos pontos utilizados na calibração. Essa opção ocorreu levando em consideração que os marcadores foram utilizados como sistema de referenciamento, tendo sua identificação compartilhada com outros recursos do algoritmo.

A estratégia de calibração consiste em identificar uma nuvem de pontos, composta pelos vértices dos seis marcadores ArUco, impressos no *banner*, conforme ilustra a Figura 34, sendo estes pontos assinalados em azul. Estes parâmetros de coordenada 2D são passados juntamente com as dimensões de localização física dos pontos para o algoritmo de calibração, que retorna os coeficientes utilizados para a compensação de efeitos de distorção.

Figura 34 - Pontos de calibração.



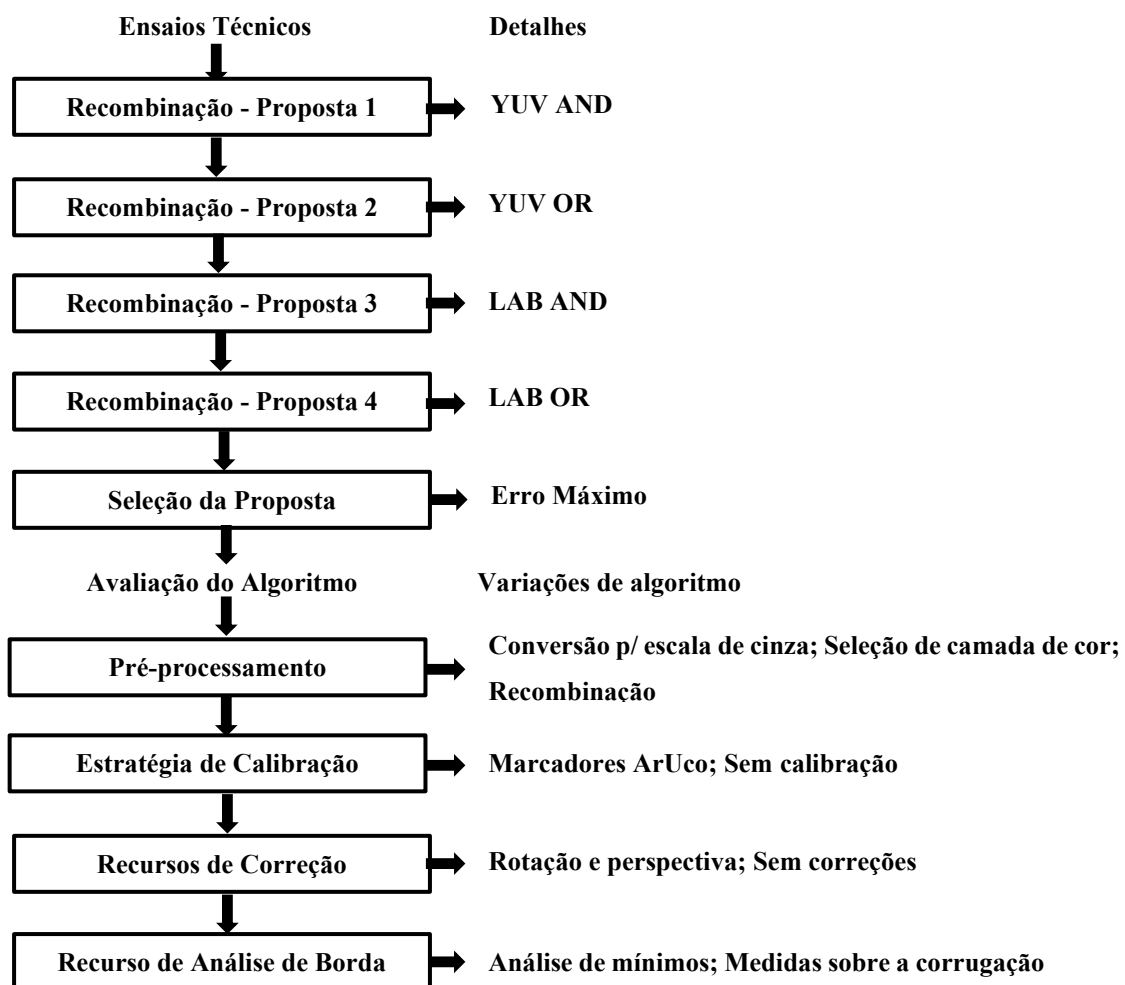
Fonte: Autor (2023).

Uma vantagem da utilização desta metodologia frente ao tradicional uso do padrão do tipo xadrez é o cálculo dos parâmetros de calibração a partir da própria imagem utilizada para a medição das placas, eliminando a etapa exclusiva de calibração. Nessa última, capturavam-se várias fotos do padrão xadrez em cada câmera que fosse utilizada pelo algoritmo.

4.6 FLUXO DE ENSAIOS DA PESQUISA

A Figura 35 ilustra o fluxo de ensaios aplicado nesta pesquisa. Inicialmente, são avaliadas quatro propostas de recombinação de imagens digitais. Na sequência, é selecionada a opção que obtêm o melhor resultado, do ponto de vista de erro máximo. Por fim, é realizado um conjunto de testes para a avaliação da metodologia proposta. Os resultados e discussões destes ensaios são abordados no capítulo 5.

Figura 35 - Fluxo de ensaios da pesquisa.

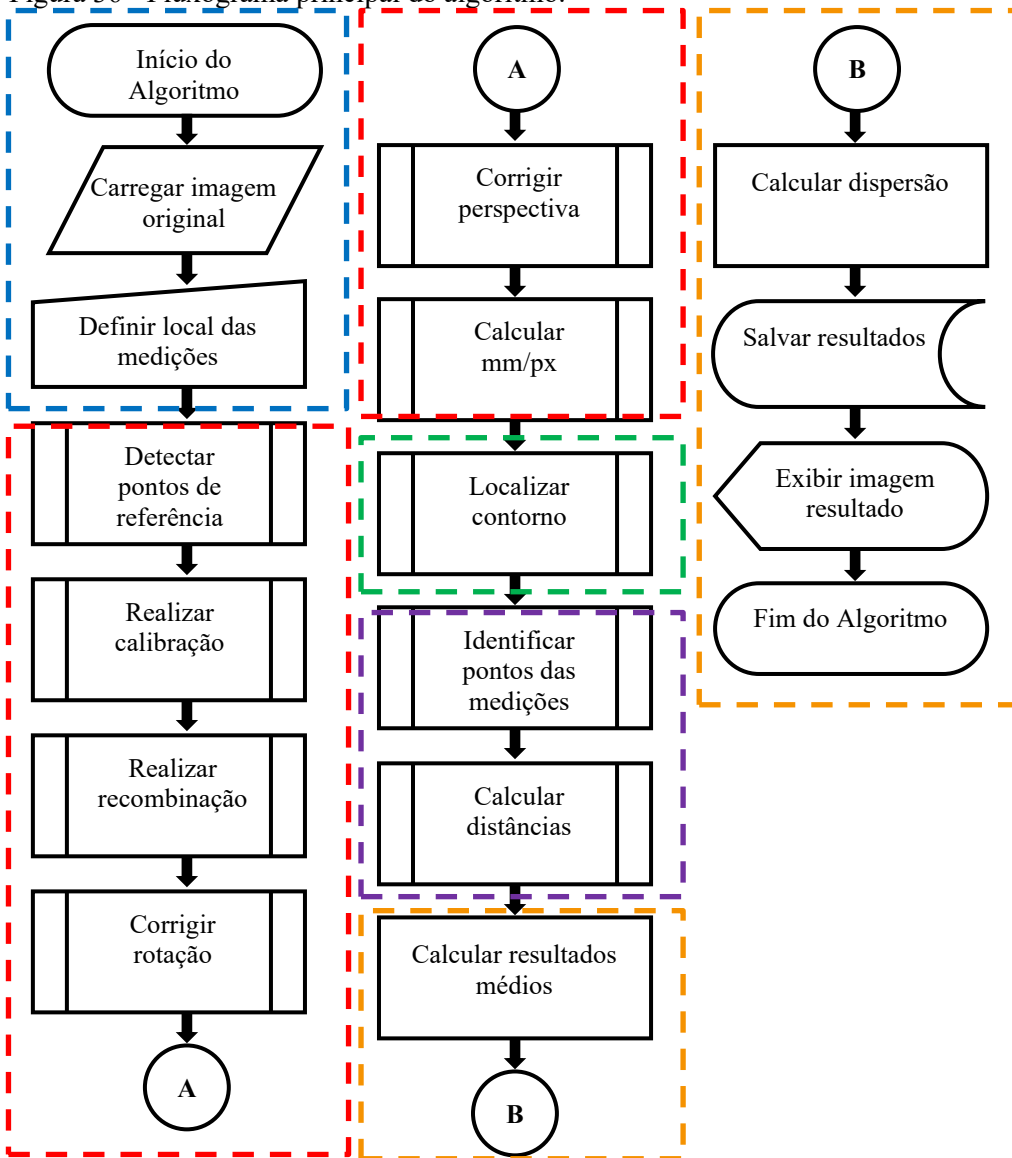


Fonte: Autor (2023).

4.7 FLUXOGRAMA DO ALGORITMO

A Figura 36 ilustra o fluxograma principal de operação do algoritmo proposto nesta pesquisa, sendo o quadro em azul responsável pelas etapas de aquisição, em vermelho, pelo pré-processamento, em verde, pela segmentação, em roxo, pela extração de características, e em laranja, pelo reconhecimento e interpretação. Os métodos auxiliares utilizados pelo algoritmo são detalhados no Apêndice E.

Figura 36 - Fluxograma principal do algoritmo.



Fonte: Autor (2023).

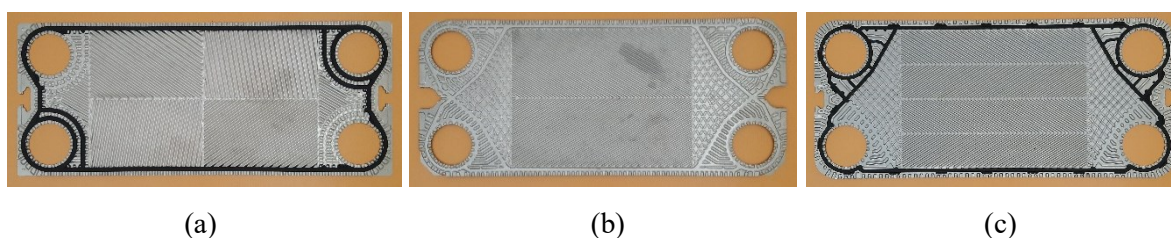
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados desta pesquisa e os principais pontos de discussão relevantes aos mesmos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

Nesta seção serão caracterizadas amostras de placas gaxetadas que são utilizadas nos testes de funcionamento do SM proposto, baseado em um algoritmo, que tem sua metodologia desenvolvida no capítulo 4. Serão utilizados três modelos de placas, os quais são apresentados na Figura 37, sendo (a) modelo 1, (b) modelo 2 e (c) modelo 3.

Figura 37 - Modelos de placas.



Fonte: Autor (2023).

Os procedimentos metodológicos relevantes a estas medições são descritos de maneira detalhada na seção 3.2. Os resultados das medições de caracterização são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado da caracterização das placas.

Modelo	Amostra	Largura 1	Largura 2	Altura 1	Altura 2	Incerteza
1	1	386,0mm	386,0mm	944,0mm	943,5mm	0,7mm
2	1	370,0mm	368,5mm	869,0mm	869,0mm	0,7mm
2	2	370,0mm	368,5mm	869,0mm	869,0mm	0,7mm
2	3	370,0mm	369,0mm	869,0mm	869,0mm	0,7mm
2	4	370,0mm	369,0mm	870,0mm	869,5mm	0,7mm
3	1	380,0mm	380,0mm	870,0mm	871,0mm	0,7mm

Fonte: Autor (2023).

5.2 RESULTADOS DAS TÉCNICAS DE RECOMINAÇÃO ANALISADAS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com o SM proposto, conforme metodologia descrita no capítulo 3.3, para as técnicas de recombinação propostas em 4.4.

5.2.1 Resultados das medições - YUV - Recombinação tipo AND

A Tabela 9 apresenta os resultados das medições para a técnica de recombinação do tipo *AND* do modelo de cor YUV, incluindo o cálculo das incertezas e do erro máximo.

Tabela 9 - Resultados das Medições - YUV - Recombinação AND.

Padrão	Medida	Desvio Padrão	Incertezas Padrão	uc	uef	t	U	Td Mód. (mm)	E _{max} (mm)
P1	A1	0,27357	u_1, u_{25}	0,75156	1.082	2,003	1,51	0,33	1,84
P1	A2	0,28210	u_2, u_{26}	0,75470	973	2,013	1,52	0,58	2,10
P1	L1	0,25521	u_3, u_{27}	0,74507	1.380	2,003	1,49	0,57	2,07
P1	L2	0,20125	u_4, u_{28}	0,72835	3.260	2,003	1,46	0,70	2,16
P2	A1	0,32282	u_5, u_{29}	0,77085	618	2,013	1,55	0,50	2,05
P2	A2	0,42414	u_6, u_{30}	0,81847	263	2,013	1,65	0,19	1,84
P2	L1	0,32943	u_7, u_{31}	0,77364	578	2,013	1,56	0,63	2,19
P2	L2	0,22118	u_8, u_{32}	0,73411	2.306	2,003	1,47	0,75	2,23
P3	A1	0,23681	u_9, u_{33}	0,73897	1.802	2,003	1,48	0,37	1,85
P3	A2	0,39373	u_{10}, u_{34}	0,80314	329	2,013	1,62	0,54	2,15
P3	L1	0,28562	u_{11}, u_{35}	0,75603	933	2,013	1,52	0,55	2,07
P3	L2	0,25189	u_{12}, u_{36}	0,74394	1.446	2,003	1,49	0,33	1,83
P4	A1	0,19601	u_{13}, u_{37}	0,72693	3.594	2,003	1,46	0,15	1,61
P4	A2	0,19270	u_{14}, u_{38}	0,72604	3.829	2,003	1,45	0,38	1,84
P4	L1	0,24623	u_{15}, u_{39}	0,74205	1.567	2,003	1,49	0,28	1,77
P4	L2	0,17852	u_{16}, u_{40}	0,72240	5.095	2,003	1,45	0,42	1,86
P5	A1	0,21667	u_{17}, u_{41}	0,73277	2.485	2,003	1,47	0,22	1,69
P5	A2	0,30997	u_{18}, u_{42}	0,76556	707	2,013	1,54	0,69	2,23
P5	L1	0,22501	u_{19}, u_{43}	0,73528	2.166	2,003	1,47	0,47	1,94
P5	L2	0,23079	u_{20}, u_{44}	0,73706	1.977	2,003	1,48	0,68	2,16
P6	A1	0,25231	u_{21}, u_{45}	0,74408	1.437	2,003	1,49	0,26	1,75
P6	A2	0,30539	u_{22}, u_{46}	0,76372	743	2,013	1,54	0,58	2,12
P6	L1	0,23306	u_{23}, u_{47}	0,73778	1.908	2,003	1,48	0,42	1,90
P6	L2	0,24165	u_{24}, u_{48}	0,74054	1.676	2,003	1,48	0,16	1,64

Fonte: Autor (2023).

O Apêndice A apresenta (Tabelas 13 a 18) vinte leituras realizadas para cada amostra de placa gaxetada, obtidas através do sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa com o algoritmo configurado para a técnica de recombinação de imagem do tipo *AND*, por meio das camadas de cores do modelo YUV.

5.2.2 Resultados das medições - YUV - Recombinação tipo OR

A Tabela 10 apresenta os resultados das medições para a técnica de recombinação do tipo *OR* do modelo de cor YUV, incluindo o cálculo das incertezas e do erro máximo.

Tabela 10 - Resultados das Medições - YUV - Recombinação OR.

Padrão	Medida	Desvio Padrão	Incertezas Padrão	uc	uef	t	U	Td Mód. (mm)	E _{max} (mm)
P1	A1	0,20894	u_1, u_{25}	0,73052	2.839	2,003	1,46	0,16	1,62
P1	A2	0,22243	u_2, u_{26}	0,73449	2.259	2,003	1,47	0,30	1,77
P1	L1	0,19541	u_3, u_{27}	0,72676	3.635	2,003	1,46	0,18	1,64
P1	L2	0,19084	u_4, u_{28}	0,72555	3.969	2,003	1,45	0,42	1,87
P2	A1	0,20125	u_5, u_{29}	0,72835	3.260	2,003	1,46	0,15	1,60
P2	A2	0,26872	u_6, u_{30}	0,74981	1.152	2,003	1,50	0,08	1,58
P2	L1	0,23079	u_7, u_{31}	0,73706	1.977	2,003	1,48	0,18	1,66
P2	L2	0,21051	u_8, u_{32}	0,73097	2.762	2,003	1,46	0,27	1,73
P3	A1	0,26675	u_9, u_{33}	0,74910	1.182	2,003	1,50	0,08	1,58
P3	A2	0,24301	u_{10}, u_{34}	0,74098	1.642	2,003	1,48	0,27	1,75
P3	L1	0,27999	u_{11}, u_{35}	0,75392	999	2,013	1,52	0,09	1,61
P3	L2	0,24061	u_{12}, u_{36}	0,74020	1.702	2,003	1,48	0,20	1,68
P4	A1	0,21588	u_{13}, u_{37}	0,73253	2.519	2,003	1,47	0,37	1,83
P4	A2	0,18489	u_{14}, u_{38}	0,72401	4.468	2,003	1,45	0,24	1,70
P4	L1	0,14609	u_{15}, u_{39}	0,71508	10.907	2,000	1,43	0,44	1,87
P4	L2	0,20157	u_{16}, u_{40}	0,72844	3.241	2,003	1,46	0,02	1,48
P5	A1	0,20844	u_{17}, u_{41}	0,73037	2.864	2,003	1,46	0,21	1,68
P5	A2	0,21001	u_{18}, u_{42}	0,73083	2.786	2,003	1,46	0,19	1,65
P5	L1	0,21051	u_{19}, u_{43}	0,73097	2.762	2,003	1,46	0,27	1,73
P5	L2	0,20333	u_{20}, u_{44}	0,72893	3.138	2,003	1,46	0,24	1,70
P6	A1	0,19167	u_{21}, u_{45}	0,72577	3.906	2,003	1,45	0,19	1,64
P6	A2	0,19324	u_{22}, u_{46}	0,72618	3.789	2,003	1,45	0,14	1,60
P6	L1	0,18715	u_{23}, u_{47}	0,72459	4.269	2,003	1,45	0,03	1,49
P6	L2	0,15694	u_{24}, u_{48}	0,71738	8.294	2,003	1,44	0,06	1,50

Fonte: Autor (2023).

O Apêndice B apresenta (Tabelas 19 a 24) vinte leituras realizadas para cada amostra de placa gaxetada, obtidas através do sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa com o algoritmo configurado para a técnica de recombinação de imagem do tipo *OR*, por meio das camadas de cores do modelo YUV.

5.2.3 Resultados das medições - LAB - Recombinação tipo AND

A Tabela 11 apresenta os resultados das medições para a técnica de recombinação do tipo *AND* do modelo de cor LAB, incluindo o cálculo das incertezas e do erro máximo.

Tabela 11 - Resultados das Medições - LAB - Recombinação AND.

Padrão	Medida	Desvio Padrão	Incertezas Padrão	uc	uef	t	U	Td Mód. (mm)	E _{max} (mm)
P1	A1	0,28855	u_1, u_{25}	0,75714	901	2,013	1,52	0,33	1,85
P1	A2	0,28855	u_2, u_{26}	0,75714	901	2,013	1,52	0,67	2,19
P1	L1	0,26036	u_3, u_{27}	0,74685	1.286	2,003	1,50	0,64	2,14
P1	L2	0,23508	u_4, u_{28}	0,73842	1.850	2,003	1,48	0,75	2,23
P2	A1	0,32184	u_5, u_{29}	0,77044	624	2,013	1,55	0,66	2,21
P2	A2	0,39523	u_6, u_{30}	0,80387	325	2,013	1,62	0,34	1,96
P2	L1	0,29820	u_7, u_{31}	0,76087	805	2,013	1,53	1,26	2,79
P2	L2	0,28172	u_8, u_{32}	0,75457	978	2,013	1,52	1,24	2,76
P3	A1	0,23946	u_9, u_{33}	0,73983	1.731	2,003	1,48	0,60	2,09
P3	A2	0,35611	u_{10}, u_{34}	0,78538	449	2,013	1,58	0,79	2,38
P3	L1	0,39603	u_{11}, u_{35}	0,80426	323	2,013	1,62	1,30	2,92
P3	L2	0,45128	u_{12}, u_{36}	0,83286	220	2,013	1,68	1,06	2,73
P4	A1	0,18093	u_{13}, u_{37}	0,72301	4.844	2,003	1,45	0,23	1,68
P4	A2	0,19841	u_{14}, u_{38}	0,72758	3.435	2,003	1,46	0,76	2,22
P4	L1	0,32971	u_{15}, u_{39}	0,77376	576	2,013	1,56	1,11	2,67
P4	L2	0,24979	u_{16}, u_{40}	0,74323	1.489	2,003	1,49	0,92	2,40
P5	A1	0,22219	u_{17}, u_{41}	0,73442	2.268	2,003	1,47	0,51	1,98
P5	A2	0,30332	u_{18}, u_{42}	0,76289	760	2,013	1,54	0,94	2,48
P5	L1	0,37623	u_{19}, u_{43}	0,79470	378	2,013	1,60	1,34	2,94
P5	L2	0,28210	u_{20}, u_{44}	0,75470	973	2,013	1,52	1,18	2,70
P6	A1	0,21244	u_{21}, u_{45}	0,73153	2.671	2,003	1,47	0,47	1,94
P6	A2	0,31639	u_{22}, u_{46}	0,76818	660	2,013	1,55	0,77	2,32
P6	L1	0,25257	u_{23}, u_{47}	0,74417	1.432	2,003	1,49	0,82	2,31
P6	L2	0,31669	u_{24}, u_{48}	0,76830	658	2,013	1,55	0,44	1,98

Fonte: Autor (2023).

O Apêndice C apresenta (Tabelas 25 a 30) vinte leituras realizadas para cada amostra de placa gaxetada, obtidas através do sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa com o algoritmo configurado para a técnica de recombinação de imagem do tipo *AND*, por meio das camadas de cores do modelo LAB.

5.2.4 Resultados das medições - LAB - Recombinação tipo OR

A Tabela 12 apresenta os resultados das medições para a técnica de recombinação do tipo *OR* do modelo de cor LAB, incluindo o cálculo das incertezas e do erro máximo.

Tabela 12 - Resultados das Medições - LAB - Recombinação OR.

Padrão	Medida	Desvio Padrão	Incertezas Padrão	uc	uef	t	U	Td Mód. (mm)	E _{max} (mm)
P1	A1	0,30310	u_1, u_{25}	0,76280	762	2,013	1,54	0,08	1,62
P1	A2	0,26774	u_2, u_{26}	0,74946	1.167	2,003	1,50	0,27	1,77
P1	L1	0,23725	u_3, u_{27}	0,73911	1.790	2,003	1,48	0,34	1,83
P1	L2	0,22449	u_4, u_{28}	0,73512	2.185	2,003	1,47	0,47	1,95
P2	A1	0,28837	u_5, u_{29}	0,75707	903	2,013	1,52	0,30	1,82
P2	A2	0,47404	u_6, u_{30}	0,84541	192	2,017	1,71	0,04	1,75
P2	L1	0,26253	u_7, u_{31}	0,74761	1.250	2,003	1,50	0,40	1,90
P2	L2	0,19861	u_8, u_{32}	0,72763	3.423	2,003	1,46	0,65	2,11
P3	A1	0,22618	u_9, u_{33}	0,73563	2.126	2,003	1,47	0,38	1,85
P3	A2	0,39256	u_{10}, u_{34}	0,80256	332	2,013	1,62	0,46	2,08
P3	L1	0,20417	u_{11}, u_{35}	0,72917	3.091	2,003	1,46	0,22	1,68
P3	L2	0,23193	u_{12}, u_{36}	0,73742	1.942	2,003	1,48	0,17	1,65
P4	A1	0,18144	u_{13}, u_{37}	0,72313	4.794	2,003	1,45	0,21	1,66
P4	A2	0,20901	u_{14}, u_{38}	0,73054	2.836	2,003	1,46	0,35	1,81
P4	L1	0,12183	u_{15}, u_{39}	0,71052	21.982	2,000	1,42	0,07	1,49
P4	L2	0,22542	u_{16}, u_{40}	0,73540	2.152	2,003	1,47	0,33	1,81
P5	A1	0,30088	u_{17}, u_{41}	0,76192	781	2,013	1,53	0,00	1,53
P5	A2	0,43100	u_{18}, u_{42}	0,82205	251	2,013	1,65	0,45	2,11
P5	L1	0,23930	u_{19}, u_{43}	0,73977	1.735	2,003	1,48	0,14	1,62
P5	L2	0,26477	u_{20}, u_{44}	0,74840	1.213	2,003	1,50	0,52	2,02
P6	A1	0,27067	u_{21}, u_{45}	0,75051	1.123	2,003	1,50	0,18	1,68
P6	A2	0,27928	u_{22}, u_{46}	0,75366	1.008	2,003	1,51	0,37	1,88
P6	L1	0,23278	u_{23}, u_{47}	0,73769	1.916	2,003	1,48	0,34	1,82
P6	L2	0,17800	u_{24}, u_{48}	0,72228	5.151	2,003	1,45	0,07	1,52

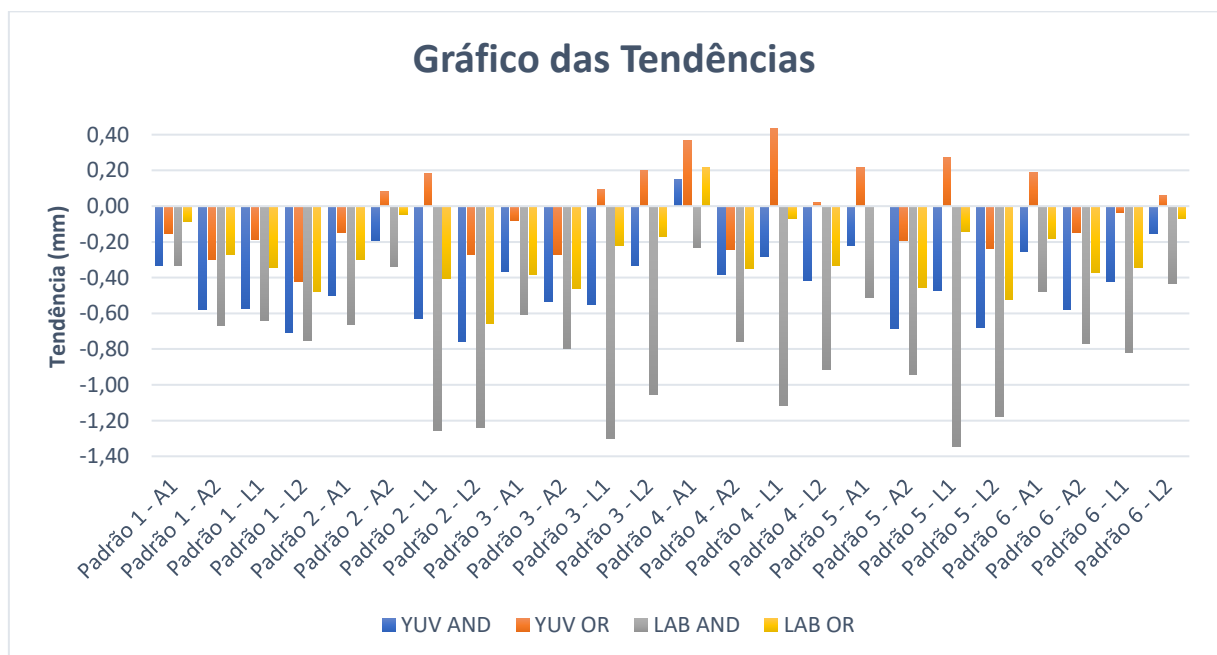
Fonte: Autor (2023).

O Apêndice D apresenta (Tabelas 31 a 36) vinte leituras realizadas para cada amostra de placa gaxetada, obtidas através do sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa com o algoritmo configurado para a técnica de recombinação de imagem do tipo *OR*, por meio das camadas de cores do modelo LAB.

5.2.5 Discussões e seleção da proposta

O sistema de medição proposto nesta pesquisa foi testado com o algoritmo implementado em Python e configurado em diferentes técnicas de recombinação de camadas de cores. Conforme abordado em 4.4, foram analisados os modelos de cor YUV, através das camadas U e V, e LAB, por meio das camadas A e B. Em ambos, foram avaliadas a recombinação lógica tipo *AND* e tipo *OR*. A Figura 38 apresenta o gráfico das tendências produzidas por tal SM para estas diferentes configurações de recombinação.

Figura 38 - Gráfico das tendências.



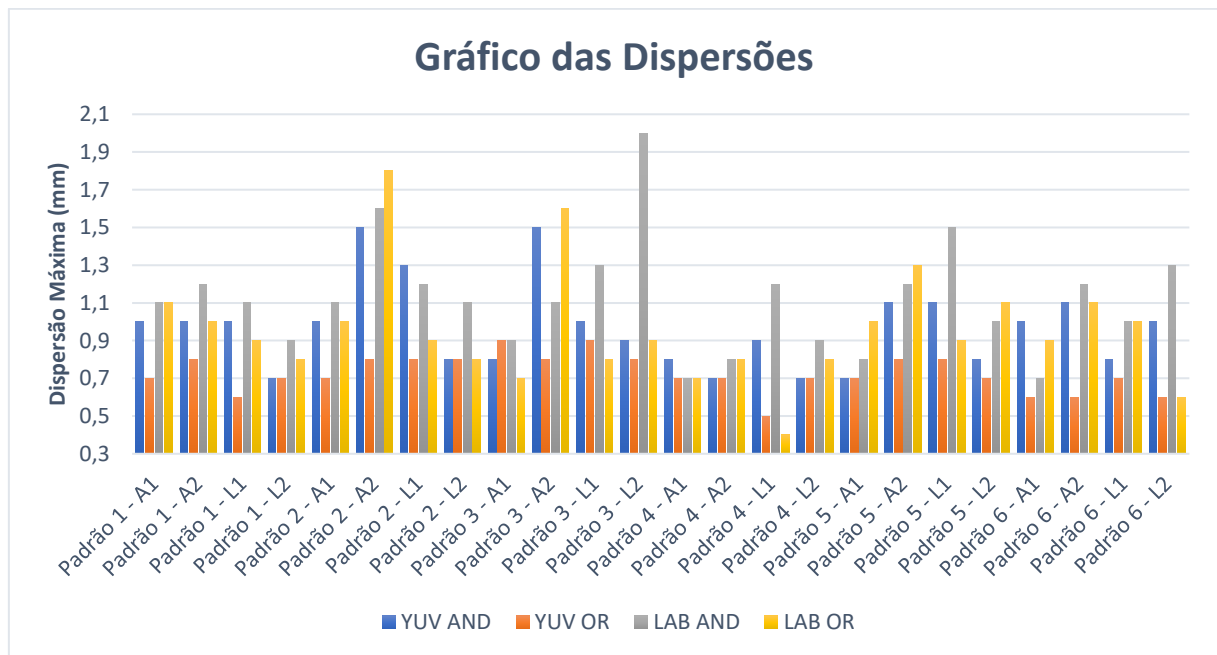
Fonte: Autor (2023).

Analisando o gráfico da Figura 38 pode-se verificar que, na maioria das medidas das diversas amostras para a operação de recombinação tipo *OR* do modelo de cor YUV, foram

mensuradas tendências de menor amplitude. A segunda opção que apresentou baixas tendências foi a técnica de recombinação tipo *OR* do modelo de cor LAB.

Além das tendências, foi mensurada também a dispersão máxima entre os resultados, ou seja, a diferença entre a medida máxima e a medida mínima para todas as vinte imagens capturadas. Essa dispersão é apresentada, na Figura 39, em cada medida e padrão, para as quatro opções de recombinação.

Figura 39 - Gráfico das dispersões máximas.

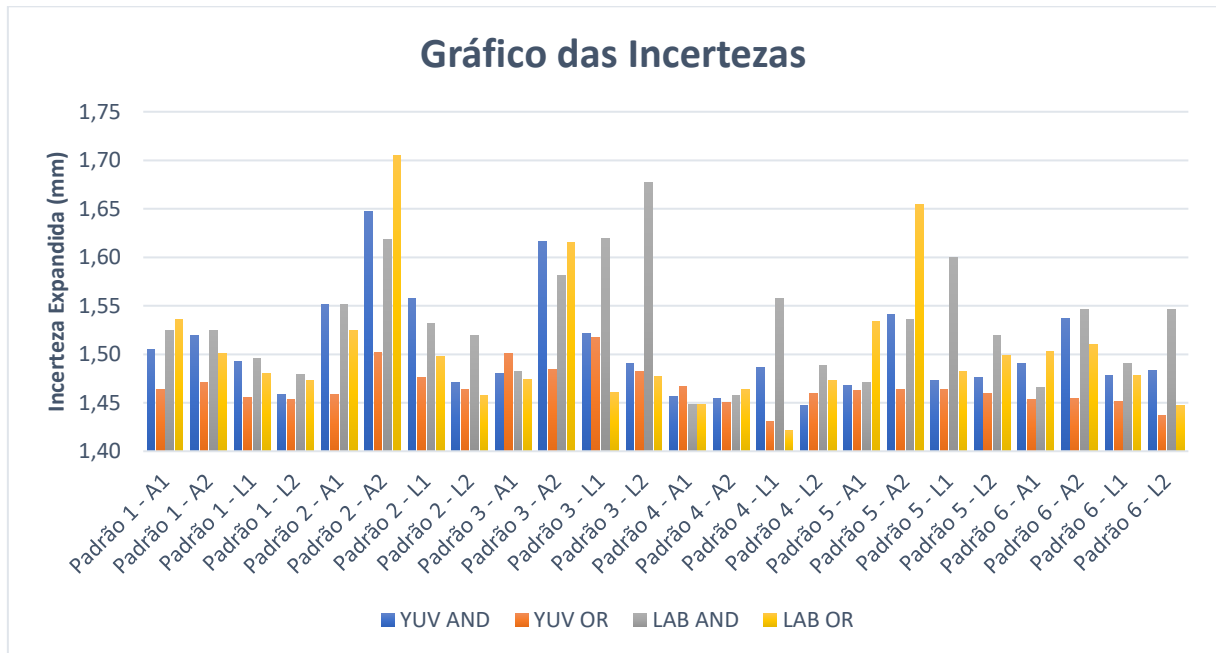


Fonte: Autor (2023).

Observando o gráfico da Figura 39 pode-se verificar que, para a técnica de recombinação de camadas de cores tipo *OR* do modelo de cor YUV, os resultados das medições apresentaram, na maioria dos casos, menores dispersões máximas.

Estas dispersões impactam diretamente nas incertezas do processo de medição, sendo estas ilustradas graficamente pela Figura 40, que trata das incertezas expandidas. Pode-se observar que a operação de recombinação tipo *OR*, do modelo de cor YUV, devido a dispersões já apresentadas, produziu menores incertezas expandidas, na maior parte dos casos. Note que maiores dispersões promovem o aumento de desvio padrão e do coeficiente *t de student*, devido a redução do número de graus de liberdade efetivos.

Figura 40 - Gráfico das incertezas expandidas.



Fonte: Autor (2023).

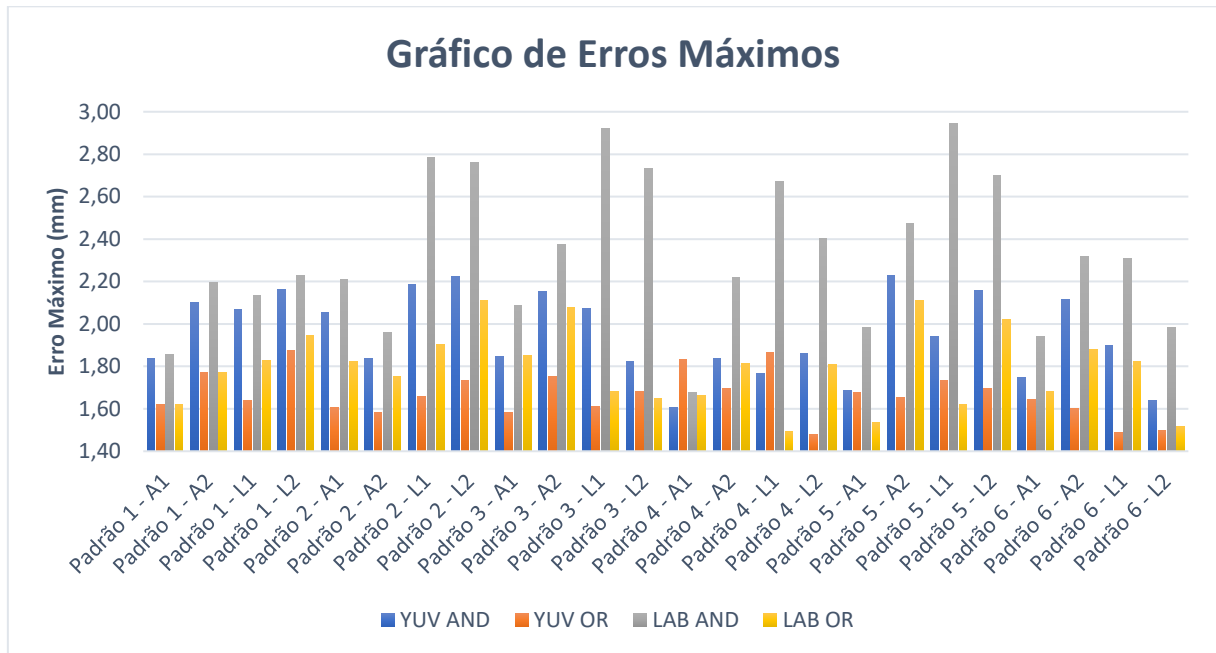
Combinando os resultados de tendências e incertezas, obtêm-se os erros máximos para cada padrão e medida, abordados graficamente na Figura 41.

De modo geral, a técnica de recombinação de camadas de cores tipo *OR* do modelo de cor YUV apresentou menores tendências e menores incertezas e, por consequência, obteve menores erros máximos, na maioria dos casos, sendo a melhor opção para as condições em que o SM foi testado.

O erro máximo geral obtido com o algoritmo configurado para o modo de recombinação *OR* do modelo de cor YUV foi de 1,87mm, ao passo que no modo *AND* foi de 2,23mm. Para o modelo de cor LAB, o erro máximo geral foi de 2,94mm para a técnica de recombinação lógica *AND* e, 2,11mm para a lógica *OR*.

Dessa maneira, é selecionado o método de recombinação de imagens digitais, utilizando a lógica do tipo *OR*, sobre as camadas de crominância U e V, do sistema de cores YUV.

Figura 41 - Gráfico de erro máximo.



Fonte: Autor (2023).

Tendo como base as informações apresentadas, pode-se expressar o resultado das medições, em milímetros, para o sistema de medição proposto nesta pesquisa, submetido a estas condições, através de:

$$RM = I \pm 1,87 \quad (12)$$

onde I é a indicação ou média das indicações de “n” medições repetidas (mm) e, RM a faixa correspondente ao resultado da medição.

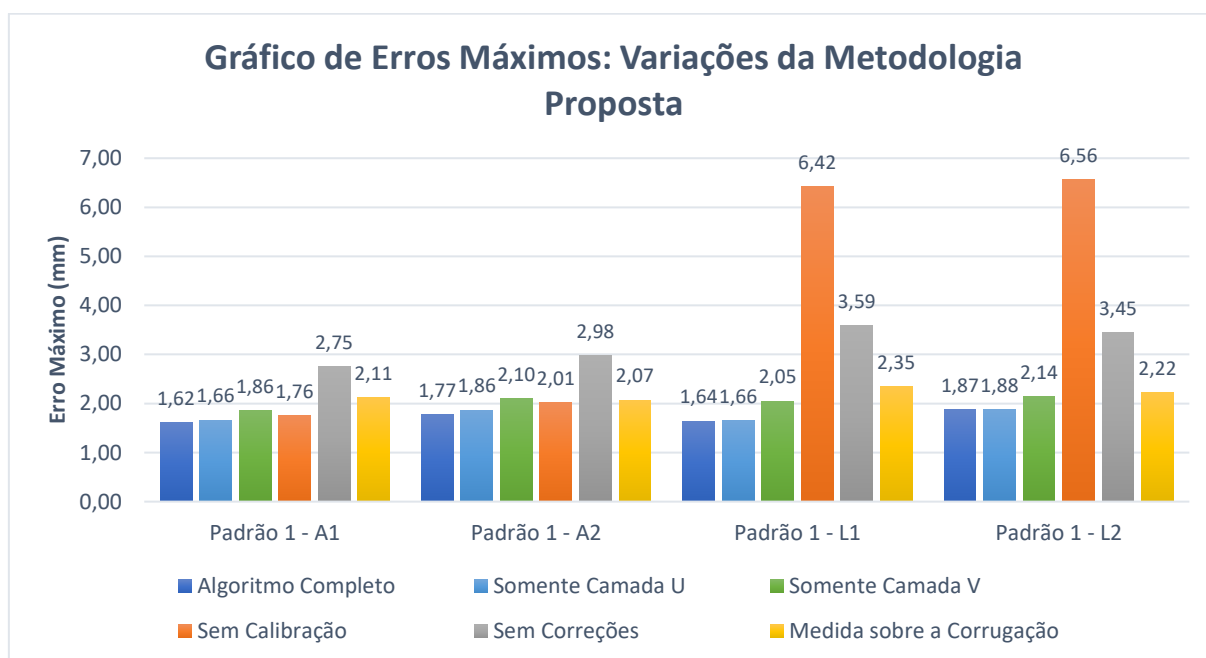
Os maiores erros máximos ocorreram na medida Largura 2 do padrão 1 (amostra modelo 1) e na medida Largura 1 do padrão 4 (amostra modelo 2). Esse erro é atribuído como incerteza de medição do SM, sob as condições de ensaio. Estes resultados representam, respectivamente, em relação aos valores verdadeiros convencionais destas medidas, 0,48% e 0,51% de erro.

5.3 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Para a avaliação da metodologia proposta de processamento digital de imagem, foi realizada uma série de ensaios a partir do algoritmo desenvolvido e selecionado e de variações deste. Utilizou-se a metodologia apresentada na seção 3.3. Optou-se por realizar esta testagem sobre o conjunto de imagens já capturadas do padrão 1, que apresentou o maior erro máximo.

Avaliaram-se os recursos de pré-processamento da imagem (recombinação), bem como as estratégias adicionais de calibração, correções de posicionamento e análise de borda. A Figura 42 ilustra os erros máximos obtidos nos ensaios de variação do algoritmo, que serão discutidos na sequência.

Figura 42 - Avaliação da metodologia proposta - erros máximos.



Fonte: Autor (2023).

A avaliação da etapa de pré-processamento consiste na comparação do método de recombinação aplicado frente a demais opções: conversão direta da imagem original para escala de cinza e posterior limiarização; ou decomposição da imagem em seus canais de cores e posterior limiarização sobre camada única; métodos estes citados por outros autores conforme relatado na seção 4.3.2.

A opção de conversão direta da imagem para escala de cinza, seguido do processo de limiarização de Otsu, apresentou resultados precários. Através deste método não foi possível identificar corretamente o contorno da placa. O segundo caminho foi testado realizando-se a limiarização sobre as camadas de cor U e V, de maneira isolada, do já selecionado modelo de cor YUV. Os resultados desse segundo caminho podem ser comparados ao método de recombinação do algoritmo proposto por meio do gráfico da Figura 42. Pode-se perceber que a metodologia de recombinação de imagens apresentou pequenos incrementos de exatidão em relação as demais abordagens.

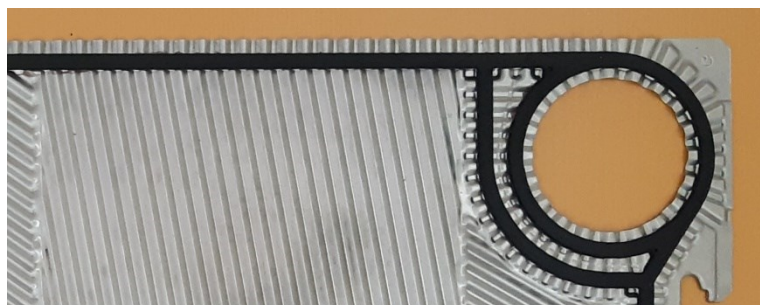
Para a avaliação do impacto dos recursos de correção de rotação e perspectiva da imagem, foi realizado um ensaio com estes métodos desabilitados, sendo o resultado deste expresso na Figura 42. A partir deste gráfico, pode-se verificar que pequenas variações de montagem no sistema de medição, que geram diferenças em relação ao posicionamento ideal, acarretam em grandes perdas de exatidão em relação ao algoritmo proposto, provando ser necessária a utilização destes recursos compensatórios.

Com relação ao recurso de análise de borda, realizou-se um teste com a edição do algoritmo para a implementação das medições sobre as corrugações, buscando avaliar o impacto das características de tridimensionalidade das amostras, conforme pode ser observado na Figura 42. Analisando este resultado, conclui-se que as perdas de exatidão são expressivas e, dependendo da criticidade da aplicação, é necessária a utilização de um recurso de ajuste da medição ou compensador.

Para mensurar o impacto das distorções da imagem e a relevância da metodologia proposta para a calibração da câmera, optou-se por comparar o algoritmo proposto a uma variação deste, com a etapa de calibração desativada. O resultado desta comparação pode ser verificado ainda na Figura 42. É possível verificar que o método proposto para a calibração da câmera, representou um ganho considerável de exatidão em relação a uma abordagem direta, em especial nas medidas de largura.

Tal fato se deve à presença de uma composição das distorções abordadas na seção 2.7, em sua maioria do efeito almofada, conforme pode ser verificado na Figura 43 (b). Note o achatamento da largura da amostra, aproximando-se ao centro da mesma e, o alargamento se afastando do centro.

Figura 43 - Efeito da calibração.



(a) Imagem Calibrada



(b) Imagem Original

Fonte: Autor (2023).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando as avaliações realizadas sobre a metodologia de processamento digital de imagem proposta nesta pesquisa, pode-se dizer que os diversos recursos desenvolvidos e aplicados contribuíram para a redução da ocorrência de erros no processo de medição, entretanto, sob diferentes impactos.

O resultado técnico de erro máximo do sistema de medição, apesar de percentualmente baixo, não foi adequado para a aplicação em questão, motivo pelo qual são relatadas as observações a seguir:

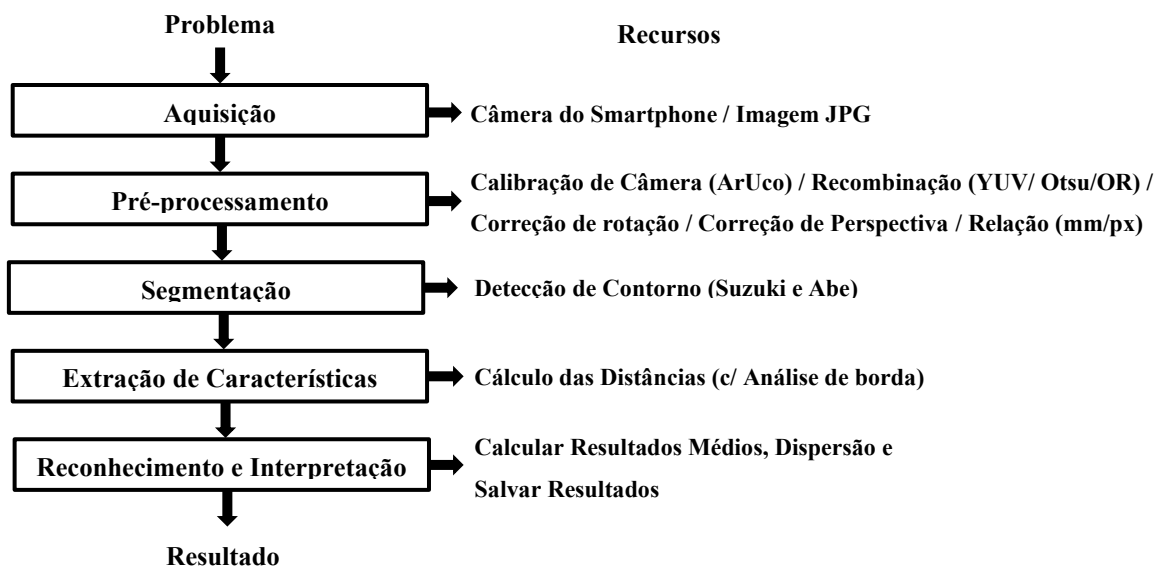
- I. A recombinação da imagem permitiu um ganho de exatidão sutil em relação a metodologia de seleção de uma camada única. Acredita-se que, com o aumento da resolução da imagem de entrada, este ganho possa ser potencializado. Entretanto, tal observação necessita de ensaios futuros;

- II. O fator de distorção da imagem é o agente de erros com o maior impacto na realização das medições. O método de calibração com marcadores ArUco permitiu uma parcela considerável de compensação. Entretanto, uma parte deste desvio ainda permanece, sendo crítico para a aplicação. Acredita-se que, com uma câmera de qualidade superior, tal metodologia possa ter um resultado eficaz. Entretanto, tal observação necessita de ensaios futuros;
- III. Outros fatores que afetam a exatidão das medições são o alinhamento entre o sistema de medição e o objeto a ser medido e, a resolução do sensor. A resolução interfere diretamente no nível de detalhamento da borda e, por consequência, na definição do contorno da amostra. Para isto, sugere-se a aplicação de um sensor com maior resolução. Sobre o alinhamento, percebeu-se que pequenas perturbações resultam em erros elevados. Acredita-se que os mecanismos de correção embarcados no algoritmo podem não ser suficientes em condições adversas de posicionamento. Sugere-se a análise para que o algoritmo trabalhe em conjunto com um segundo sensor;
- IV. Verificou-se que a característica de tridimensionalidade ocasionada pela corrugação das placas gaxetadas não pode ser desprezada em sistemas de medição por imagem. Para o caso do referenciamento por meio de um plano com marcadores ArUco, recursos de análise geométrica para o ajuste da medição são alternativas viáveis;
- V. Entende-se que apesar da metodologia proposta no algoritmo para o processamento digital de imagem, em conjunto com os demais componentes do sistema de medição, em especial a câmera do *smartphone* utilizado, não ter atingido o resultado necessário para a aplicação em questão, esta pode ser utilizada em sistemas que requerem níveis de exatidão inferiores, para objetos com características similares as placas gaxetadas.

5.4.1 Resumo da metodologia proposta

Considerando os resultados e as limitações obtidas, a metodologia de processamento digital de imagem proposta nesta pesquisa pode ser verificada por meio da Figura 44.

Figura 44 - Metodologia de PDI proposta no algoritmo.



Fonte: Autor (2023).

6 CONCLUSÃO

Os sistemas de instrumentação virtual, em especial os baseados em visão computacional e que utilizam câmeras como elemento sensor, são alvo de diversos estudos, principalmente, quando o problema requer um nível mais elevado de portabilidade.

A metodologia de processamento digital de imagem é o elemento central deste tipo de sistema. Para cada tipo de aplicação, são requeridas diferentes técnicas de análise de imagem, que acarretam em distintos níveis de exatidão, podendo ser mensurados por meio de projeto e ensaios.

Nesta pesquisa, foi elaborada uma metodologia para compor um sistema de medição baseado em: um algoritmo Python equipado com a biblioteca de visão computacional OpenCV, que é executado em um computador pessoal; um plano de referenciamento; um suporte de fixação; e um smartfone para a captura de fotos.

Para o desenvolvimento da metodologia, foram analisadas as principais técnicas de processamento digital de imagem, bem como a compensação das principais fontes de erro e distorção de imagens. Foram analisadas também diferentes linguagens de programação para que o algoritmo fosse desenvolvido na plataforma que melhor satisfizesse aos requisitos de projeto. As linguagens concorrentes foram obtidas por meio do estudo de trabalhos correlatos.

A partir da fundamentação teórica e do conhecimento do problema, identificou-se que as técnicas de detecção de bordas e contornos, e seu pré-processamento, são fatores essencialmente ligados à exatidão de sistemas de medição por imagem, tal qual o objeto desta pesquisa. Por isso, são continuamente desenvolvidos e avaliados em diferentes aplicações.

Neste trabalho, além da seleção do algoritmo de detecção de contornos, foram analisadas e avaliadas técnicas de recombinação de imagens digitais, que visam aproveitar-se das informações contidas em imagens coloridas, orientadas à detecção de bordas. Para tanto, foram elaboradas abordagens em diferentes espaços de cor, utilizando-se de operações de limiarização e recombinação de resultados intermediários. Além disso, foram desenvolvidos recursos adicionais de análise de borda, calibração de câmera, referenciamento por meio de marcadores ArUco e correções de posicionamento.

A metodologia que obteve o melhor desempenho para o sistema de medição proposto, sob as definidas condições de ensaio, foi a recombinação lógica tipo *OR* do modelo de cor

YUV. Essa metodologia apresentou um erro máximo de 1,87mm. Tal erro foi estimado de forma experimental a partir de medições sobre as próprias placas gaxetadas caracterizadas, utilizando-se de conceitos de metrologia. Apesar deste erro ser percentualmente baixo para as medidas realizadas, este resultado ainda é bastante limitado para a aplicação em questão, frente à utilização de outros instrumentos. Esse erro decorre do excesso de fatores que influenciam na medição por imagem, como distorção, desalinhamento e resolução limitada. Mesmo utilizando-se recursos de compensação, há erro considerável devido à contribuição conjunta dos diversos fatores que afetam a qualidade da medição.

Identificou-se que um fator de grande impacto na composição do erro deste processo de medição está ligado ao nível de qualidade da câmera. Além da resolução das imagens, que impacta diretamente nos níveis de definição do contorno da placa, a distorção produzida é considerável. Não foi possível estimar a qualidade mínima requerida para a câmera, quando da aplicação em questão.

Com relação à estratégia de recombinação selecionada, verificou-se que esta apresentou incrementos sutis de exatidão ao sistema de medição proposto, sugerindo que a mesma possa ser analisada e avaliada em estudos futuros, em outras aplicações.

7 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos de continuidade desta pesquisa, sugere-se o conjunto de ações listadas a seguir:

- Analisar o desempenho desta metodologia a partir de uma câmera de qualidade superior, com maior resolução e menor distorção, abordada por meio de um *smartphone* de categoria superior;
- Analisar o desempenho desta metodologia em placas maiores e menores, reposicionando o sistema de referenciamento;
- Analisar o desempenho desta metodologia sob condições de posicionamento e iluminação mais adversas;
- Prosseguir com a transferência completa do algoritmo para a plataforma Android para analisar o desempenho e discorrer sobre a viabilidade;
- Analisar metodologias para a identificação automática de diferentes modelos de placa, utilizando técnicas de *machine learning*;
- Utilizar um processo de medição para a caracterização das amostras com menor impacto nas incertezas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 10123 - Instrumento de medição e controle - Trena de fita de aço - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 2012.
- ABNT. **NBR IEC 60079-19 - Atmosferas explosivas parte 19 - Reparo, revisão e recuperação de equipamentos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. 2020.
- ALFA LAVAL. Trocadores de calor a placas gaxetado. **Alfa Laval**, 2023. Disponível em: <<https://www.alfalaval.com.br/produtos/transferecia-de-calor/trocadores-de-calor-a-placa/trocadores-de-calor-a-placas-gaxetado/>>. Acesso em: 06 jan. 2023.
- BELAN, P. A.; ARAÚJO, S. A. D.; LIBRANTZ, A. F. H. Técnicas de visão computacional aplicadas no processo de calibração de instrumentos de medição com display numérico digital sem interface de comunicação de dados. **Exacta**, São Paulo, v. 10, n.1, p. 82-91, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.uninove.br/exacta/article/view/3091/2244>>. Acesso em: 09 jan. 2023.
- BERMO. **Manual de Instruções: Trocadores de Calor a Placas Gaxetados**. [S.l.], p. 16. 2018.
- BERMO. Blog Bermo. **BERMO - A COMPANY OF THE ARMATUREN GROUP**, 24 set. 2021. Disponível em: <<https://blog.bermo.com.br/trocador-de-calor-a-placas/>>. Acesso em: 06 jan. 2023.
- BOUGUET, J. Y. Camera Calibration Toolbox for Matlab. **Stanford University**, 2003. Disponível em: <<http://robots.stanford.edu/cs223b04/JeanYvesCalib/>>. Acesso em: 23 mar. 2023.
- BUENO, M. L. Detecção de Bordas através de Algoritmo Canny. **Página da disciplina de Visão Computacional - PPGCC - UFSC**, Florianópolis, 2016. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/visao/2000/Bordas/index.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.
- CAMPOS, A. G. **Detecção e Análise de Contornos em Imagens 2D**. São Carlos: [s.n.], 1998. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Física, Departamento de Física e Informática, Universidade de São Paulo. 134 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76132/tde-23092008-110948/publico/AndreaGomesCamposM.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2023.
- CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE - Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1986. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4767851>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

CARVALHO, A. D. **Avaliação termoeconômica da redução do inventário de trocadores de calor em trens de compressão por meio de resfriamento assistido**. Florianópolis: [s.n.], 2022. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Campus Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina. 147 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/235315/PEMC2226-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 out. 2023.

CHEN, N.; MEN, X.; HAN, X.; WANG, X.; SUN, J.; CHEN, H. Edge Detection Based on Machine Vision Applying to Laminated Wood Edge Cutting Process. **IEEE - Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)**, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8397759>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

CIE. Objetivos do CIE. **International Commission on Illumination**, 2023. Disponível em: <<https://cie.co.at/node/2/cie-s-objectives>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

COLET, M. E. **Um método para identificação de superfície aquática turva para navegação autônoma**. Porto Alegre: [s.n.], 2017. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 95 p. Disponível em: <<https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/7181>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

CÔRTEZ, J. B. R. **Análise Da Estabilidade Geométrica De Câmaras Digitais De Baixo Custo Com Diferentes Métodos De Calibração**. Curitiba: [s.n.], 2010. Tese (Doutorado) - Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. 142 p. Disponível em: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34059544/tese_joao_cortes-libre.pdf?1403950268=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTese_joao_cortes.pdf&Expires=1676121777&Signature=YNyBO49srCeMrvFTLKIOvLZTXrQNLRo~26Oi6sjVDRrAqXlleApcYncUGCFPmDpi8J~e>. Acesso em: 11 fev. 2023.

COSTA, D. C. **Segmentação de Imagens Naturais Baseada em Modelos de Cor de Diferença Cromática, Máscaras de Detecção de Contornos e Supressão Morfológica de Texturas**. Recife: [s.n.], 2015. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência da Computação, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco. 177 p. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/18620/1/TESE__DIOGO_CAVALCANTI_COSTA.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2023.

DUTTA, S.; CHAUDHURI, B. B. A Color Edge Detection Algorithm in RGB Color Space. **IEEE - International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing**, p. 337-340, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5329404>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

DXOMARK. What we Test and Score in Camera. **dxomark.com**, 2023. Disponível em: <<https://www.dxomark.com/what-we-test-camera/>>. Acesso em: 19 out. 2023.

FABRE, D. T. **Desenvolvimento De Um Sistema De Visão Para Inspeção Automatizada De Peças Da Indústria Cerâmica**. Florianópolis: [s.n.], 2019. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal De Educação Ciência E Tecnologia De Santa Catarina, Câmpus Florianópolis, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Mecatrônica. 89 p. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1187/Disserta%3%a7%c3%a3o_Diego%20Fabre_Final_Completa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 09 jan. 2023.

FAUSTINELLI, A. B. **Sistema De Alinhamento De Prótese De Membro Inferior Utilizando Visão Computacional**. Ilha Solteira: [s.n.], 2021. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho. 64 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/204638/faustinelli_ab_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 09 jan. 2023.

FELICIANO, F. F.; SOUZA, I. L. D.; LETA, F. R. Visão Computacional Aplicada à Metrologia Dimensional Automatizada: Considerações Sobre Sua Exatidão. **ENGEVISTA - Universidade Federal Fluminense**, v. 7, n. 2, p. 38-50, dez. 2005. Disponível em: <<https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8789>>. Acesso em: 08 jan. 2023.

FILHO, O. M.; NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999. 331 p. Disponível em: <<https://www.ogemarques.com/wp-content/uploads/2014/11/pdi99.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

GHODRATI, S.; MOHSENI, M.; KANDI, S. G. Application of image edge detection methods for precise estimation of the standard surface roughness parameters: Polypropylene/ethylenepropylene-diene-monomer blend as a case study. **ELSEVIER - Measurement**, v. 138, p. 80-90, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224119301514>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; EDDINS, S. L. **Digital Image Processing Using MATLAB**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

GUT, J. A. W. **Configurações ótimas para trocadores de calor a placas**. São Paulo: [s.n.], 2003. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 244 p. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-22102003-093322/publico/Tese_Jorge_A_W_Gut.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2023.

HOEFGEEST, S. R.; GARCIA, I. A.; GONZALEZ, R. C. Mobile robot localization in industrial environments using a ring of cameras and ArUco markers. **IEEE - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9589442>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

HUECKEL, M. H. An Operator Which Locates Edges in Digitized Pictures. **Journal of the Association for Computing Machinery**, California, p. 113-125, 1971. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/321623.321635>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM2012)**. Duque de Caxias: [s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2023.

INMETRO. Inmetro - Institucional. **gov.br**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/aceso-a-informacao/institucional>>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ISO. **ISO 17850 - Photography - Digital cameras - Geometric distortion (GD) measurements**. International Organization for Standardization. [S.l.]. 2015.

JR, A. A. G.; SOUSA, A. R. D. **Fundamentos de Metrologia científica e industrial**. 2ª. ed. Barueri: Manole, 2018. 462 p.

JUNIOR, O. P. **Método Local De Correção Da Distorção Da Lente Aplicado A Visão Estereoscópica**. Florianópolis: [s.n.], 2014. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 112 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/123425>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

JUNJI, H.; LI, S.; JIANLI, X.; JUN, C.; YING, Z. Size Detection of Firebricks Based on Machine Vision Technology. **IEEE - International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation**, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5458989>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

KOPPARAPU, S. K. Lighting design for machine vision application. **Elsevier - Image and Vision Computing**, v. 24, p. 720-726, 2006. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0262885606000278>>. Acesso em: 14 fev. 2023.

KROEGER, O.; HUEGLE, J.; NIEBUHR, C. A. An automatic calibration approach for a multi-camera-robot system. **IEEE - 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8869522>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

LAUREANO, G. T. **Detecção Topológica de Padrões Xadrez para Calibração de Câmeras**. São Carlos: [s.n.], 2013. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 140 p. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18152/tde-10122013-094033/publico/Gustavo.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2023.

LEAL, V. N.; CARNEIRO, M. B. P.; VEIGA, A. C. P. Utilização de Contorno Ativo para Segmentação da Íris em um Sistema de Reconhecimento de Íris. **VIII CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2010. Disponível em:

<https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2010/ceel2010_21.pdf>.
Acesso em: 06 jan. 2023.

LI, Y. F.; HAN, X. X.; LI, S. Y. Non-contact Dimension Measurement of Mechanical Parts Based on Image Processing. **International Congress on Image and Signal Processing**, Luoyang Henan, 8th, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7408020>>.
Acesso em: 04 dez. 2022.

LINK, W. **Metrologia Mecânica: Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1997.

LIRA, F. A. D. **Metrologia na Indústria**. 7ª. ed. São Paulo: Érica Ltda, 2010.

LOBÃO, F. S. **Calibração Com Mapeamento Das Distorções Geométricas Aplicada A Um Sistema De Visão Esteréo**. Brasília: [s.n.], 2004. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 113 p. Disponível em: <<http://www.ene.unb.br/adolfo/Monographs/MScPhD/DM04%20Fabio%20Santos%20Lobao.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

LUPU, R. G.; HERGHELEGIU, P.; BOTEZATU, N.; MOLDOVEANU, A.; FERCHE, O.; ILIE, C.; LEVINTA, A. M. Virtual Reality System for Stroke Recovery for Upper Limbs Using ArUco Markers. **IEEE - 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)**, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8107092>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

MARR, D.; HILDRETH, E. Theory of edge detection. **Proceedings of the Royal Society of London**, p. 187-217, 1980. Disponível em: <<http://www.hms.harvard.edu/bss/neuro/bornlab/qmbc/beta/day4/marr-hildreth-edge-prsl1980.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MARTINS, A. P.; JUNIOR, J. C. P. Inspeção de Solda Utilizando Visão Computacional. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, São João del-Rei, v. X, p. 444-449, 21 set. 2011. Disponível em: <<https://fei.edu.br/sbai/SBAI2011/86253.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2023.

MARTINS, G. S.M.; SANTIAGO, R. S.; BECKEDORFF, L. E.; POSSAMAI, T. S.; OBA, R.; OLIVEIRA, J. L.G.; OLIVEIRA, A. A.M.; PAIVA, K. V. Structural analysis of gasketed plate heat exchangers. **Elsevier - International Journal of Pressure Vessels and Piping**, n. 197, p. 11, 21 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016122000266>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MATHWORKS. Documentation - bwboundaries. **MathWorks.com**, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwboundaries.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MATHWORKS. Image Processing Toolbox. **MathWorks.com**, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/image.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MATHWORKS. Products - Matlab. **MathWorks.com**, 2023. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MATURANA, P. S. **Algoritmos de detecção de bordas implementados em FPGA**. Ilha Solteira: [s.n.], 2010. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho. 155 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87059/maturana_ps_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MEGEL, Y.; KUTSENKO, A.; BLAGOV, I.; KOVALENKO, SV.; KOVALENKO, SE.; MALKO, M.; RYBALKA, A. Information System for Automating Processes of Biological Objects Detection, Recognition, and Measurement. **IEEE - International Scientific Symposium on Metrology and Metrology Assurance**, v. XXXI, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9610832>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

MILANO, D. D.; HONORATO, L. B. Visão Computacional. **UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas**, Limeira/SP, p. 7, 2010. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/3058305-Visao-computacional-danilo-de-milano-luciano-barrozo-honorato-unicamp-universidade-estadual-de-campinas-ft-faculdade-de-tecnologia.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

MORTEAN, M. V. V. **Desenvolvimento De Tecnologias De Recheios Para Trocadores De Calor Compactos Soldados Por Difusão**. Florianópolis: [s.n.], 2014. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 212 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/130995/327658.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 fev. 2023.

MOURA, T. V. D.; NOVAZZI, L. F. Estudo de Configurações para Trocadores de Calor a Placas. **Simpósio de Iniciação Científica - Fei**, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://fei.edu.br/70anos/simposio/trabalhos2014/quimica/thiago_vicente.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2023.

NATIONAL INSTRUMENTS. **IMAQ Vision for LabVIEW: User Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2004. 141 p. Disponível em: <<https://www.ni.com/pdf/manuals/371007a.pdf>>. Acesso em: 06 dez. 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS. Instrumentação Virtual. **NI**, 2019. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/virtual-instrumentation.html#:~:text=Um%20instrumento%20virtual%20consiste%20de,as%20fun>>. Acesso em: 06 jan. 2023. Artigo Técnico.

NATIONAL INSTRUMENTS. NI Vision Concepts: Edge Detection Concepts. **NI**, 2019. Disponível em: <https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370281AG-01/nivisionconcepts/edge_detection_concepts/>. Acesso em: 06 dez. 2021.

NATIONAL INSTRUMENTS. What Is LabVIEW? **NI**, 2023. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

NATIONAL INSTRUMENTS. What Is the Vision Development Module? **NI**, 2023. Disponível em: <<https://www.ni.com/pt-br/shop/data-acquisition-and-control/add-ons-for-data-acquisition-and-control/what-is-vision-development-module.html>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

NETO, J. C. D. S. **Metrologia e Controle Dimensional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

OLIVEIRA, B. C. F. D. **Desenvolvimento de Sistemas de Visão Computacional para Medição e Inspeção de Estatores**. Florianópolis: [s.n.], 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica. 175 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/135784/335771.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 08 jan. 2023.

OLIVEIRA, D. A. **Deteção Automática de Cistos Odontológicos em Imagens de Radiografia Panorâmica**. Sobral: [s.n.], 2019. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará. 90 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/52269>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

ONTIVEROS, S.; YAGÜE, J. A.; JIMÉNEZ, R.; BROSED, F. Computer Tomography 3D edge detection comparative for metrology applications. **ELSEVIER - Procedia Engineering**, v. 63, p. 710-719, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813014768>>. Acesso em: 09 jan. 2023.

OPENCV. Detection of ArUco Markers. **OpenCV - Open Source Computer Vision**, 2022. Disponível em: <https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html>. Acesso em: 16 fev. 2023.

OPENCV. Structural Analysis and Shape Descriptors. **OpenCV - Open Source Computer Vision**, 2022. Disponível em: <https://docs.opencv.org/3.4/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga17ed9f5d79ae97bd4c7cf18403e1689a>. Acesso em: 06 jan. 2023.

OPENCV. About OpenCV. **OpenCV Org**, 2023. Disponível em: <<https://opencv.org/about/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

OPENCV. Camera Calibration and 3D Reconstruction. **OpenCV - Open Source Computer Vision**, 2023. Disponível em:

<https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html#ga3207604e4b1a1758aa66acb6ed5aa65d>. Acesso em: 23 mar. 2023.

OPENCV. Image Thresholding. **OpenCV - Open Source Computer Vision**, 2023. Disponível em: <https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html>. Acesso em: 13 jul. 2023.

OSELAME, G. B.; NEVES, E. B. Desenvolvimento De Hardware E Software Para Acompanhamento De Lesões Dermatológicas. **Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica – CBEB**, v. XXIV, 2014. Disponível em: <https://www.canal6.com.br/cbeb/2014/artigos/cbeb2014_submission_035.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2023.

OTHMAN, N. A.; SALUR, M. U.; KARAKOSE, M.; AYDIN, I. An Embedded Real-Time Object Detection and Measurement of its Size. **IEEE - International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)**, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8620812>>. Acesso em: 05 jan. 2023.

OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE - Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, 1979. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4310076>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

OURIQUE, P. A.; GIOVANNINI, O.; CATELLI, F. Fotografando estrelas com uma câmera digital. **SCIELO - Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/LG7jTZBnrVckzTMdRWPGT5R/?lang=pt>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

OYAMA, P. I. D. C. **Método para classificação de café em grãos por imagens digitais pelo uso de atributos selecionados de morfologia, cor e textura**. São Carlos: [s.n.], 2014. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 150 p. Disponível em: <http://200.235.128.121/bitstream/handle/123456789/11983/Dissertacao_Pedro%20Ivo%20de%20Castro%20Oyama.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 jul. 2023.

PAPARI, G.; PETKOV, N. Edge and line oriented contour detection: State of the art. **Elsevier - Image and Vision Computing**, p. 79-103, 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0262885610001253>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

PELTOKETO, V.-T. **Benchmarking of Mobile Phone Cameras**. Vaasa: [s.n.], 2016. Tese (Doutorado) - Departamento de Ciência da Computação, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Vaasa. 168 p. Disponível em: <https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-685-2.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

PETROBRAS. **Norma Técnica N-2931**. [S.l.]. 2019.

PETROBRAS. **Norma Técnica N-2918**. [S.l.]. 2020.

PETROBRAS. **Especificação Técnica ET-3010.00-1200-456-PPC-002**. [S.l.]. 2022.

PETROBRAS. **Especificação Técnica I-ET-3010.00-5511-768-PPT-001**. [S.l.]. 2022.

PETROBRAS. Módulo Parcerias Tecnológicas. **Tecnologia Petrobras**, 2022. Disponível em: <<https://tecnologia.petrobras.com.br/modulo-parcerias-tecnologicas>>. Acesso em: 13 out. 2023.

PETROBRAS. Módulo Parcerias Tecnológicas - OP564. **Oportunidades - OP564 - Ferramenta de inspeção de mangotes**, 2022. Disponível em: <<https://sigitec-competitividade.petrobras.com.br/v2/public/opportunity/public-selection/564>>. Acesso em: 13 out. 2023.

PETROBRAS. Módulo Parcerias Tecnológicas - OP1846. **Oportunidades - OP1846 - Metodologias portáteis aplicadas a matrizes aquosas e complexas**, 2023. Disponível em: <<https://sigitec-competitividade.petrobras.com.br/v2/public/opportunity/public-selection/1846>>. Acesso em: 13 out. 2023.

PHAM, L. H.; TRAN, D. N.; RHIE, C. H.; JEON, J. W. A Mobile Vision-based System for Gap and Flush Measuring between Planar Surfaces using ArUco Markers. **IEEE - International Conference on Electronics, Information, and Communication**, 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9369720>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

PYTHON S. F. About Python. **Python Org**, 2023. Disponível em: <<https://www.python.org/about/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

RIBEIRO, E. B. **Avaliação Experimental Das Fontes De Incerteza Associadas À Visão De Máquina Para Subsídio Ao Projeto De Um Sistema Automatizado De Calibração De Manômetros**. Florianópolis: [s.n.], 2015. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 137 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/169379>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

RÖPER, T. S. **Sistema De Visão Computacional Para Otimização De Corte De Madeira Em Máquina Refiladeira**. Florianópolis: [s.n.], 2019. Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia De Santa Catarina, Campus Florianópolis, Programa de PósGraduação Stricto Sensu em Mecatrônica. 76 p. Disponível em: <<https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1234/DISSERTACAO%20THIA%20SAMPAIO%20ROPER.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 08 jan. 2023.

ROSENFELD, A. Connectivity in Digital Pictures. **Journal of the Association for Computing Machinery**, Maryland, p. 146-160, 1970. Disponível em: <<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/321556.321570>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

RUZON, M. A. **Early Vision Using Distributions**. [S.l.]: [s.n.], 2000. Teste (Doutorado) - Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Stanford. 124 p. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/10862d1db8f6cbc5eb587a3017c4e602/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

RUZON, M. A.; TOMASI, C. Edge, Junction, and Corner Detection Using Color Distributions. **IEEE - Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 2001. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/969118>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

SABINO, D. D. **Medidas De Deslocamento E Vibrações Através De Imagens De Câmeras Digitais**. Ilha Solteira: [s.n.], 2013. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho. 110 p. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111084/000795916.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

SALIS, T. T. **Aplicações de Visão Computacional na Indústria Siderúrgica: problemas, soluções e estudos de caso**. Belo Horizonte: [s.n.], 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. 191 p. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/GASP-7LXK22/1/turibio_tanus_salis.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2023.

SANTOS, R. J. B. C. **Técnica de calibração baseada na adaptação dos parâmetros de câmera para ambientes com diferentes índices de refração**. Recife: [s.n.], 2018. Dissertação (Mestrado) - Ciência da Computação, Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco. 118 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/33311/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Rodrigo%20Jos%C3%A9%20Batista%20Costa%20Santos.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

SCHOEPING, D. G. E. **Distribuição irregular de vazões em trocadores de calor do tipo placas gaxetadas e casco-placas soldadas**. Joinville: [s.n.], 2018. Dissertação (Mestrado) - Engenharia e Ciências Mecânicas, Campus Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. 273 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/207289/PPCM0026-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 12 out. 2023.

SERPENTINI, F. **Desenvolvimento e Implementação de Câmera Digital com Sensor CCD para Equipamentos de Análise Ótica - Aplicação em Espectrofotometria**. Salvador: [s.n.], 2009. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Matemática, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia. 132 p. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/21458>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

SILVATTI, A. P. **Calibração De Câmeras Para Análises Subaquáticas De Movimentos**. Campinas: [s.n.], 2013. Tese (Doutorado) - Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas. 87 p. Disponível em: <<https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=470827>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

SIMÕES, A. D. S. **Segmentação de imagens por classificação de cores: uma abordagem neural**. São Paulo: [s.n.], 2000. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 171 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3141/tde-15052003-103241/publico/dissertacao.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

SUZUKI, S.; ABE, K. Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, p. 32-46, 1985. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0734189X85900167>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

TAKATSUI, F. **Sistema CIE LAB: análise computacional de fotografias**. Araraquara: [s.n.], 2011. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual Paulista. 101 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/89626/takatsui_f_me_arafo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 11 jul. 2023.

TIAN, W.; CHEN, D.; YANG, Z.; YIN, H. The application of navigation technology for the medical assistive devices based on Aruco recognition technology. **IEEE - International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9341231>>. Acesso em: 16 fev. 2023.

VAS TECNOLOGIA INDUSTRIAL. Planar, 2023. Disponível em: <<http://vastecnologia.com.br/planar/>>. Acesso em: 07 jan. 2023.

WANGENHEIM, A. V.; SEARA, D. M.; ELIZANDRO, G. C. D. S. E. **Encontrando a Linha Divisória: Detecção de Bordas**. Florianópolis: [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~aldo.vw/visao/bordas.pdf>>. Acesso em: 06 jan. 2023.

YI, S.; HARALICK, R. M.; SHAPIRO, L. G. Optimal Sensor and Light Source Positioning for Machine Vision. **Elsevier - Computer Vision and Image Understanding**, v. 61, p. 122-137, 1995. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1077314285710090>>. Acesso em: 14 fev. 2023.

ZHANG, Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. **IEEE - TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE**, v. 22, p. 1330-1334, 2000. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/888718>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

APÊNDICE A - LEITURAS - YUV - RECOMBINAÇÃO AND

Tabela 13 - Leituras Placa 1 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	943,5	942,7	385,8	385,5
Foto 2	943,8	943,2	385,2	385,2
Foto 3	944,0	943,1	385,5	385,1
Foto 4	943,2	942,6	385,6	385,3
Foto 5	944,2	943,3	385,5	385,3
Foto 6	943,5	942,8	385,6	385,1
Foto 7	943,6	942,9	385,2	385,3
Foto 8	943,3	942,6	385,5	385,0
Foto 9	943,5	942,9	385,4	385,5
Foto 10	943,9	943,5	386,0	385,6
Foto 11	943,6	942,9	385,3	385,4
Foto 12	943,6	942,6	385,1	385,3
Foto 13	943,7	943,2	385,3	385,4
Foto 14	943,8	943,1	385,5	385,3
Foto 15	943,6	942,7	385,2	385,1
Foto 16	943,9	942,9	385,3	385,2
Foto 17	943,4	942,6	385,0	384,9
Foto 18	944,0	943,2	385,2	385,2
Foto 19	943,3	942,5	385,8	385,6
Foto 20	944,0	943,1	385,5	385,6
Média (mm)	943,7	942,9	385,4	385,3
Td (mm)	-0,33	-0,58	-0,57	-0,70
Disp. Máx (mm)	1,0	1,0	1,0	0,7

Fonte: Autor (2023).

Tabela 14 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,1	868,5	369,2	367,9
Foto 2	868,9	869,8	369,5	367,6
Foto 3	868,2	868,7	369,3	367,9
Foto 4	868,1	868,5	369,3	367,4
Foto 5	868,3	868,3	369,3	367,6
Foto 6	868,5	868,9	369,5	367,4
Foto 7	868,1	868,5	369,2	367,3
Foto 8	868,5	868,6	369,6	367,8
Foto 9	868,1	868,5	368,9	367,9
Foto 10	868,2	868,8	369,0	368,1
Foto 11	868,6	868,5	368,7	367,9
Foto 12	869,1	869,6	369,2	367,8
Foto 13	868,9	869,3	369,7	367,9
Foto 14	868,9	869,3	370,0	367,6
Foto 15	868,6	868,9	370,0	368,0
Foto 16	868,4	868,5	369,5	367,5
Foto 17	868,9	869,1	369,6	367,7
Foto 18	868,7	869,0	369,1	367,8
Foto 19	868,3	868,3	369,3	367,9
Foto 20	868,6	868,6	369,5	367,9
Média (mm)	868,5	868,8	369,4	367,7
Td (mm)	-0,50	-0,19	-0,63	-0,75
Disp. Máx (mm)	1,0	1,5	1,3	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 15 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,5	868,4	369,1	368,3
Foto 2	868,8	868,6	369,1	367,7
Foto 3	868,9	868,9	369,3	368,0
Foto 4	869,1	868,8	369,4	368,2
Foto 5	868,8	868,0	369,7	368,5
Foto 6	868,8	868,9	369,0	368,2
Foto 7	868,3	868,6	369,7	368,2
Foto 8	868,3	868,0	369,1	368,2
Foto 9	868,7	868,6	369,1	367,9
Foto 10	868,7	869,0	369,3	367,9
Foto 11	868,4	868,4	369,5	368,1
Foto 12	868,5	868,8	370,0	368,5
Foto 13	868,9	868,6	369,8	368,2
Foto 14	868,5	868,3	369,5	368,2
Foto 15	868,9	868,3	369,8	368,3
Foto 16	868,6	868,9	369,7	368,5
Foto 17	868,8	868,6	369,6	368,2
Foto 18	868,3	868,0	369,4	367,6
Foto 19	868,4	867,5	369,3	368,5
Foto 20	868,5	868,1	369,6	368,1
Média (mm)	868,6	868,5	369,5	368,2
Td (mm)	-0,37	-0,54	-0,55	-0,33
Disp. Máx (mm)	0,8	1,5	1,0	0,9

Fonte: Autor (2023).

Tabela 16 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,1	868,5	369,5	368,5
Foto 2	869,1	868,4	369,9	368,3
Foto 3	869,5	868,8	369,7	368,6
Foto 4	869,1	868,4	370,2	368,6
Foto 5	869,3	868,7	369,8	368,8
Foto 6	868,7	868,3	369,6	368,4
Foto 7	869,1	868,5	369,3	368,6
Foto 8	869,3	868,8	370,1	368,6
Foto 9	869,2	868,8	369,8	368,6
Foto 10	869,1	868,5	370,0	368,6
Foto 11	869,0	868,7	369,9	368,6
Foto 12	869,4	868,5	369,5	368,5
Foto 13	869,0	868,4	369,9	368,4
Foto 14	868,9	868,5	369,6	369,0
Foto 15	869,1	868,6	369,3	368,8
Foto 16	869,3	869,0	369,6	368,4
Foto 17	869,5	868,9	369,6	368,7
Foto 18	869,0	868,8	369,9	368,3
Foto 19	869,2	868,7	369,7	368,6
Foto 20	869,1	868,5	369,5	368,8
Média (mm)	869,2	868,6	369,7	368,6
Td (mm)	0,15	-0,38	-0,28	-0,42
Disp. Máx (mm)	0,8	0,7	0,9	0,7

Fonte: Autor (2023).

Tabela 17 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,5	868,5	369,7	368,7
Foto 2	870,0	869,1	369,3	368,3
Foto 3	869,8	868,9	369,5	368,3
Foto 4	870,0	868,9	369,6	367,9
Foto 5	869,8	868,7	369,5	368,2
Foto 6	869,9	869,0	369,8	368,0
Foto 7	869,4	868,5	369,6	368,6
Foto 8	869,5	868,6	369,7	368,5
Foto 9	869,7	868,5	369,4	368,4
Foto 10	869,9	869,0	369,7	368,6
Foto 11	869,8	869,2	369,5	368,4
Foto 12	870,1	868,8	369,5	368,0
Foto 13	869,9	868,8	370,0	368,1
Foto 14	869,6	869,0	369,5	368,4
Foto 15	869,7	868,6	369,3	368,2
Foto 16	869,7	868,4	369,5	368,0
Foto 17	869,4	868,5	368,9	368,5
Foto 18	869,8	868,5	369,4	368,5
Foto 19	870,1	869,5	369,7	368,5
Foto 20	870,0	869,3	369,5	368,3
Média (mm)	869,8	868,8	369,5	368,3
Td (mm)	-0,22	-0,69	-0,47	-0,68
Disp. Máx (mm)	0,7	1,1	1,1	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 18 - Leituras Placa 3 - YUV - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,9	870,3	379,2	379,2
Foto 2	869,3	869,9	379,4	379,7
Foto 3	869,4	870,0	379,3	379,6
Foto 4	869,9	870,3	379,5	379,7
Foto 5	869,9	870,3	379,8	379,9
Foto 6	869,7	870,6	379,4	379,9
Foto 7	870,0	871,0	379,5	379,5
Foto 8	869,5	870,5	380,0	380,2
Foto 9	869,4	870,2	380,0	380,0
Foto 10	869,7	870,5	379,6	379,8
Foto 11	869,7	870,6	379,4	380,0
Foto 12	870,0	870,2	379,3	379,9
Foto 13	869,8	870,7	379,8	380,0
Foto 14	869,8	870,5	379,6	380,0
Foto 15	869,4	870,0	379,4	379,7
Foto 16	870,3	871,0	379,6	380,2
Foto 17	869,9	870,3	379,7	380,1
Foto 18	869,8	870,3	379,9	379,9
Foto 19	869,6	870,4	379,5	379,7
Foto 20	869,9	870,8	379,7	379,9
Média (mm)	869,7	870,4	379,6	379,8
Td (mm)	-0,26	-0,58	-0,42	-0,16
Disp. Máx (mm)	1,0	1,1	0,8	1,0

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE B - LEITURAS - YUV - RECOMBINAÇÃO OR

Tabela 19 - Leituras Placa 1 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	943,9	942,8	386,1	385,8
Foto 2	944,0	943,4	385,9	385,5
Foto 3	944,1	943,3	385,7	385,4
Foto 4	943,4	942,8	386,0	385,5
Foto 5	944,1	943,4	385,6	385,6
Foto 6	943,8	943,2	386,0	385,6
Foto 7	943,9	943,2	385,8	385,4
Foto 8	943,9	943,1	385,8	385,3
Foto 9	943,7	943,1	385,8	385,5
Foto 10	943,8	943,4	385,9	385,8
Foto 11	943,8	943,3	385,7	385,7
Foto 12	943,5	942,7	385,8	385,8
Foto 13	943,6	943,0	386,1	385,7
Foto 14	944,0	943,3	385,5	385,6
Foto 15	943,6	943,3	385,5	385,4
Foto 16	944,0	943,3	385,6	385,4
Foto 17	943,7	943,4	385,6	385,4
Foto 18	943,9	943,3	385,8	385,4
Foto 19	944,1	943,2	386,1	386,0
Foto 20	944,1	943,5	386,0	385,8
Média (mm)	943,8	943,2	385,8	385,6
Td (mm)	-0,16	-0,30	-0,18	-0,42
Disp. Máx (mm)	0,7	0,8	0,6	0,7

Fonte: Autor (2023).

Tabela 20 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,7	868,8	369,9	368,5
Foto 2	868,9	869,4	370,3	368,5
Foto 3	869,1	869,2	370,2	368,3
Foto 4	868,7	868,7	369,8	368,2
Foto 5	868,7	868,7	370,3	368,2
Foto 6	868,5	868,9	370,3	368,2
Foto 7	868,7	869,1	370,5	367,8
Foto 8	868,8	869,0	370,5	368,4
Foto 9	869,1	869,5	369,9	368,1
Foto 10	868,7	869,4	370,4	368,3
Foto 11	868,8	868,8	370,3	368,6
Foto 12	869,1	869,2	370,1	368,2
Foto 13	868,9	869,3	370,3	368,5
Foto 14	869,1	869,3	370,2	367,9
Foto 15	869,1	869,1	370,3	368,2
Foto 16	868,7	868,7	370,4	368,1
Foto 17	869,2	869,4	370,1	368,2
Foto 18	868,8	869,3	370,2	368,3
Foto 19	868,9	869,0	369,7	367,9
Foto 20	868,6	868,8	369,9	368,2
Média (mm)	868,9	869,1	370,2	368,2
Td (mm)	-0,15	0,08	0,18	-0,27
Disp. Máx (mm)	0,7	0,8	0,8	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 21 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,8	868,7	370,1	368,8
Foto 2	868,5	868,3	369,7	368,4
Foto 3	869,1	869,1	370,4	368,5
Foto 4	868,8	868,6	369,8	368,8
Foto 5	869,3	868,9	370,3	368,6
Foto 6	868,9	868,7	369,9	368,4
Foto 7	868,7	868,9	370,2	368,8
Foto 8	869,1	869,1	370,0	369,1
Foto 9	868,6	868,4	369,8	368,6
Foto 10	868,6	868,7	370,1	368,5
Foto 11	868,5	868,7	370,0	368,6
Foto 12	869,2	869,0	370,2	368,3
Foto 13	869,1	868,5	369,7	368,9
Foto 14	868,9	868,9	369,9	368,9
Foto 15	869,4	868,6	370,4	368,7
Foto 16	868,7	869,0	370,6	369,1
Foto 17	869,1	868,6	370,3	369,1
Foto 18	869,2	868,7	369,7	368,6
Foto 19	868,9	868,3	370,3	368,8
Foto 20	869,0	868,9	370,5	368,5
Média (mm)	868,9	868,7	370,1	368,7
Td (mm)	-0,08	-0,27	0,09	0,20
Disp. Máx (mm)	0,9	0,8	0,9	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 22 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,4	868,7	370,3	369,0
Foto 2	869,3	868,4	370,4	368,8
Foto 3	869,7	868,9	370,6	368,7
Foto 4	869,4	868,6	370,7	369,3
Foto 5	869,4	868,9	370,5	369,1
Foto 6	869,1	868,5	370,4	368,8
Foto 7	869,3	868,6	370,3	369,3
Foto 8	869,1	868,6	370,5	368,9
Foto 9	869,5	868,9	370,7	369,1
Foto 10	869,3	868,8	370,4	369,0
Foto 11	869,0	868,8	370,4	369,2
Foto 12	869,7	868,6	370,3	368,6
Foto 13	869,4	868,7	370,2	369,0
Foto 14	869,0	868,5	370,5	369,1
Foto 15	869,5	868,9	370,4	369,2
Foto 16	869,7	869,1	370,5	369,1
Foto 17	869,2	868,9	370,2	369,3
Foto 18	869,3	868,9	370,6	369,0
Foto 19	869,6	868,9	370,5	368,8
Foto 20	869,4	868,9	370,3	369,1
Média (mm)	869,4	868,8	370,4	369,0
Td (mm)	0,37	-0,24	0,44	0,02
Disp. Máx (mm)	0,7	0,7	0,5	0,7

Fonte: Autor (2023).

Tabela 23 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	870,3	869,5	370,2	368,9
Foto 2	870,2	869,5	370,1	368,8
Foto 3	870,3	869,5	370,0	368,5
Foto 4	870,3	869,2	370,4	368,4
Foto 5	870,0	869,0	370,1	368,8
Foto 6	870,2	869,1	370,0	368,8
Foto 7	869,8	869,1	370,3	368,8
Foto 8	870,2	869,6	370,5	368,6
Foto 9	870,0	869,2	369,8	369,1
Foto 10	870,3	869,4	370,3	368,7
Foto 11	870,3	869,2	370,3	368,8
Foto 12	870,3	869,1	370,6	368,9
Foto 13	870,5	869,3	370,5	369,0
Foto 14	870,5	869,3	370,1	369,0
Foto 15	869,8	869,2	370,4	368,5
Foto 16	870,0	869,2	370,2	368,6
Foto 17	870,1	869,2	370,3	369,1
Foto 18	870,5	869,8	370,6	368,8
Foto 19	870,3	869,2	370,4	368,5
Foto 20	870,4	869,6	370,3	368,7
Média (mm)	870,2	869,3	370,3	368,8
Td (mm)	0,21	-0,19	0,27	-0,24
Disp. Máx (mm)	0,7	0,8	0,8	0,7

Fonte: Autor (2023).

Tabela 24 - Leituras Placa 3 - YUV - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	870,4	871,0	379,6	379,7
Foto 2	869,9	870,6	379,7	379,9
Foto 3	870,0	870,7	380,0	380,1
Foto 4	870,3	870,9	380,0	380,0
Foto 5	870,1	870,5	380,3	380,2
Foto 6	870,5	871,1	379,8	380,1
Foto 7	870,1	870,9	379,8	380,0
Foto 8	869,9	871,1	380,0	380,0
Foto 9	870,1	870,7	379,9	380,1
Foto 10	870,1	871,0	379,8	380,1
Foto 11	870,2	870,6	380,1	380,0
Foto 12	870,3	870,7	380,0	380,0
Foto 13	870,2	870,8	380,1	380,3
Foto 14	870,2	870,9	380,2	380,3
Foto 15	869,9	870,6	379,8	379,9
Foto 16	870,3	871,0	380,0	380,2
Foto 17	870,5	871,1	380,2	380,2
Foto 18	870,5	870,9	380,0	380,1
Foto 19	870,1	871,1	380,2	380,2
Foto 20	870,2	870,9	379,8	379,8
Média (mm)	870,2	870,9	380,0	380,1
Td (mm)	0,19	-0,14	-0,03	0,06
Disp. Máx (mm)	0,6	0,6	0,7	0,6

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE C - LEITURAS - LAB - RECOMBINAÇÃO AND

Tabela 25 - Leituras Placa 1 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	943,6	942,6	385,7	385,4
Foto 2	943,8	943,0	385,1	385,1
Foto 3	944,0	942,9	385,3	385,2
Foto 4	943,6	943,0	385,5	385,5
Foto 5	944,3	943,0	385,3	385,2
Foto 6	943,3	942,5	385,2	385,2
Foto 7	943,6	942,9	385,7	385,0
Foto 8	943,4	942,6	385,4	384,8
Foto 9	943,5	942,8	385,2	385,3
Foto 10	943,7	943,5	385,5	385,6
Foto 11	943,5	942,9	385,3	385,4
Foto 12	943,6	942,5	385,2	385,3
Foto 13	943,4	942,9	385,1	385,1
Foto 14	943,7	942,8	385,3	384,9
Foto 15	943,5	942,5	385,0	385,1
Foto 16	943,9	942,7	385,2	385,2
Foto 17	943,6	942,8	385,2	385,1
Foto 18	944,0	943,1	385,3	385,3
Foto 19	943,2	942,3	385,6	385,7
Foto 20	944,2	943,3	386,1	385,6
Média (mm)	943,7	942,8	385,4	385,3
Td (mm)	-0,33	-0,67	-0,64	-0,75
Disp. Máx (mm)	1,1	1,2	1,1	0,9

Fonte: Autor (2023).

Tabela 26 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,3	868,3	368,2	367,4
Foto 2	868,6	869,6	368,8	367,3
Foto 3	867,8	868,0	368,6	367,4
Foto 4	868,0	868,4	368,8	367,4
Foto 5	868,1	868,4	368,7	367,0
Foto 6	868,2	868,6	369,0	367,5
Foto 7	868,3	868,6	368,7	367,5
Foto 8	868,4	868,7	369,0	367,4
Foto 9	867,9	868,5	369,0	367,2
Foto 10	868,1	869,0	368,6	367,1
Foto 11	868,8	868,5	367,9	367,6
Foto 12	868,9	869,4	368,8	367,6
Foto 13	868,1	868,3	368,5	367,2
Foto 14	868,9	869,1	369,1	367,0
Foto 15	868,3	868,4	369,0	366,9
Foto 16	868,1	868,4	369,0	367,2
Foto 17	868,7	868,8	368,9	367,0
Foto 18	868,6	868,9	368,7	367,4
Foto 19	868,4	868,4	369,0	366,5
Foto 20	868,3	868,9	368,6	367,6
Média (mm)	868,3	868,7	368,7	367,3
Td (mm)	-0,66	-0,34	-1,26	-1,24
Disp. Máx (mm)	1,1	1,6	1,2	1,1

Fonte: Autor (2023).

Tabela 27 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,6	868,4	367,9	367,4
Foto 2	868,4	868,3	368,2	366,8
Foto 3	868,5	868,7	368,9	367,9
Foto 4	868,6	868,3	368,3	367,8
Foto 5	868,7	867,6	369,2	367,8
Foto 6	868,6	868,6	368,2	367,8
Foto 7	868,3	868,7	369,2	367,2
Foto 8	868,8	868,7	368,4	367,6
Foto 9	868,2	867,8	368,6	367,7
Foto 10	868,2	868,1	368,6	367,4
Foto 11	867,9	868,0	369,0	367,4
Foto 12	868,1	868,4	369,2	367,7
Foto 13	868,7	868,4	368,8	367,5
Foto 14	868,4	868,0	369,0	367,4
Foto 15	868,4	867,7	369,2	367,7
Foto 16	868,1	867,9	368,5	367,8
Foto 17	868,5	868,2	368,5	367,2
Foto 18	868,2	868,6	369,1	365,9
Foto 19	868,5	867,9	368,4	367,4
Foto 20	868,2	867,8	368,8	367,5
Média (mm)	868,4	868,2	368,7	367,4
Td (mm)	-0,60	-0,79	-1,30	-1,06
Disp. Máx (mm)	0,9	1,1	1,3	2,0

Fonte: Autor (2023).

Tabela 28 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,8	868,5	368,8	367,9
Foto 2	868,7	868,2	369,2	367,6
Foto 3	868,9	868,3	369,0	368,2
Foto 4	868,8	868,2	369,0	368,2
Foto 5	868,9	868,1	369,1	368,1
Foto 6	868,5	867,9	368,6	368,0
Foto 7	868,6	868,3	368,3	368,2
Foto 8	868,5	868,0	369,2	367,6
Foto 9	868,9	868,4	369,1	367,9
Foto 10	869,0	868,3	369,2	368,0
Foto 11	868,7	868,2	369,3	368,5
Foto 12	869,2	868,3	368,6	368,1
Foto 13	868,7	868,3	369,3	367,9
Foto 14	868,6	867,9	368,8	368,5
Foto 15	868,7	868,1	368,1	368,4
Foto 16	868,9	868,7	368,8	368,2
Foto 17	868,9	868,2	368,7	368,3
Foto 18	868,5	868,5	368,9	367,9
Foto 19	868,8	868,1	369,1	368,0
Foto 20	868,8	868,3	368,6	368,2
Média (mm)	868,8	868,2	368,9	368,1
Td (mm)	-0,23	-0,76	-1,11	-0,92
Disp. Máx (mm)	0,7	0,8	1,2	0,9

Fonte: Autor (2023).

Tabela 29 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,3	868,3	369,0	367,7
Foto 2	869,7	869,0	368,7	368,0
Foto 3	869,4	868,7	369,0	368,2
Foto 4	869,7	868,5	368,5	367,7
Foto 5	869,5	868,4	368,6	367,6
Foto 6	869,8	868,8	369,3	367,4
Foto 7	869,3	868,3	368,7	368,2
Foto 8	869,3	868,1	369,1	368,0
Foto 9	869,1	868,7	368,5	367,5
Foto 10	869,4	867,9	368,8	368,0
Foto 11	869,7	868,6	368,1	368,4
Foto 12	869,4	868,5	368,3	367,6
Foto 13	869,7	868,9	369,2	367,4
Foto 14	869,3	868,9	368,4	367,6
Foto 15	869,5	868,7	368,5	367,8
Foto 16	869,3	868,3	368,9	367,8
Foto 17	869,7	868,6	368,3	367,8
Foto 18	869,2	868,4	367,8	367,7
Foto 19	869,9	868,5	368,6	367,8
Foto 20	869,6	869,1	368,8	368,2
Média (mm)	869,5	868,6	368,7	367,8
Td (mm)	-0,51	-0,94	-1,34	-1,18
Disp. Máx (mm)	0,8	1,2	1,5	1,0

Fonte: Autor (2023).

Tabela 30 - Leituras Placa 3 - LAB - Recombinação AND.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,2	869,5	378,6	379,2
Foto 2	869,3	869,7	379,4	379,6
Foto 3	869,3	870,1	378,9	379,5
Foto 4	869,3	870,1	379,2	379,2
Foto 5	869,8	870,0	379,6	379,9
Foto 6	869,5	870,3	379,2	379,6
Foto 7	869,9	870,7	379,2	379,5
Foto 8	869,7	870,6	379,5	380,0
Foto 9	869,5	870,6	379,4	379,9
Foto 10	869,2	869,9	379,2	379,5
Foto 11	869,5	870,5	379,3	379,6
Foto 12	869,7	870,3	379,2	379,6
Foto 13	869,6	870,4	379,4	379,9
Foto 14	869,4	870,1	379,2	379,2
Foto 15	869,6	870,3	378,7	378,9
Foto 16	869,6	870,2	379,0	380,2
Foto 17	869,8	870,5	379,2	379,7
Foto 18	869,8	870,0	379,3	379,6
Foto 19	869,4	870,6	378,9	379,4
Foto 20	869,4	870,2	379,2	379,3
Média (mm)	869,5	870,2	379,2	379,6
Td (mm)	-0,47	-0,77	-0,82	-0,44
Disp. Máx (mm)	0,7	1,2	1,0	1,3

Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE D - LEITURAS - LAB - RECOMBINAÇÃO OR

Tabela 31 - Leituras Placa 1 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	944,3	943,6	385,7	385,7
Foto 2	944,2	943,3	385,5	385,4
Foto 3	944,2	943,4	385,6	385,2
Foto 4	943,4	942,8	385,9	385,5
Foto 5	944,2	943,3	386,0	385,5
Foto 6	943,9	943,2	385,7	385,2
Foto 7	943,6	943,1	385,3	385,4
Foto 8	944,5	943,5	385,3	385,2
Foto 9	943,4	942,6	385,5	385,5
Foto 10	943,7	943,5	385,9	386,0
Foto 11	943,7	943,0	385,7	385,7
Foto 12	943,7	943,2	385,8	385,6
Foto 13	943,8	943,6	385,6	385,5
Foto 14	944,1	943,0	385,3	385,3
Foto 15	943,7	942,9	385,5	385,7
Foto 16	944,1	943,4	385,6	385,3
Foto 17	943,7	943,2	385,7	385,6
Foto 18	944,1	943,4	385,5	385,6
Foto 19	943,9	943,4	385,8	385,7
Foto 20	944,1	943,2	386,2	385,9
Média (mm)	943,9	943,2	385,7	385,5
Td (mm)	-0,08	-0,27	-0,34	-0,47
Disp. Máx (mm)	1,1	1,0	0,9	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 32 - Leituras Placa 2 Amostra 1 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,7	868,1	369,4	368,1
Foto 2	869,1	869,9	370,0	368,0
Foto 3	868,6	868,7	369,9	367,7
Foto 4	868,4	868,6	369,3	367,8
Foto 5	868,2	868,1	369,6	368,0
Foto 6	868,7	868,7	369,5	367,9
Foto 7	868,7	868,5	369,8	367,7
Foto 8	868,7	868,9	369,9	367,9
Foto 9	868,5	868,9	369,3	368,0
Foto 10	868,7	869,2	369,8	367,8
Foto 11	869,0	869,1	369,6	368,1
Foto 12	869,0	869,5	369,2	368,0
Foto 13	868,3	868,7	369,3	367,8
Foto 14	868,7	869,1	369,6	367,7
Foto 15	868,7	869,2	369,7	367,8
Foto 16	868,9	869,5	369,9	367,8
Foto 17	869,1	869,2	369,8	367,6
Foto 18	869,0	869,5	369,7	367,4
Foto 19	868,1	868,5	369,1	367,6
Foto 20	868,9	869,2	369,5	368,2
Média (mm)	868,7	869,0	369,6	367,8
Td (mm)	-0,30	-0,04	-0,40	-0,65
Disp. Máx (mm)	1,0	1,8	0,9	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 33 - Leituras Placa 2 Amostra 2 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	868,4	868,4	369,9	368,7
Foto 2	868,5	868,2	369,5	368,2
Foto 3	868,9	869,1	369,6	368,2
Foto 4	868,8	868,5	369,8	368,3
Foto 5	869,0	868,2	369,9	368,4
Foto 6	868,7	869,2	369,8	368,2
Foto 7	868,3	868,9	369,9	368,6
Foto 8	868,4	868,1	369,3	368,2
Foto 9	868,4	868,2	369,6	368,5
Foto 10	868,7	868,9	369,7	368,2
Foto 11	868,3	868,6	369,8	368,2
Foto 12	868,4	868,9	370,0	368,5
Foto 13	868,5	868,2	369,7	368,5
Foto 14	868,7	868,4	369,8	368,2
Foto 15	869,0	868,6	369,8	368,4
Foto 16	868,6	868,9	370,1	368,6
Foto 17	868,9	868,5	370,1	368,5
Foto 18	868,8	868,8	369,5	367,9
Foto 19	868,5	867,6	369,9	368,5
Foto 20	868,6	868,6	369,9	367,8
Média (mm)	868,6	868,5	369,8	368,3
Td (mm)	-0,38	-0,46	-0,22	-0,17
Disp. Máx (mm)	0,7	1,6	0,8	0,9

Fonte: Autor (2023).

Tabela 34 - Leituras Placa 2 Amostra 3 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,2	868,3	369,9	368,7
Foto 2	869,2	868,6	370,1	368,5
Foto 3	869,6	869,1	370,1	368,5
Foto 4	869,2	868,6	370,1	369,0
Foto 5	869,3	868,7	369,9	368,6
Foto 6	868,9	868,3	369,9	368,7
Foto 7	869,3	868,5	369,8	368,6
Foto 8	869,3	868,7	369,8	368,4
Foto 9	869,2	868,8	370,1	368,6
Foto 10	869,3	868,5	370,0	368,7
Foto 11	869,0	868,6	369,8	368,9
Foto 12	869,4	868,7	370,0	368,2
Foto 13	869,2	868,4	369,9	368,5
Foto 14	868,9	868,4	369,9	368,8
Foto 15	869,1	868,7	369,9	368,7
Foto 16	869,5	868,9	369,9	368,3
Foto 17	869,0	868,7	369,8	369,0
Foto 18	869,3	868,9	369,9	368,8
Foto 19	869,3	868,8	370,1	369,0
Foto 20	869,1	868,8	369,7	368,8
Média (mm)	869,2	868,7	369,9	368,7
Td (mm)	0,21	-0,35	-0,07	-0,33
Disp. Máx (mm)	0,7	0,8	0,4	0,8

Fonte: Autor (2023).

Tabela 35 - Leituras Placa 2 Amostra 4 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,7	868,9	370,2	368,5
Foto 2	870,0	869,1	369,7	368,3
Foto 3	869,7	868,7	370,2	368,6
Foto 4	870,1	868,8	370,4	368,4
Foto 5	869,5	868,4	369,6	368,9
Foto 6	869,8	868,4	369,9	368,4
Foto 7	870,0	869,6	369,9	368,3
Foto 8	870,3	869,3	370,1	368,4
Foto 9	869,5	868,3	369,6	369,2
Foto 10	870,3	869,5	369,7	368,4
Foto 11	870,0	869,4	370,0	368,4
Foto 12	870,5	869,3	369,9	368,7
Foto 13	870,2	869,2	370,0	368,2
Foto 14	870,2	869,6	369,9	368,9
Foto 15	869,6	869,0	369,6	368,3
Foto 16	870,2	868,6	369,8	368,4
Foto 17	869,7	868,7	369,5	368,5
Foto 18	870,1	869,6	369,8	368,1
Foto 19	870,3	869,0	369,8	368,4
Foto 20	870,3	869,5	369,6	368,3
Média (mm)	870,0	869,0	369,9	368,5
Td (mm)	0,00	-0,45	-0,14	-0,52
Disp. Máx (mm)	1,0	1,3	0,9	1,1

Fonte: Autor (2023).

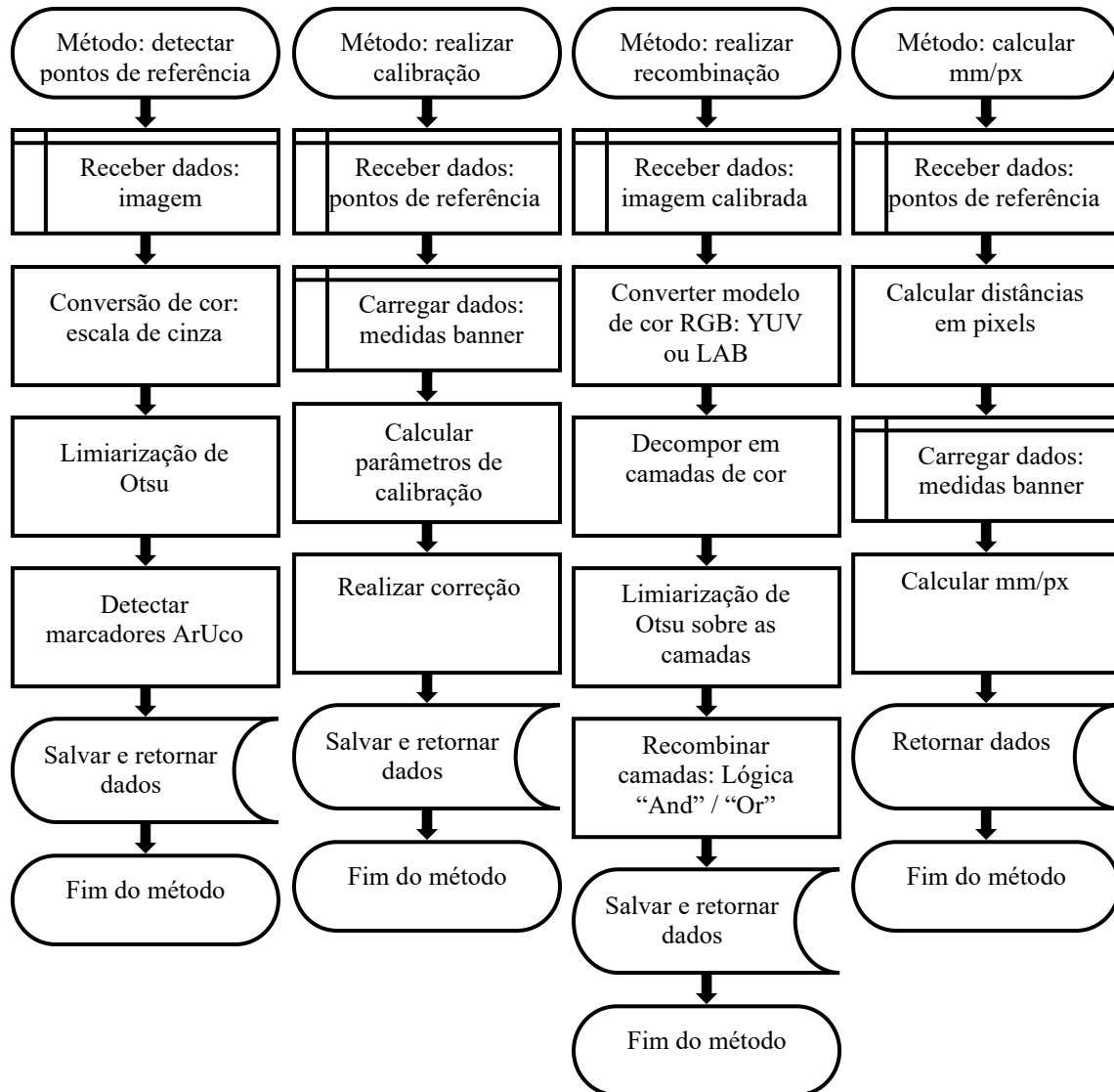
Tabela 36 - Leituras Placa 3 - LAB - Recombinação OR.

Imagem	Altura 1 (mm)	Altura 2 (mm)	Largura 1 (mm)	Largura 2 (mm)
Foto 1	869,3	870,2	379,5	379,6
Foto 2	869,5	870,2	379,3	379,9
Foto 3	869,8	870,5	379,1	379,9
Foto 4	869,8	870,7	379,5	379,6
Foto 5	870,2	870,8	379,9	380,1
Foto 6	869,9	870,7	379,6	380,0
Foto 7	869,5	870,5	379,7	379,7
Foto 8	869,4	870,5	379,9	380,0
Foto 9	869,9	870,9	379,8	380,1
Foto 10	869,6	870,5	379,8	379,7
Foto 11	869,9	870,9	379,6	380,0
Foto 12	869,9	870,6	379,5	379,8
Foto 13	870,2	871,2	379,5	379,9
Foto 14	870,0	870,9	379,8	379,9
Foto 15	869,5	870,1	379,5	380,0
Foto 16	870,1	870,7	379,6	380,2
Foto 17	870,1	870,5	379,9	380,2
Foto 18	869,9	870,7	380,1	380,0
Foto 19	869,8	870,5	379,8	380,1
Foto 20	870,1	871,0	379,7	379,9
Média (mm)	869,8	870,6	379,7	379,9
Td (mm)	-0,18	-0,37	-0,34	-0,07
Disp. Máx (mm)	0,9	1,1	1,0	0,6

Fonte: Autor (2023).

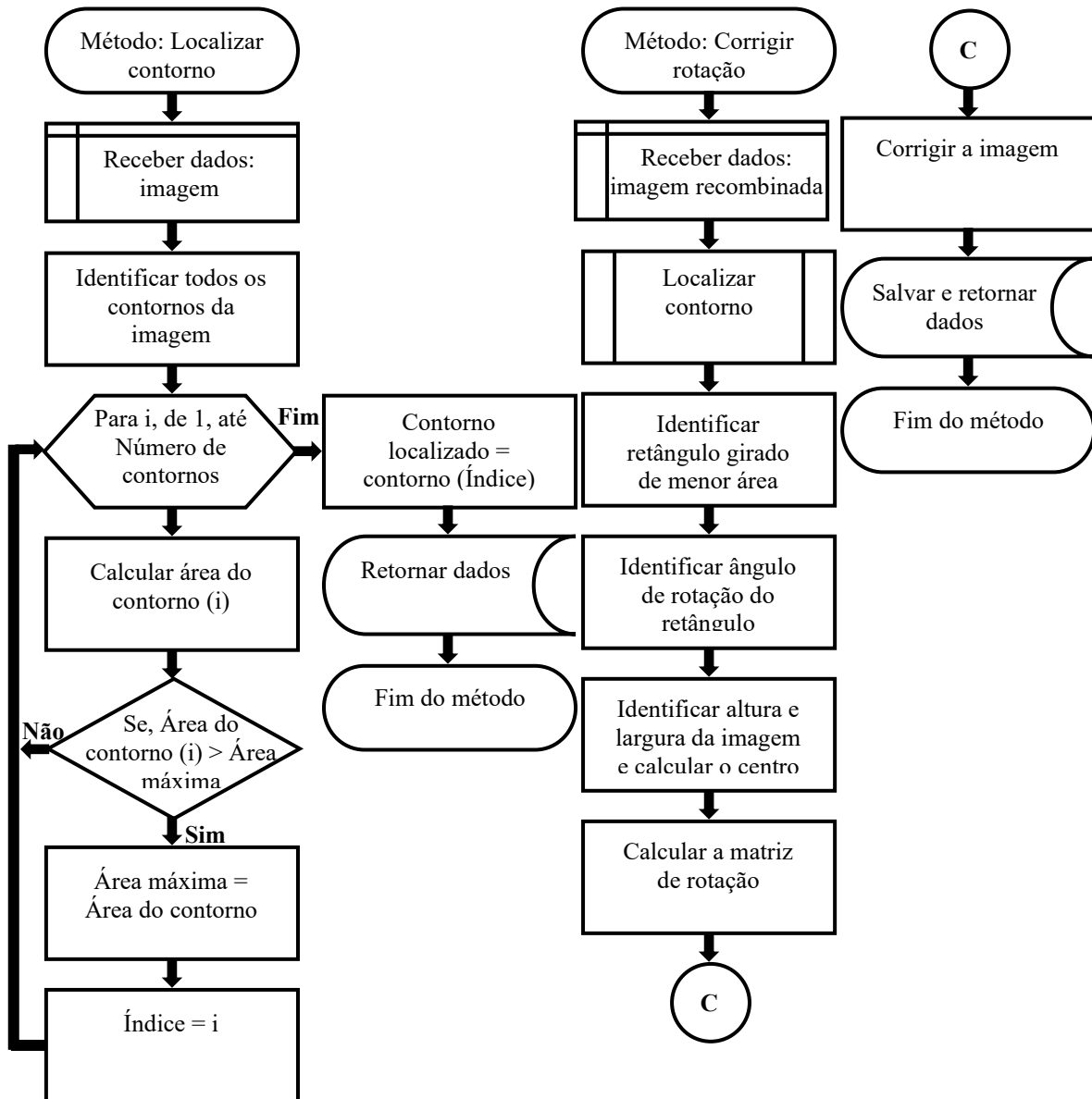
APÊNDICE E - MÉTODOS DO ALGORITMO

Figura 45 - Métodos algoritmo grupo 1.



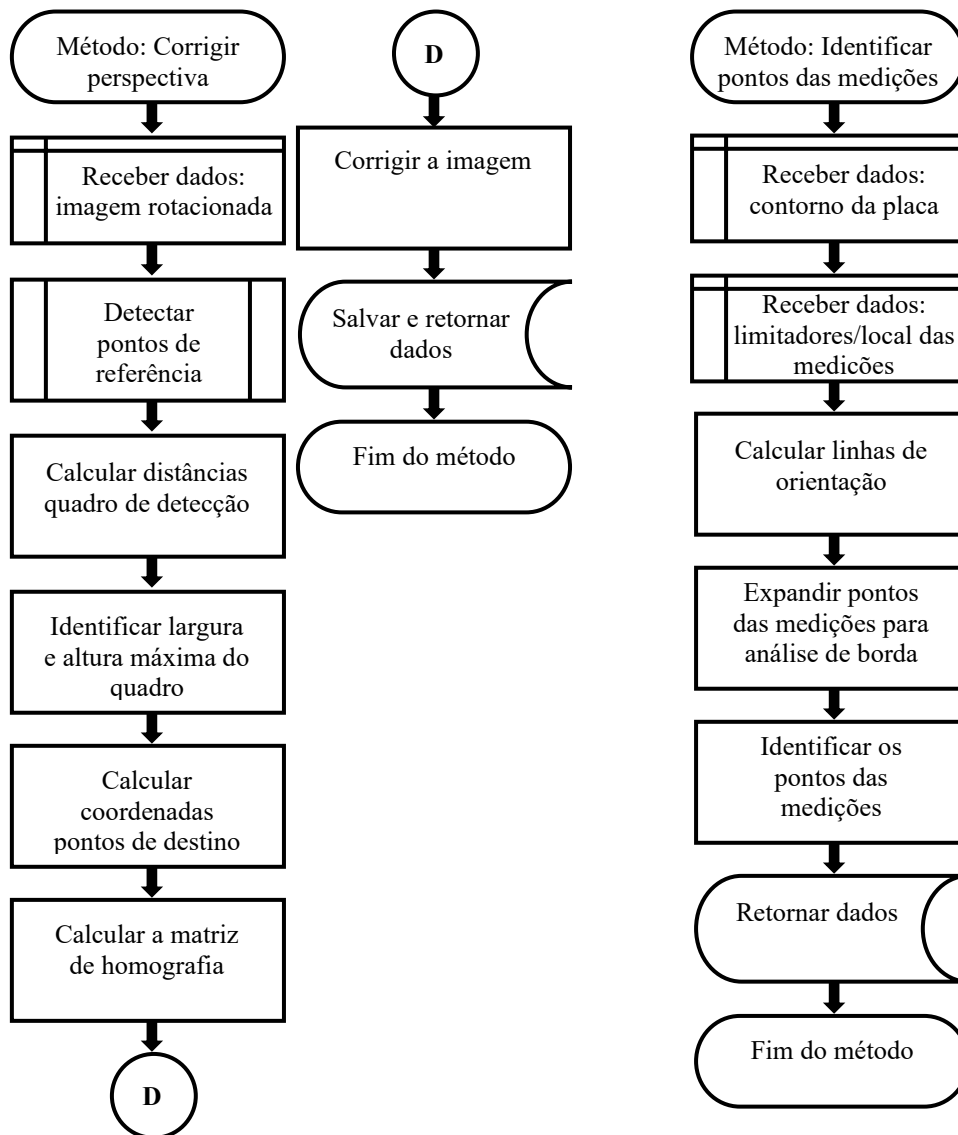
Fonte: Autor (2023).

Figura 46 - Métodos algoritmo grupo 2.



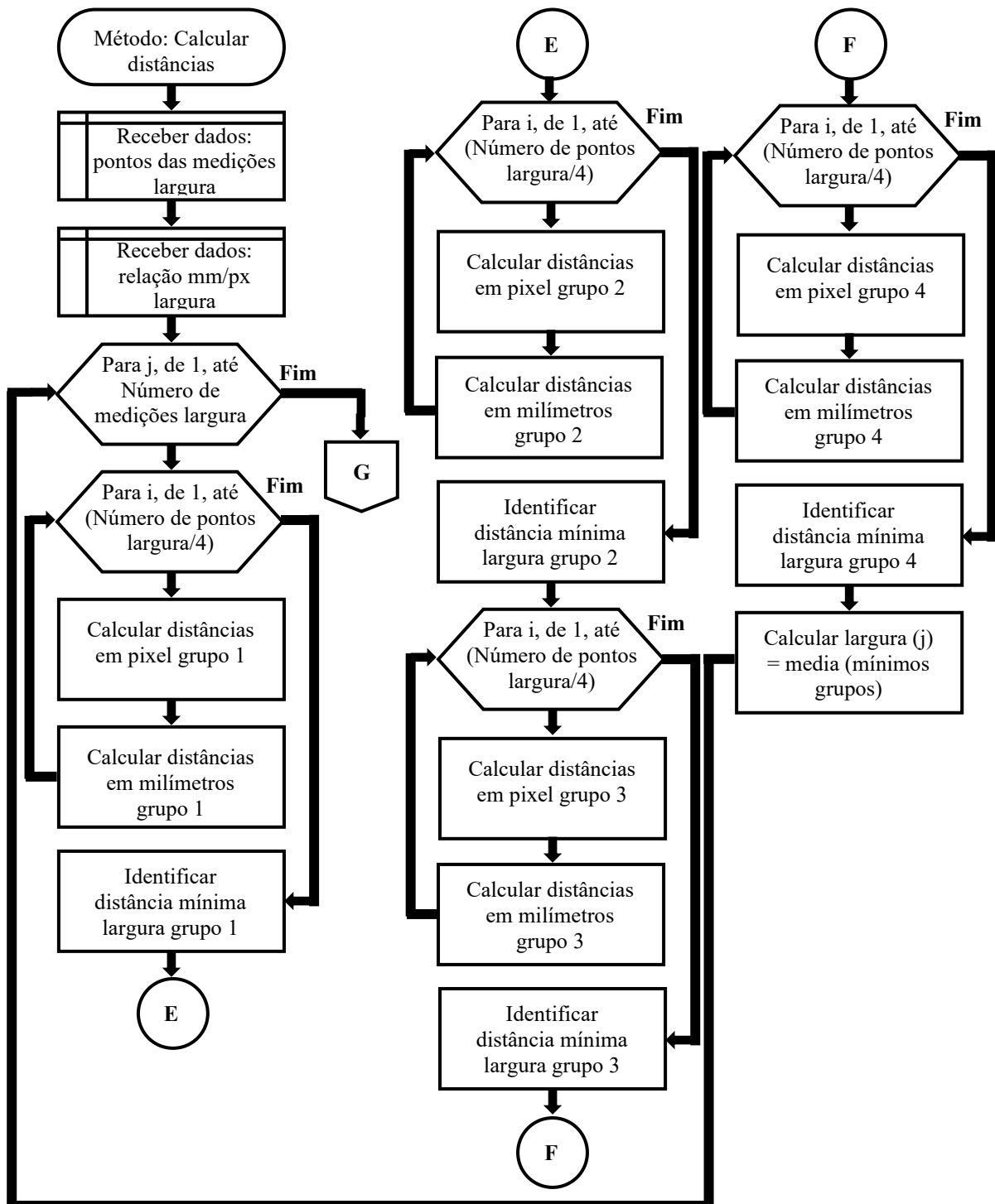
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 - Métodos algoritmo grupo 3.



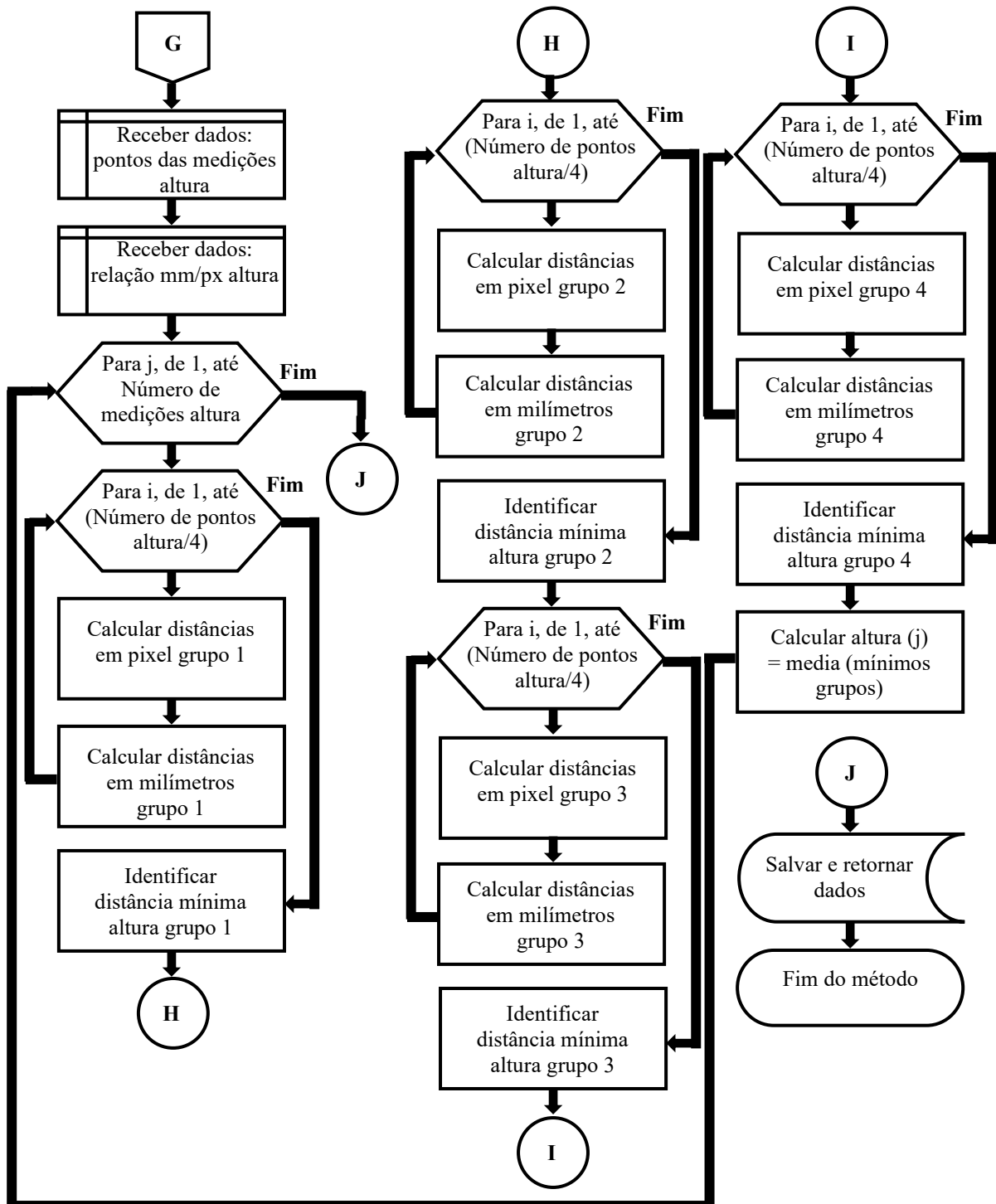
Fonte: Autor (2023).

Figura 48 - Métodos algoritmo grupo 4 parte 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 49 - Métodos algoritmo grupo 4 parte 2.



Fonte: Autor (2023).

APÊNDICE F - QUALIDADE DA CÂMERA

Conforme citado anteriormente a qualidade da câmera é um dos principais limitadores da metodologia proposta, em especial devido as distorções na imagem digital. Para que se estimasse com exatidão a câmera necessária para que tal metodologia obtivesse êxito, do ponto de vista do resultado técnico para a aplicação, seria necessária uma especificação correspondente ao nível de distorção presente nas capturas, tanto para o *smartphone* utilizado, quanto para demais modelos do mercado.

Peltoketo (2016) publicou a tese intitulada “*Benchmarking of Mobile Phone Cameras*”, tendo entre seus objetivos introduzir um sistema de *benchmarking* (avaliação comparativa) abrangente que possa ser usado para comparar e classificar câmeras de telefones celulares. Este autor cita este *benchmarking* como sendo uma abordagem para validar e comparar sistemas completos de câmeras e ajudar o usuário final a selecionar a melhor câmera para seus propósitos.

Peltoketo (2016) relata que várias organizações desenvolveram independentemente a sua própria padronização de qualidade de imagem e que diferentes métricas e abordagens de medição geram resultados diversos que dificultam a comparação entre os padrões e, cita ainda, que a entidade de padronização de imagens digitais mais utilizada é provavelmente o conjunto de padrões da ISO (*International Organization for Standardization*, ou Organização Internacional de Padronização).

A norma ISO 17850 (2015) especifica um protocolo para medições de distorção geométrica total (incluindo lente e processamento de sinal), sendo aplicável à medição de câmeras digitais, incluindo telefones com câmera. Segundo esta norma a distorção geométrica deriva basicamente da variação da ampliação no campo da imagem, sendo assim, se este fenômeno ocorre em uma imagem, significa que uma estrutura regular em um objeto, não parece ser regular na imagem tirada com a câmera.

Para a execução destes ensaios é necessária a utilização de equipamentos próprios, a aquisição da norma de forma completa, entre outros materiais, sendo que esta condição laboratorial específica não foi acessível ao autor desta pesquisa. Além disso, uma vez estimado o nível de qualidade da câmera que foi aplicada neste trabalho, deve-se conhecer o valor obtido

pelo mesmo procedimento de *benchmarking*, em outros modelos, para assim realizar a indicação.

Não foram encontradas informações, como por exemplo resultados de ensaios padronizados, nas documentações fornecidas pela fabricante do *smartphone* Samsung Galaxy A30, no que se refere a avaliação da distorção geométrica do conjunto de câmeras. Esta não é uma prática usual na época em que se desenvolve esta pesquisa.

Existem no mercado empresas dedicadas a aplicação de *benchmarking* em equipamentos como *smartphones*, a exemplo da DXOMARK (2023), especializada na avaliação de qualidade de imagem desde 2003. Esta possui um protocolo próprio (*DXOMARK Camera*, introduzido em 2012) para a avaliação de câmeras de *smartphones*. Neste protocolo, 50% da pontuação é baseada na componente “foto”, sendo 22% desta composta por “artefatos”, que incluem distorção da imagem, entre outros fatores.

No site oficial desta empresa é possível visualizar uma classificação de *smartphones*, incluindo a pontuação total do item “câmera”, entretanto, o aparelho utilizado nesta pesquisa não consta nesta lista quando da elaboração deste trabalho, bem como não pode ser verificada a pontuação específica referente a componente de distorção.

Em suma, não foi possível estimar a partir de qual nível de qualidade de câmera a metodologia proposta nesta pesquisa atenderia a aplicação, do ponto de vista dos resultados técnicos de exatidão, sendo necessária a realização de ensaios futuros com *smartphones* de categorias superiores.