

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM MECATRÔNICA

MAYNE FRANCIELI GONÇALVES

INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO A UM ROBÔ MANIPULADOR PARA
CARACTERIZAÇÃO DE FORMAS TRIDIMENSIONAIS

FLORIANÓPOLIS
2018

MAYNE FRANCIELI GONÇALVES

INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO A UM ROBÔ MANIPULADOR PARA
CARACTERIZAÇÃO DE FORMAS TRIDIMENSIONAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina para obtenção do título de Mestra em Mecatrônica.

Orientador: Prof.^o Dr.^o Maurício Edgar Stivanello

FLORIANÓPOLIS
2018

CDD 629.8
G635i

Gonçalves, Mayne Francieli
Integração de um sistema de visão a um robô manipulador para
caracterização de formas tridimensionais [DIS] / Mayne Francieli
Gonçalves; orientação de Maurício Edgar Stivanello – Florianópolis, 2018.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Visão computacional. 2. Nuvem de pontos. 3. Automação robótica. I.
Stivanello, Maurício Edgar. II. Título.

INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE VISÃO A UM ROBÔ MANIPULADOR PARA
CARACTERIZAÇÃO DE FORMAS TRIDIMENSIONAIS


MAYNE FRANCIELI GONÇALVES

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 10 de agosto de 2018.




Prof.º Maurício Edgar Stivanello, Dr.
Orientador

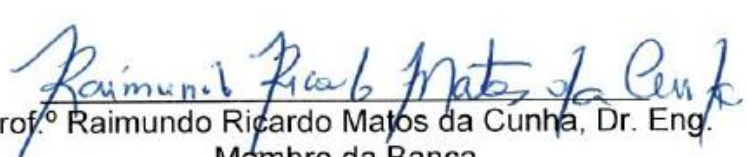


Prof.ª Cynthia Beatriz Scheffer Dutra, Dra. Eng.
Coordenadora do Curso


BANCA EXAMINADORA:



Prof.º Mario Lucio Roloff, Dr. Eng.
Membro da Banca



Prof.º Raimundo Ricardo Matos da Cunha, Dr. Eng.
Membro da Banca



Prof.º Cassiano Bonin, M. Eng.
Membro da Banca

Aos meus pais, Luiz Osni e Terezinha, por todo apoio e amor que me ofereceram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que me concedeu a vida, abençoou meu caminho e me protegeu durante todos os momentos. Por ter guiado e me protegido durante todas as longas viagens para a realização deste sonho.

Agradeço imensamente aos meus pais, Luiz Osni e Terezinha, por sempre acreditarem em mim e nos meus sonhos. Obrigada por todo apoio e amor incondicional.

As minhas irmãs e sobrinhos por todo apoio nesta longa caminhada, em especial a Márcia e a Yessamin por me acolherem em seu lar com tanto amor e carinho.

Agradeço ao professor e orientador Maurício Edgar Stivanello, por todo apoio e compreensão no desenvolvimento deste trabalho.

Ao graduando Lucas Ricardo Zanette, pelo apoio e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Meu agradecimento especial ao colega de profissão e amigo, Eng^o. Eduardo Danese, pelo compartilhamento de conhecimentos e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos e professores da UNIARP pelo apoio, em especial aos amigos e engenheiros, Fabrício Páris, Everaldo Cesar de Castro, Antonio Pedro Tessaro e Julio Cesar Carvalho, pelo apoio e incentivo para cursar o mestrado.

Meu agradecimento aos colegas e professores do Mestrado em Mecatrônica do IFSC, por toda troca de conhecimentos e experiências nestes últimos anos.

A UNIEDU/FUMDES pela bolsa de estudo concedida para a realização do mestrado.

A FAPESC por conceder um projeto na chamada 09/2015 liberando recursos para aquisição de equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

"Aprender é a única coisa que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende".

Leonardo Da Vinci

RESUMO

A robótica e os sistemas de visão computacional vêm conquistando espaço no aprimoramento de novas tecnologias. Este cenário faz com que a integração entre essas duas áreas seja explorada. Neste contexto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de caracterização da forma tridimensional de peças a serem soldadas, integrado a um braço robótico e empregando tecnologias abertas. Para tal, foi realizado o estudo da técnica de triangulação laser e de trabalhos correlatos. Para realizar a integração do sistema de visão computacional com um braço robótico foi desenvolvido um projeto que contempla a área mecânica, eletroeletrônica e de software. Os resultados foram avaliados e comparados a um sistema comercial. Os resultados apresentados caracterizam a forma tridimensional de peças, bem como possibilitam a extração das coordenadas que compõe a junta de soldagem. Os resultados obtidos demonstram a efetividade da utilização de tecnologias abertas para a aplicação de visão de máquina. Bem como, a eficácia de integração da arquitetura proposta acoplada a um braço robótico.

Palavras-chave: Visão computacional; Nuvem de pontos; Automação robótica.

ABSTRACT

Robotics and computer vision systems are gaining ground in enhancing new technologies. This scenario makes the integration between these two areas explored. In this context, the present work presents the development of a system of characterization of the three-dimensional shape of parts to be welded, integrated to a robotic arm and using open technologies. For that, the study of the technique of laser triangulation and related works was carried out. In order to perform the integration of the computer vision system with a robotic arm, a project was developed that contemplates the mechanical, electrical and electronic and software areas. The results were evaluated and compared to a commercial system. The results presented characterize the three-dimensional shape of parts, as well as make it possible to extract the coordinates that make up the weld joint. The results obtained demonstrate the effectiveness of the use of open technologies for the application of machine vision. As well as, the integration efficiency of the proposed architecture coupled to a robotic arm.

Keywords: Computer vision; Cloud of points; Robotic automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Percentual mundial de aplicações de robôs do primeiro trimestre de 2014 – RIA	16
Figura 02: Etapas de um sistema de processamento de imagens.	21
Figura 03: Sistemas de coordenadas para correspondência de pontos no espaço do objeto na imagem	26
Figura 04: Padrões de calibração bidimensionais comumente empregados	27
Figura 05: Imagem ideal (a), imagens distorcidas (b) e (c).....	28
Figura 06: Mapeamento entre planos	29
Figura 07: Geometria para um sistema de triangulação ativa.....	30
Figura 08: Histograma de intensidade dividido por um único limiar T.	33
Figura 09: Processo de limiarização.	34
Figura 10: Configuração básica do sistema	43
Figura 11: Fluxograma do Sistema.....	44
Figura 12: Protótipo experimental	46
Figura 13: Gabarito de Calibração do Protótipo.....	46
Figura 14: Peça de madeira	47
Figura 15: Visualização da nuvem de pontos.	48
Figura 16: Coordenadas X, Y e Z	48
Figura 17: Chapa de aço 1010.....	49
Figura 18: Refletividade da chapa de aço 1010	49
Figura 19: Nuvem de pontos da chapa de aço	50
Figura 20: Projeto do Suporte mecânico.....	52
Figura 21: Suporte para robô antropomorfo 6 GDL Yaskawa	52
Figura 22: Estrutura embarcada no braço robótico	53
Figura 23: Sistema eletroeletrônico de comunicação.....	54
Figura 24: Calibração.....	56
Figura 25: Captura de imagem sem laser.....	57
Figura 26: Captura com o laser.....	57
Figura 27: Linha do laser	58
Figura 28: Visualização nuvem de pontos	58
Figura 29: Mensurandos.....	59
Figura 30: Aplicação do revelador	60
Figura 31: Uso do revelador: (a) Peça sem revelador; (b) Peça com revelador	61
Figura 32: Cenário de medição	61
Figura 33: Nuvens de pontos	62
Figura 34: Objeto plano e plano ideal.....	65
Figura 35: Imagens do processo de medição no Scanner 3D.....	66
Figura 36: Nuvens de medição para comparação da Peça 1.....	67
Figura 37: Nuvens de medição para comparação da Peça 2.....	68
Figura 38: Nuvens de medição para comparação da Peça 3.....	69
Figura 39: Obtenção das coordenadas de interesse	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Comparação de medições peça 1a – côncava	63
Tabela 02: Diferença entre as nuvens de pontos	64
Tabela 03: Distâncias Ponto – Plano (mm)	65
Tabela 04: Distâncias entre nuvens dos sistemas comparados.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Bidimensional

3D - Tridimensional

GDL – Graus de liberdade

GND – *Ground* (0V)

I/O - Entrada/Saída

LED's – Diodo Emissor de Luz

mm – Milímetro

NPN – Negativo Positivo Negativo

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

RIA – Associação Industrial de Robótica

LISTA DE SIMBOLOS

\bar{x} – Distância média

σ – Desvio Padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 ROBÔ	19
2.2 SISTEMAS DE VISÃO DE MÁQUINA	20
2.2.1 Imagem	22
2.2.2 Câmeras	23
2.2.2.1 Descrição de aspectos gerais de câmeras	23
2.2.2.2 Calibração de câmeras	25
2.2.3 Triangulação Ativa por Projeção de Plano de Luz	29
2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	31
2.3.1 Segmentação	31
2.4 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA	34
2.5 COMUNICAÇÃO	35
2.5.1 Entradas/Saídas	36
2.5.2 Comunicação Serial	36
2.6 <i>CLOUD COMPARE</i>	38
2.7 SISTEMAS CORRELATOS	38
3 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO INTEGRADO A UM BRAÇO ROBÓTICO	41
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO E LEVANTAMENTO DOS REQUISITOS	41
3.2 DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DA ARQUITETURA SELECIONADA	42
3.3 TESTES PRELIMINARES PARA VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA	45
3.4 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO FINAL DO SISTEMA	50
3.4.1 Projeto Mecânico Hardware	51
3.4.2 Projeto Eletroeletrônico	53
3.4.3 Projeto do Software	55
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
4.1 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES	62
4.2 DISPERSÃO DE PONTOS	64
4.3 COMPARAÇÃO DE MEDIÇÃO COM SISTEMA DE REFERÊNCIA	66

4.4 IDENTIFICAÇÃO DA JUNTA DE SOLDAGEM.....	70
5 CONCLUSÕES E PERPECTIVAS FUTURAS	72
REFERÊNCIAS.....	75
APÊNCIDE A - Diagrama Elétrico Interface com o Robô Yaskawa	78
APÊNCIDE B – Trilhas e componentes placa eletrônica de interface	79
APÊNDICE C – Nuvem de pontos de peça metálica sem tratamento	80
ANEXO A – Especificações da exatidão	82
ANEXO B – Especificações do escâner RS1	83

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de avanço tecnológico e a necessidade de aperfeiçoamento nos processos industriais, a robótica e os sistemas de visão computacional vêm conquistando espaço. No contexto atual, a indústria 4.0 vem gerando a necessidade de integração entre os sistemas. Trata-se de uma indústria inteligente que atua de maneira autônoma.

Uma das áreas que a robótica e os sistemas de visão computacional podem atuar é o seguimento de soldagem, sendo este um dos principais processos utilizados na união permanente de peças metálicas. O processo de soldagem GMAW (*gas metal arc welding*) é o que apresenta maior utilização, neste processo a trajetória a ser executada pelo robô depende de um programa pré-concebido em parâmetros fixos. Contudo, sabe-se que para executar esta trajetória é necessária a programação dos movimentos do robô. Esta programação quando realizada por um operador humano pode torna-se um processo tedioso e sujeito a erros, o que causa a demanda de automatização destas tarefas com parâmetros variáveis e não apenas parâmetros fixos.

É neste contexto que os sistemas de visão podem ser aplicados. A identificação dos pontos que compõe o caminho de uma junta de solda é fundamental para que possam ser aplicados sistemas autônomos de soldagem. Dentro desta realidade, o presente trabalho busca a obtenção da nuvem de pontos tridimensional de um objeto e a identificação do caminho a ser soldado, sendo este processo realizado através da seleção dos pontos desejados por meio de um software de visualização de nuvens de pontos 3D, o *CloudCompare*.

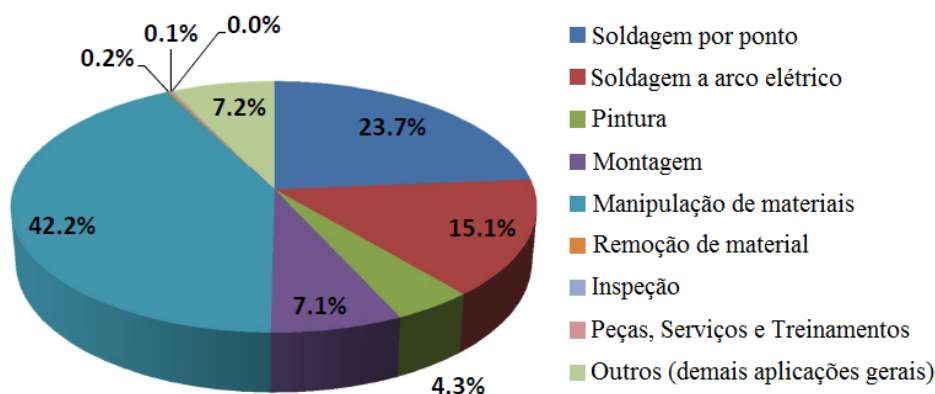
Cabe destacar que neste trabalho foi realizado desde a seleção dos componentes e técnicas a serem utilizados, até a identificação das coordenadas que compõe a junta destinada ao processo de soldagem. Englobando neste cenário o desenvolvimento do hardware e do software de caracterização da nuvem de pontos. Ficando para implementações futuras, a transferência das coordenadas para o controlador do braço robótico, aplicando essas variáveis em um programa padrão adaptável e a execução do cordão de solda por meio da geração de trajetória.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A robotização de processos industriais vem aumentando ano após ano. Em 2010 a ONU (Organização das Nações Unidas) já divulgava que aproximadamente 85 mil robôs eram inseridos anualmente nos processos industriais em todo o mundo.

Dados da Associação de Indústrias de Robôs (*Robot Industries Association* - RIA) referente ao primeiro trimestre de 2014, apontam que a utilização de robôs industriais em processo de solda por ponto está entre as aplicações de robôs mais utilizadas mundialmente, correspondendo a 23,7%, e solda a arco elétrico 15,1%, totalizando em 38,8%, o que demonstra o grande volume de robôs destinados a automação deste processo. Conforme ilustrado no gráfico da Figura 01.

Figura 01: Percentual mundial de aplicações de robôs do primeiro trimestre de 2014 – RIA.



Fonte: (RIA, 2014).

Visando aperfeiçoar os sistemas de soldagem robotizada, tem-se como alternativa a utilização de sistemas de caracterização tridimensional de peças. Para tal, faz-se necessário aplicar conceitos de visão de máquina, estes se destacam como uma alternativa disponível para auxiliar a resolução de problemas complexos, pois a visão de máquina é capaz de imitar a cognição humana na tomada de decisões por meio de algoritmos que processam as informações obtidas da imagem. Este processo consiste em um conjunto de técnicas para captura, representação e transformação de imagens com auxílio computacional, apresentando como resultado a interpretação automática que associada ao controle de robôs minimiza a intervenção humana (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Em 2015, um relatório publicado pela Organização Mundial da Propriedade Intelectual (OMPI), ressalta o desenvolvimento de inovações nas três tecnologias com potencial de impulsionar o crescimento econômico, sendo elas a impressão 3D, a nanotecnologia e a robótica.

Neste cenário de crescimento das aplicações de robotização e visão computacional, surgiu a motivação para a realização deste trabalho, sendo o mesmo o desenvolvimento da integração de um sistema de visão a um robô manipulador para caracterização de formas tridimensionais. Sendo ainda, motivado pelo fato dos sistemas comerciais de visão de máquina disponíveis no mercado serem de alto custo agregado para sua implementação e fechados, desta forma não possuem muitas possibilidades de adequações. Sendo que durante o ano de 2014 em uma visita a uma empresa no Rio Grande do Sul que trabalha com a instalação de sistemas de soldagem robotizada, ficou claramente visível a necessidade de desenvolvimento de aplicações nacionais com tecnologias abertas. Pois só havia disponibilidade de aquisição de sistemas fechados, não apresentando possibilidade de modificações para melhor atender as demandas dos processos de maneira particular.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver um sistema de caracterização de forma tridimensional de peças a serem soldadas, integrado a um braço robótico e empregando tecnologias abertas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) Estudar sistemas de visão computacional e trabalhos correlatos;
- b) Desenvolver um sistema de visão para captura e processamento da forma tridimensional de peças a serem soldadas;
- c) Integrar o sistema de visão desenvolvido a um braço robótico;

- d) Validar o sistema desenvolvido através da medição e avaliação de peças com diferentes formatos e comparação com um sistema comercial.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo dois apresenta o referencial teórico que fundamenta este trabalho. É abordado sobre sistemas de visão computacional, componentes e técnicas de processamento de imagem. No capítulo três é descrito o desenvolvimento de um sistema de medição integrado a um braço robótico antropomorfo. É detalhado o projeto e implementação nas três áreas que compõe a integração, sendo eles o projeto mecânico, eletroeletrônico e de software.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pela utilização do sistema desenvolvido na estimação da forma tridimensional de diferentes peças. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados assuntos importantes ao desenvolvimento de um sistema de visão computacional integrado a um braço robótico, cuja aplicação é voltada para a aquisição da imagem tridimensional de chapas de aço a serem soldadas. Com o sistema descrito é obtida uma nuvem de pontos que caracteriza a forma tridimensional das chapas, e pelo seu processamento é possível obter as coordenadas do caminho da junta de solda a ser executada por um robô num processo de soldagem MIG/MAG.

Desta forma, no capítulo são abordados os conceitos dos principais componentes de um sistema de visão computacional e de um sistema robótico, bem como são realizadas explanações sobre a técnica de triangulação laser e sobre os sistemas de comunicação.

2.1 ROBÔ

Silveira e Santos (1998), citam em seu livro que de acordo com a Associação Industrial de Robótica, a *Robotic Industrial Association* – RIA, robô é um “manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas”.

A norma ISO 10218, item 3.10, apresenta uma definição mais completa para o termo robô, como sendo: “uma máquina manipuladora, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial”.

Para Pazos (2002), pode-se definir robô como uma máquina automática programável, ou seja, uma máquina onde a energia é proveniente de uma fonte externa e que o trabalho depende de instruções previamente dadas pelo operador, independente de qual meio sejam utilizados para introduzir estas instruções na máquina e o formato delas. Previamente estas instruções são denominadas como programa.

2.2 SISTEMAS DE VISÃO DE MÁQUINA

A visão de máquina corresponde a um sistema que trata da aquisição, processamento e análise da imagem, seguida da interpretação dos dados processados digitalmente pelo computador para alguma aplicação. É uma tecnologia em crescimento e possui duas classificações: 2D ou 3D. Os sistemas que interpretam a cena como uma imagem 2D são denominados bidimensionais. E quando a cena é analisada em 3D tem-se um sistema tridimensional (GROOVER, 2011).

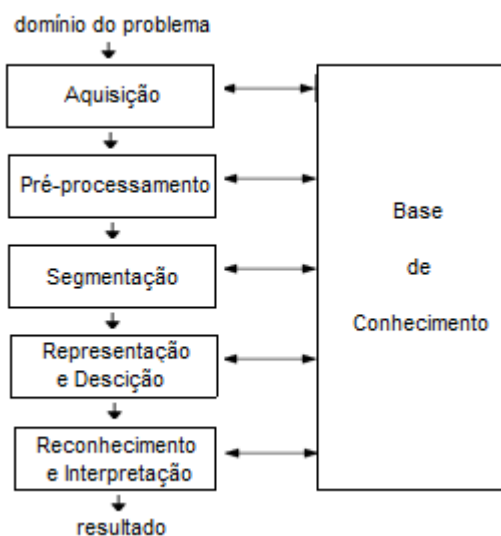
Segundo Grassi (2005), a visão de máquina ou de computador também é conhecida como visão robótica, a qual corresponde ao processo de extração, caracterização e interpretação das informações de imagens capturadas de um mundo tridimensional.

Para Groover (2011, p. 549), a visão de máquina “é uma tecnologia em crescimento, com a principal aplicação na inspeção industrial”.

O avanço progressivo da tecnologia digital, e o desenvolvimento de novos algoritmos de programação, buscam modelar a cognição humana e a habilidade de tomada de decisões com base em informações extraídas de uma imagem, viabilizando assim aplicações de visão computacional nas mais diversas áreas (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Pedrini e Schwartz (2008) e Gonzalez e Woods (2010), destacam que é necessário obter o conhecimento sobre as metodologias aplicadas no processamento de imagens para os mais diversos fins. Estas metodologias constituem um conjunto de etapas sucessivas, sendo: aquisição; pré-processamento; segmentação; representação e descrição; reconhecimento e interpretação, conforme representado na Figura 02.

Figura 02: Etapas de um sistema de processamento de imagens.



Fonte: (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008)

Fu et al apud Grassi (2005), também acredita que estes sistemas podem ser subdivididos em seis áreas principais, os quais ele nomeia como: (1) sensoriamento, (2) pré-processamento, (3) segmentação, (4) descrição, (5) reconhecimento e (6) interpretação.

Descrevendo brevemente cada uma das áreas tem-se que o sensoriamento corresponde ao procedimento de captar uma determinada imagem. Na sequência temos o pré-processamento, esta etapa tem por finalidade o aprimoramento do nível de detalhes da imagem, por meio de técnicas de manipulação do realce de contraste, remoção de ruídos e isolamento de regiões de interesse, bem como a obtenção de sucesso nas etapas que a sucedem, como por exemplo, no processo de segmentação (FORESTI, 2006; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Já ao processo que segmenta uma imagem em objetos de interesse é dado o nome de segmentação. Grande parte dos algoritmos de segmentação baseia-se nas propriedades fundamentais de valores de níveis de cinza (intensidade), que visam à detecção de contornos de objetos e similaridades (regiões) na imagem. A segmentação de imagens monocromáticas é fundamentada na mudança brusca de valores de níveis de cinza, que geralmente está associada ao contorno de objetos (FORESTI, 2006; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ; WOODS, 2010). Na sequência a computação de detalhes favoráveis para caracterizar os tipos de objetos e diferenciá-los entre si ganha espaço por meio da descrição. A técnica que distingue esses objetos é denominada reconhecimento. E como etapa final tem-se a

interpretação que compreende um conjunto de técnicas com o intuito de extrair uma informação de mais alto nível sobre os objetos reconhecidos, importante ao domínio do problema para qual o sistema foi desenvolvido.

2.2.1 Imagem

Grassi (2005), refere-se à imagem como uma representação de uma cena real, podendo esta ser em preto e branco, a cores, em forma impressa ou digital. As imagens impressas possibilitam reprodução tanto a cores quanto em tons de cinza ou ainda por uma fonte simples de tinta.

Segundo Solomon e Breckon (2013,) pode-se considerar uma imagem digital como uma representação discreta de dados, responsáveis pelo processamento de informações espaciais (*layout*) e de intensidade (cor).

As cenas reais são todas tridimensionais, entretanto as imagens podem ser bidimensionais ou tridimensionais. Quando não é necessário determinar a profundidade da cena são utilizadas imagens bidimensionais. Já quando é necessário captar a medida de profundidade, movimento, posicionamento relativo e navegação, é necessário trabalhar com imagens tridimensionais (GRASSI, 2005).

Solomon e Breckon (2013), descrevem que há quatro tipos de dados de imagem, sendo as mesmas descritas na sequência:

- a) Imagens binárias: Classificam-se como imagem binária, matrizes ou conjuntos bidimensionais que armazenam um valor numérico do conjunto a cada pixel de imagem. Nestas imagens, é permitido somente 0 e 1, logo, podem ser representadas por uma simples sequência de bits.
- b) Imagens de intensidade ou escala de cinza: São conjuntos ou matrizes que armazenam um valor numérico a cada pixel que representam a intensidade em um ponto. O intervalo de valores assumido em cada pixel é limitado pela resolução de bit da imagem.
- c) Imagens RGB ou de cores reais: Assim como as imagens citadas anteriormente, são matrizes ou conjuntos que armazenam um valor numérico a cada pixel, neste caso, são matrizes 3D que conceitualmente são três planos 2D distintos, onde cada um corresponde a uma das componentes vermelho, verde e azul (RGB) do canal de imagem.

d) Imagens em ponto flutuante: Esse tipo de imagem não armazena valores inteiros de cores, mas sim, em ponto flutuante, que representa a intensidade, isso em um dado intervalo que é estabelecido pela precisão de ponto flutuante da resolução de bit da imagem.

Segundo Gonzales e Woods (2010), a aquisição de imagens é o primeiro processo de um sistema de visão de máquina. Para Marques Filho e Vieira Neto (1999), a aquisição de uma imagem corresponde ao processo de conversão de uma cena real tridimensional em uma imagem analógica.

Para Groover (2011, p. 550), “a aquisição e a digitalização de imagens são alcançadas com uma câmera de vídeo e um sistema de digitalização para armazenar os dados de imagens para análise posterior”.

Ainda de acordo com Groover (2011), uma cena é capturada por uma câmera e a área de visão é dividida em uma matriz de elementos de imagem (pixels). Obtendo dessa forma uma imagem onde cada elemento tem um valor proporcional à intensidade de luz da região em que está localizado na cena. Posteriormente, por meio de um conversor analógico-digital é realizada a conversão do valor de intensidade de cada pixel em um valor digital, sendo que, cada grupo destes valores dos pixels digitalizados refere-se como um quadro da imagem.

2.2.2 Câmeras

As câmeras correspondem ao componente principal empregado em sistemas de visão. Nesta seção são apresentados aspectos tecnológicos utilizados, assim como são descritas técnicas de calibração.

2.2.2.1 Descrição de aspectos gerais de câmeras

Uma câmera é um dispositivo de captura de imagens que projeta o ambiente 3D (cena) em uma representação 2D (imagem) (SOLOMON; BRECKON, 2013). Segundo Ginani (2008), as câmeras são responsáveis por capturar as imagens que serão manipuladas pelo processamento de imagens visando à obtenção dos dados pretendidos.

As câmeras podem ser divididas em analógicas e digitais. Um exemplo de câmera analógica é a câmera vidicon. Esta câmera transforma a cena em um sinal

analógico que pode ser uma corrente ou tensão elétrica variável versus tempo, tal sinal pode ser armazenado, transmitido, digitalizado ou reconstruído formando uma imagem (GRASSI, 2005).

As câmeras digitais possuem sensores de imagem, onde a luz é focalizada por uma lente ou por um conjunto de lentes e incide sobre o sensor de imagem (CCD/CMOS). Estes sensores de imagem são os componentes responsáveis por converter luz em carga elétrica. Estes realizam o processamento da luz através de sinais elétricos, sendo que dois grandes grupos destes sensores se destacam nesta aplicação, sendo o CCD e o CMOS, *Charge Couple Device* e *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*, respectivamente. Inicialmente os únicos sensores de imagem utilizado em câmeras eram os CCDs. Isso ocorria porque os circuitos e a relação sinal-ruído em foto detecção utilizados na fabricação dos CMOS apresentavam um desempenho insuficiente. Entretanto na década 1990 ocorreu um avanço na fabricação dos sensores CMOS em relação à tecnologia do CCD, avanço esse devido ao controle do processo de fabricação CMOS, resultando em consumo de energia baixo, sistema de imageamento com tamanho reduzido e economia na produção ao ser utilizado a mesma linha de fabricação CMOS utilizada em outros componentes (FERNANDES, 2011).

O funcionamento do sensor CCD assemelha-se aos painéis de captação de energia solar. Os pixels são células sensíveis à luz. Estas células são capazes de gerar energia elétrica através da captação de luz incidente na superfície do sensor do pixel. Após uma exposição o sensor CCD transfere as cargas de seus pixels ao amplificador integrado de saída, desloca as cargas para ele e na sequência transfere para o conversor analógico-digital. Já o sensor CMOS apresenta uma matriz de diodos fotossensíveis. Cada pixel possui um diodo com seu próprio circuito individual integrado (pixel ativo). Isto proporciona que em um sensor CMOS cada pixel pode ser lido diretamente em um sistema de coordenadas (X, Y), ou seja, um pixel CMOS identifica um fóton diretamente, converte-o para uma tensão e transfere as informações diretamente para a saída, enquanto um pixel CCD sempre transfere uma carga (SOUZA; CARDOZA, 2012; FERNANDES, 2011).

As câmeras digitais podem apresentar o sinal de saída analógico ou digital. Quando o sinal de saída é digital já é compatível com os sistemas de computadores, entretanto quando o sinal é analógico é necessário realizar a conversão do mesmo

para digital. Este processo é realizado por uma placa denominada *frame grabber* (FERNANDES, 2011).

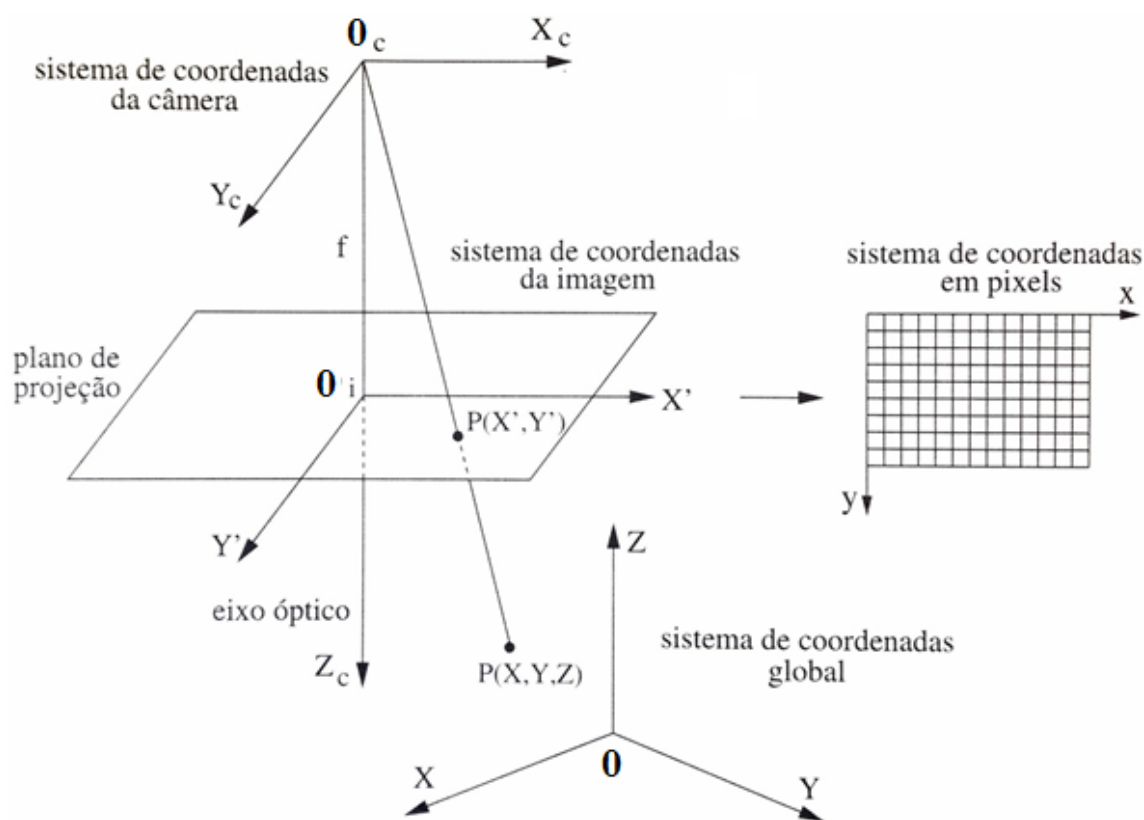
Ao tratar-se de câmeras digitais encontramos diversas resoluções, como *Video Graphics Array* (VGA) 640x480, *Hyper-Extended Graphics Array* (HXGA) 4096x3072, entre outras. O que determina a resolução de uma câmera é a quantidade de pixels presentes no CCD ou CMOS. Esses pixels são representados na forma de uma matriz $M \times N$ que representam uma amostragem de uma imagem bidimensional em duas direções ortogonais x e y . Cabe destacar, que quanto maior a resolução do sensor melhor será a imagem, pois a fração de erro, perda de nitidez ou ruído da imagem capturada será menor. Porém, para real aproveitamento da resolução deve se utilizar uma lente adequada, pois esta pode ser um limitante para a resolução adequada apresentada pela câmera (SOUZA; CARDOZA, 2012; FERNANDES, 2011).

2.2.2.2 Calibração de câmeras

O processo de calibração da câmera permite a dedução de informações 3D da cena a ser capturada visando convertê-la em uma imagem bidimensional. Este processo corresponde a uma necessidade de determinar os parâmetros geométricos internamente à câmera, associados à óptica (parâmetros intrínsecos), bem como a orientação da câmera e ao posicionamento tridimensional (parâmetros extrínsecos) em relação às coordenadas globais (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; PEREIRA JUNIOR, 2014).

“A correspondência entre pontos no espaço do objeto e pontos no plano da imagem pode ser expressa por meio da composição de transformações aplicadas sobre quatro sistemas de coordenadas” (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008, p. 382). O relacionamento entre os quatro sistemas de coordenadas é apresentado na Figura 03.

Figura 03: Sistemas de coordenadas para correspondência de pontos no espaço do objeto na imagem.



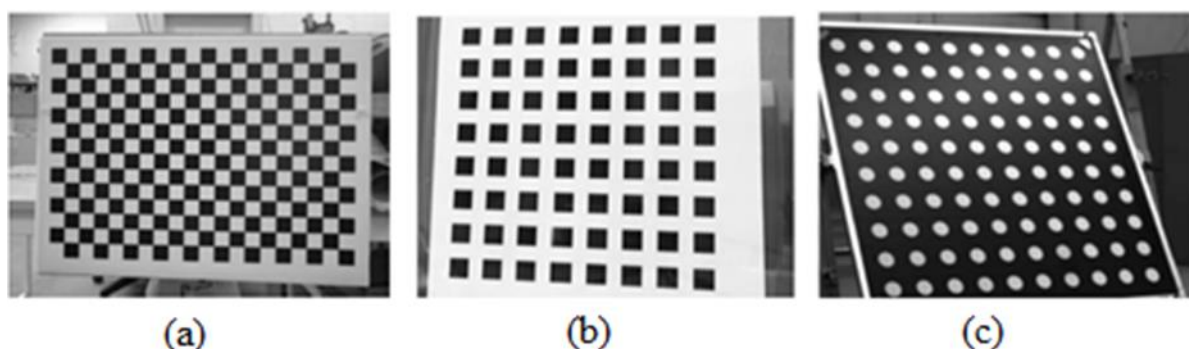
Fonte: (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

Pedrini e Schwartz (2008), classificam os quatro sistemas como: **sistema de coordenadas do mundo ou sistema de coordenadas global**, este corresponde a um sistema tridimensional empregado para descrever os objetos da cena. Neste sistema as coordenadas possuem origem no ponto O e são apontadas por X , Y e Z ; **sistema de coordenadas da imagem**, este é um sistema bidimensional com origem no ponto O_i (resultado da projeção ortográfica do ponto O_c no plano de projeção) e alocado no plano de projeção. X' e Y' são as denotações das coordenadas deste sistema; **sistema de coordenadas da câmera**, sistema com origem no centro óptico da câmera e com referência tridimensional. Suas coordenadas são referenciadas por (X_c, Y_c, Z_c) em função do ponto de origem O_c . Os eixos X e Y são paralelos às bordas da imagem a ser constituída no plano de projeção, enquanto Z é perpendicular a este plano; **sistema de coordenadas em pixels**, este sistema possui coordenadas bidimensionais expressas em pixels e denotadas por (x, y) , desta forma, a posição de um ponto na imagem é definida em função da grade de pixels. Neste sistema, a origem é o canto superior esquerdo da imagem.

Pereira Junior (2014), referencia em sua dissertação que os métodos de calibração de câmera podem ser divididos em duas categorias: convencionais e de autocalibração. O processo de autocalibração não precisa de um padrão de calibração específico. Este processo utiliza marcadores típicos da cena para realizar a calibração, tais como cantos e retas. Sua vantagem em relação ao método convencional é que a câmera pode ser calibrada de maneira on-line. Portanto a calibração pode ser feita enquanto o sistema de reconstrução tridimensional está em operação.

Os métodos convencionais caracterizam-se pela utilização de um padrão de calibração. Este padrão pode ser de duas ou três dimensões e deve possuir características conhecidas de maneira precisa. Ao utilizar o método convencional a calibração deve ser realizada antes de iniciar a operação do sistema de aquisição de imagem. Este método pode ser realizado com a implementação de padrões bidimensionais e tridimensionais, sendo que, os padrões tridimensionais comumente são compostos por dois ou três padrões bidimensionais dispostos entre si com uma determinada angulação. Um padrão bidimensional corresponde a uma imagem onde apresenta marcadores conhecidos, sendo os principais: (a) tipo tabuleiro de xadrez; (b) quadrados que não se interceptam; (c) marcadores circulares. Na Figura 04 são apresentados os três modelos de padrão bidimensional (PEREIRA JUNIOR, 2014).

Figura 04: Padrões de calibração bidimensionais comumente empregados



Fonte: Adaptado de (PEREIRA JUNIOR, 2014).

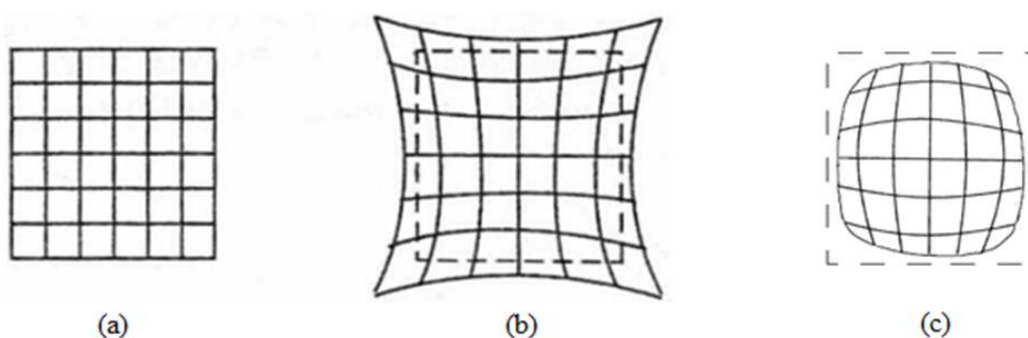
Pereira Junior (2014), destaca a importância fundamental do processo de calibração da câmera em sistemas de visão computacional, entretanto ressalta que a mesma é comprometida por diferentes distorções. A distorção radial, deslocamento do ponto principal e distorção de prisma fino são exemplos principais de distorção. O efeito da distorção gera um problema degradativo da imagem

digitalizada. Cabe destacar que estas distorções ocorrem principalmente por problemas na fabricação da lente, descentragem do eixo óptico e/ou montagem.

Em aplicações que requerem maior precisão, é necessário utilizar técnicas de compensação da distorção da lente, pois quando a distorção da lente não é negligenciável, a não compensação desta pode resultar em erro de calibração relevante (PEREIRA JUNIOR, 2014, p.50).

Na Figura 05 são apresentadas a imagem ideal (a) e duas formas distorcidas de uma imagem radial em distorção, quando se considera que o centro da imagem coincide com o centro da distorção. Nesta representação, (b) apresenta uma distorção do tipo almofada e (c) é apresentada uma distorção do tipo barril.

Figura 05: Imagem ideal (a), imagens distorcidas (b) e (c).

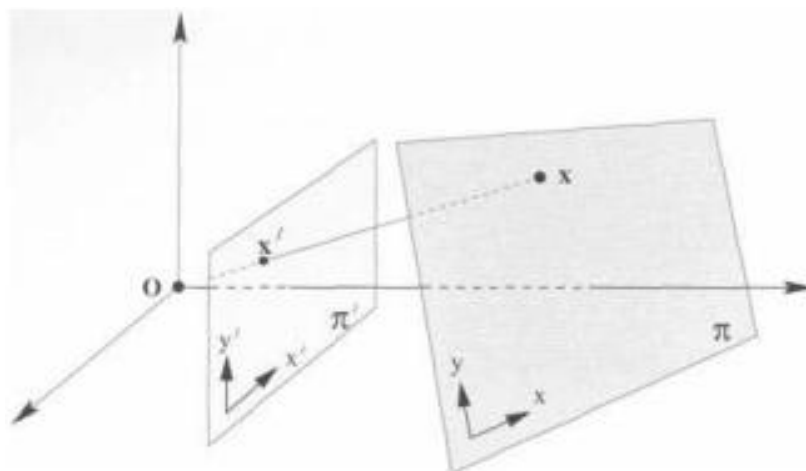


Fonte: Adaptado de (PEREIRA JUNIOR, 2014).

Tanto Pedrini e Schwartz (2008), quanto Pereira Junior (2014), destacam que dentre os principais métodos de calibração de câmera, pode-se citar o de Tsai (1987) e de Zhang (2000), sendo este muito utilizado por considerar a distorção da lente, no qual se utiliza um padrão bidimensional, realizando-se a captura de no mínimo três poses sem haver necessidade prévia de conhecer a posição tridimensional.

Uma maneira de calibrar planos é empregando a técnica de homografia. Esta técnica corresponde ao mapeamento de pontos de um plano para outro plano. Na Figura 06 é ilustrado este procedimento, sendo que o ponto x no plano π é mapeado para seu ponto correspondente x' no plano π' . “Este mapeamento linear de pontos pode ser escrito em coordenadas homogêneas como $x' = Hx$, em que H é a matriz de homografia que define o mapeamento de um conjunto de pontos correspondentes $x_i \leftrightarrow x'_i$ entre dois planos” (SANTOS, 2012, p. 5).

Figura 06: Mapeamento entre planos



Fonte: (SANTOS, 2012).

2.2.3 Triangulação Ativa por Projeção de Plano de Luz

A triangulação é um dos métodos mais comuns para medição de profundidade de pontos no espaço (SAN apud FERNANDES, 2005). Ainda de acordo com Fernandes (2005), triangulação ativa é uma técnica ativa de obtenção de características geométricas por meio da inserção de algum tipo de sinal no ambiente. Este sinal pode ser um laser, que nada mais é do que um amplificador de luz por emissão estimulada de radiação. Este dispositivo óptico produz um tipo de radiação eletromagnética bem definida, ou seja, possui frequência e relação de fase bem definidas e apresenta uma propagação com um feixe (GINANI, 2008).

Buschinelli (2007), referencia em sua dissertação que a triangulação laser é uma das técnicas mais utilizadas para medições 2D e 3D. Destaca ainda, que os sensores de triangulação laser (STL) são dispositivos de medição sem contato.

Segundo Gazziro (2011), a triangulação laser fundamenta-se pela projeção de luz estrutura sobre o elemento/objeto desejado, tratando-se da luz emitida por um laser, tem-se a projeção de uma linha vertical. Uma câmera realiza a captura desta projeção a uma distância que é calculada por geometria, desde que sejam conhecidas e informadas as posições do laser e da câmera.

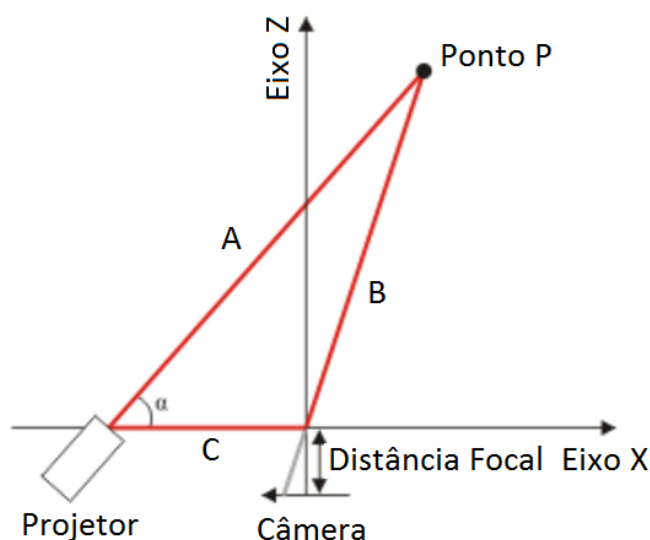
Fernandes (2005), ressalta que a projeção do laser é a projeção de um padrão de luz intenso, gerando deformação em relação à superfície, deformação esta que deve ser analisada pelo sistema para obtenção da forma tridimensional da

peça. Destaca-se como vantagem desta luz intensa a redução de interferência da presença de iluminação ambiente.

O emissor que projeta um plano laser é conhecido como sensor óptico do modelo “Folha de Luz”. Este emissor possibilita a medição bidimensional. A triangulação laser de maneira individual limita-se a medições 2D, entretanto ao movimentar o sensor em relação ao objeto de medição é possível obter dados tridimensionais do mensurando, e com isso pode ser construída a nuvem de pontos 3D do objeto (BUSCHINELLI, 2007).

Conhecendo a priori as relações espaciais da câmera e do laser e os parâmetros internos da câmera, é possível definir a posição de um ponto P no espaço Euclidiano por meio da aplicação da lei dos senos. Na Figura 07 é apresentada a geometria para um sistema de triangulação ativa. Onde os segmentos de reta A, B e C definem um triângulo cujo ângulo α , o comprimento de C que é a linha de base e a posição em que P é projetado na imagem capturada pela câmera são conhecidos (FERNANDES, 2005).

Figura 07: Geometria para um sistema de triangulação ativa



Fonte: Adaptado de (FERNANDES, 2005).

Um sistema de triangulação laser possui três funções: emissão, detecção e processamento. A emissão é realizada por um laser diodo que projeta um padrão de luz estruturada sobre a cena fazendo com que a luz incida sobre o mensurando. A etapa de detecção envolve normalmente conjuntos câmera-lente de acordo com as

especificidades da aplicação. O detector captura a imagem da linha laser sobre o objeto e encaminha para a unidade de processamento. Para medições bidimensionais e tridimensionais os detectores comumente são sensores CCD. A etapa de processamento é responsável pela correta interpretação da figura formada. Para tal, em muitas situações é calculado o centro da linha do laser para coletar as coordenadas (BUSCHINELLI, 2007).

2.3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O processamento digital de imagens é um conjunto de tarefas inter-relacionadas, que correspondem ao processamento de imagens digitais por um computador digital. Neste processo o primeiro passo é a captura de uma imagem, normalmente realizada por um sistema de aquisição apropriado. Posteriormente, esta imagem precisa ser representada de maneira adequada para receber tratamento computacional. Sabe-se que uma imagem digital é composta por um número finito de elementos, denominado como pixels (GONZALEZ; WOODS, 2010).

O processamento digital de imagens baseia-se na aplicação de fórmulas matemáticas e probabilísticas, entretanto é essencial a análise humana para a escolha da técnica adequada (GONZALES; WOODS, 2010).

2.3.1 Segmentação

A segmentação é uma categoria de técnicas utilizadas no processamento e análise de imagens. Sua finalidade é fragmentar a imagem em regiões ou objetos de interesse. Num contexto geral, a segmentação é um processo autônomo e uma das tarefas mais complexas do processamento de imagem. Segmentar uma quantidade de objetos com posições, formas e posicionamentos diferentes, depende do desenvolvimento de algoritmos com capacidade de extrair as características dos objetos de maneira precisa. Desta forma, quanto maior for a precisão da segmentação, maior a probabilidade de sucesso na solução de problemas que necessitem identificar objetos individualmente (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ; WOODS, 2010; GROOVER, 2011).

Segundo Solomon e Breckon (2013), a segmentação possui alto grau de importância no processamento de imagens, sendo muitas vezes o primeiro passo

vital realizado antes que outras tarefas sejam aplicadas, tais como, extração de características, descrição, classificação, entre outras.

Os algoritmos de segmentação em sua maioria visam à detecção de contornos de objetos e similaridades na imagem. Para isso, baseiam-se nas propriedades fundamentais de valores de níveis de cinza (intensidade). A segmentação pode ser abordada de duas maneiras. Uma é pelo método de contorno/fronteira, que possui o intuito de detectar bordas para identificar fronteiras entre regiões. Para tal, considera as diferenças entre grupos de pixels. A segunda maneira é pelo método baseado em regiões, onde é identificada uma região embasada no grau de similaridade entre os pixels. A segmentação de imagens monocromáticas é fundamentada na mudança brusca de valores de níveis de cinza, que geralmente está associada ao contorno de objetos (FORESTI, 2006; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ; WOODS, 2010; SOLOMON; BRECKON, 2013).

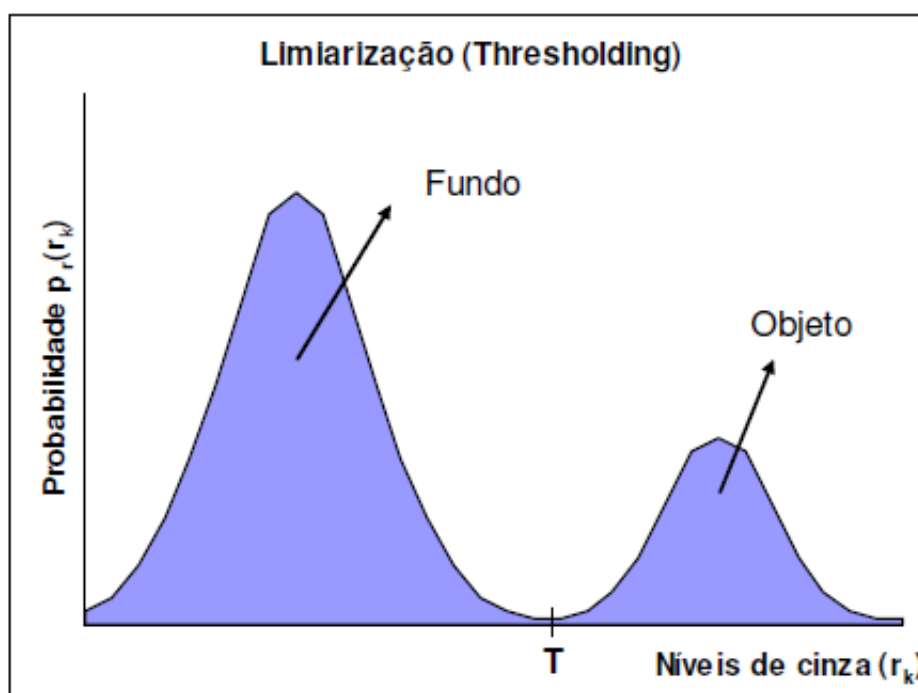
A limiarização é um dos sub-processos do processamento de imagem. Limiarizar a imagem é uma das técnicas mais utilizadas para detecção de objetos em sistemas de visão industrial, pois dispõe de propriedades intuitivas, simplicidade de implementação e alta capacidade de processamento. A limiarização consiste em categorizar os pixels de uma imagem por meio da determinação de um ou vários limiares. Para aplicação de limiar de intensidade é necessário escolher um determinado nível de cinza como limite. Em seguida, pixels cujos valores forem maiores que o limiar são alocados a uma região, e os pixels cujos valores de intensidade forem menores que o limiar são alocados em outra região (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ; WOODS, 2010; SOLOMON; BRECKON, 2013).

Gonzalez e Woods (2010), fundamentam a limiarização por meio da condição de um histograma de níveis de cinza, representado na Figura 08. Este histograma apresenta a frequência da ocorrência dos diferentes valores de cinza possíveis em uma imagem, $f(x,y)$, composta por objetos claros sobre um fundo escuro, de tal forma que os pixels do objeto e do fundo apresentem valores de níveis de cinza (intensidade) agrupados em dois modos. Para extrair os objetos do fundo é selecionado um limiar T , que divide estes dois grupos (modos). Desta forma, qualquer ponto (x,y) na imagem em que $f(x,y) > T$ é designado de ponto objeto, já na situação oposta, o ponto é denominado de fundo. Uma imagem limiarizada $g(x,y)$ pode ser definida por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > T \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (01)$$

Sendo $f(x, y)$ a função que representa a intensidade luminosa na imagem, e $g(x, y)$, a nova função de luminosidade depois da separação do limiar T .

Figura 08: Histograma de intensidade dividido por um único limiar T .

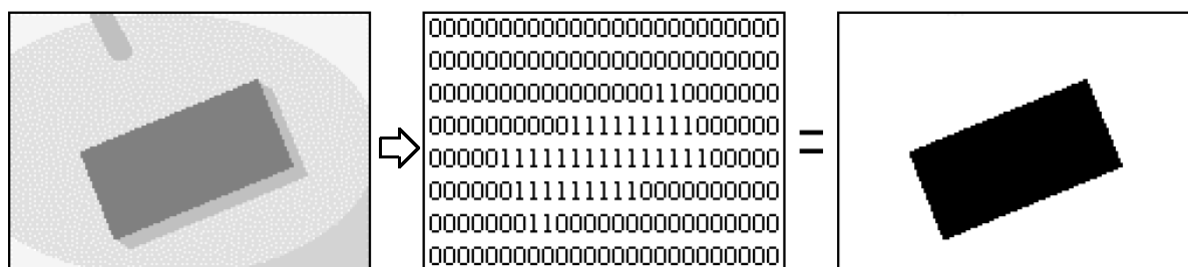


Fonte: (FORESTI, 2006).

Analisando a imagem limiarizada $g(x,y)$ do histograma da Figura 08, pode-se evidenciar que os pixels com valor 0 retratam o fundo da imagem, enquanto os pixels com valor 1 (ou qualquer outro nível de cinza conveniente) equivalem ao objeto. Podendo desta forma concluir que o resultado da limiarização é a binarização de uma imagem, com dois valores de intensidade, 1 (preto) ou 0 (branco) (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

Na Figura 09 é apresentado um exemplo da operação de limiarização de uma imagem com um objeto genérico e diversas sombras ou elementos indesejados na cena capturada. Após a limiarização, a cena fica “limpa”, obtendo apenas o objeto obtido pelos pixels com valor 1 (GRASSI, 2005).

Figura 09: Processo de limiarização.



Fonte: (GRASSI, 2005).

Quando a escolha do limiar é realizada com base apenas visual do histograma, e dividido em um único limiar em duas regiões, as modificações da iluminação do ambiente podem ser prejudiciais ao processo. Desta forma, a escolha de um limiar global simples apresenta maior sucesso em ambientes controlados (FORESTI, 2006).

Pedrini e Schwartz (2008) e Gonzalez e Woods (2010), dividem as técnicas de segmentação de imagens baseadas em limiarização de seleção de um único limiar ou múltiplos limiares, principalmente em:

- **Limiarização global:** onde o valor T é uma constante aplicável para segmentar uma imagem inteira;
- **Limiarização variável:** quando T apresentação variação ao longo da imagem;
- **Limiarização local ou regional:** geralmente utilizada para denotar a limiarização variável, quanto o valor de T em um ponto qualquer (x,y) de uma imagem, é dependente de uma vizinhança de (x,y) , correspondente à intensidade média dos pixels da vizinhança;
- **Limiarização dinâmica ou adaptativa:** onde o valor T depende das coordenadas espaciais de (x,y) .

2.4 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIA

A geração de trajetória resume-se em gerar o histórico temporal das variáveis de junta para que o manipulador efetue um movimento desejado. A especificação do movimento almejado pode realizar-se no espaço cartesiano ou no espaço de juntas. Frequentemente em soldagem este deslocamento é especificado por meio de

pontos iniciais e finais, da forma geométrica do caminho a ser percorrido e do tempo de deslocamento (LUCAS, 2012).

Faz-se necessário compreender a diferença entre caminho e trajetória. Caminho é uma representação puramente espacial, ou seja, não apresenta nenhuma relação com o tempo. E trajetória existe uma dependência temporal, desta forma, pode ser interpretada como um caminho ao qual se impõe um perfil de velocidade. A geração de trajetória envolve a descrição temporal da posição, velocidade e aceleração para cada grau de liberdade do manipulador. Os métodos para geração desta, em sua maioria consistem no cálculo dos parâmetros da curva adotada como caminho de modo a acomodar os pontos iniciais, finais e o tempo final, desta forma, apresentando como consequência uma função parametrizada no tempo. Pode-se realizar a geração de trajetória previamente à sua execução (off-line), ou em tempo real, na medida em que é executada-(LAGES, 2005).

2.5 COMUNICAÇÃO

Além dos procedimentos de captação, processamento e análise de imagem, têm-se os relacionados com a transmissão e recebimento dos resultados, variáveis e comandos gerados pelos dispositivos de visão industrial (GRASSI, 2005).

Silva (2008), ressalta que a forma de comunicação entre robôs e seus periféricos é escolhida conforme a necessidade da aplicação, considerando-se também a velocidade de transmissão/recepção com que as informações devem ser trocadas. À vista disso, o autor comenta que existe uma grande gama de interfaces que podem ser utilizadas para esta finalidade, sendo elas sistemas com fio (*wired*) ou sistemas sem fio (*wireless*). Nos sistemas com fio os mais populares são RS232, RS485, padrão 4 a 20mA, entre outros. E nos sistemas sem fio tem-se óptica em espaço livre, WiFi, entre outros.

Neste contexto, quanto aos meios de se estabelecer uma comunicação, de forma a permitir a integração e interação entre dispositivos, como periféricos e robôs industriais Romano (2002), comenta que os modos de comunicação podem ser classificados segundo suas características, quanto ao número de dispositivos interconectados fisicamente, como a comunicação ponto a ponto, na qual um dispositivo comunica-se diretamente com outro por meio de interligação física, sendo geralmente constituída por uma conexão entre transmissor e receptor e;

comunicação multiponto, meio pelo qual um dispositivo comunica-se com vários outros dispositivos sincronicamente.

Sob o ponto de vista de Grassi (2005), o desenvolvimento de métodos de comunicação ponto a ponto usando blocos de funções integradas a softwares, possibilita a manipulação e controle de equipamentos, descartando a necessidade de se ter um processamento de informações centralizado, permitindo maior automação da planta industrial, pois o controle chegou mais próximo ao processo, em aplicações para o chão de fábrica.

2.5.1 Entradas/Saídas

I/O é a sigla que representa Input/Output, que em português significa Entrada/Saída. Este termo indica entrada ou inserção de dados por meio de um programa, bem como a saída de dados como resultado de uma operação.

Na área de automação a informática está diretamente relacionada, e para a comunicação entre dispositivos em muitas situações são utilizados os I/O integrados nos próprios equipamentos. Em sistemas robóticos, por exemplo, I/O são integrados ao controlador do robô para possibilitar a inserção e obtenção de informações por meios físicos.

2.5.2 Comunicação Serial

Um comitê de padronização denominado como *Electronic Industries Association* (EIA), desenvolveu em meados de 1960 um padrão de interface comum para comunicação de dados em equipamentos diversos. Nesta época, o planejamento era comunicar um computador central (Mainframe) e um computador remoto (Terminal), ou ainda, dois terminais sem um computador central incluso. Estas máquinas eram interligadas por meio de linhas telefônicas, logo, fazia-se necessário utilizar um modem para cada canal de transmissão. A necessidade de um padrão deu-se inicialmente por dois motivos, assegurar confiança na comunicação e habilitar interconexões de equipamentos produzidos por fabricantes diferentes. Com base dessas necessidades criou-se o padrão RS232, no qual especifica-se o sincronismo, função, níveis de tensão do sinal, protocolo para trocas de dados e conectores mecânicos (SILVA, 2008).

O periférico denomina-se SERIAL pelo fato de transmitir um *Byte*, *bit* por *bit*, de acordo com a ordem preestabelecida e pré-programada, proporcionando que o receptor receba esses *bits* e o converta novamente em um *Byte*, sendo este, igual ao transmitido. Na transmissão no canal serial, envia-se o *Byte* com a mensagem e alguns bits de controle de transmissão e recepção, tais quais, os *Bits Start* e *Stop*, sendo estes sinalizadores de início e fim de transmissão respectivamente. É comum que o dado seja codificado em código ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), o qual é um padrão universal de comunicação (MELO, 2006).

Segundo Axelson (1998) apud Guimarães (2003), a serial RS232 foi idealizada para realizar a comunicação bidirecional de dados entre dois dispositivos, sendo que os mesmo estejam dispostos a uma distância máxima variando de 150m a 300m, resultante da taxa de transmissão e do tipo de cabo usado.

Uma característica da comunicação serial padrão RS232, é que a mesma ocorre de forma assíncrona, ou seja, a velocidade de comunicação de ambos os dispositivos deve ser ajustado no mesmo valor. Na comunicação assíncrona, a transmissão de dados ocorre de forma individual, e ao fim de cada dado enviado acrescentam-se bits de controle, proporcionando que o terminal que recebeu os dados identifique se a transmissão foi concluída corretamente. O Quadro 1 lista os parâmetros de configuração que podem ser feitos no padrão RS232 (SILVA, 2008).

Quadro 1: Configurações da comunicação serial

Configuração	Ajustes
Tamanho do Dado	5, 6, 7, 8 e 9 bits
Número de Stop-Bits	1, 1.5, 2 bits
Paridade	Par, Impar, Marca, Espaço e Nenhum
Velocidade de Transmissão	1200, 2400, 4800, 9600..., 115200
Porta de Comunicação	COM1, COM2 COMx

Fonte: (SILVA, 2008).

Siqueira (2006), cita em seu trabalho que para que os dispositivos compreendam a comunicação serial é essencial que os bits sejam endereçados dentro de uma estrutura pré-definida, tal qual, compreende as características descritas na sequência:

- *Baud-rate* (Taxa de transmissão): Corresponde a velocidade de transferência dos dados. Para que a transmissão ocorra de forma correta, é necessário que a velocidade de transmissão do transmissor e do receptor sejam iguais. Os valores admissíveis de velocidade são: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 ou 115200;
- *Data-bits* (Número de Bits de Dados): É o número de bits que forma um dado. Pode-se ter 5, 6, 7 ou 8 bits em um dado;
- *Parity* (Paridade): O bit de paridade pode ser ímpar, par ou nenhuma, neste último não é gerado este bit. A finalidade de uso do mesmo é como um simples esquema de detecção de erro;
- *Stop Bit*: Este pode ser configurado com os valores 1, 1.5 ou 2 bits, o mais comum de ser utilizado é 1 ou 2 bits (SIQUEIRA, 2006).

2.6 CLOUD COMPARE

Este é um software que além de possibilitar a visualização da nuvem de pontos, oferece um conjunto de ferramentas para edição e renderização manual da nuvem de pontos. Bem como, disponibiliza vários algoritmos de processamento avançado que permitem realizar processamentos diversos. Dentre os processamentos disponíveis tem-se, a computação de distância da nuvem de pontos, segmentação do objeto, computação estatística, projeções, etc. (CLOUD COMPARE, 2018).

2.7 SISTEMAS CORRELATOS

Pinheiro (2014), em sua dissertação de mestrado intitulada como “Mapeamento 3D e planejamento de trajetórias para preenchimento de cavidades por meio de soldagem em múltiplos passes usando o processo GMAW robotizado”, destaca que para automação de processos de reparos em peças metálicas, os equipamentos de digitalização tridimensional associados aos sistemas de soldagem robotizada vêm conquistando espaço. Desta maneira, este mesmo autor, desenvolveu um software de planejamento do processo de soldagem que possui a capacidade de definir uma estratégia de execução dos cordões de solda por meio da

digitalização da superfície danificada, direcionando assim, que o robô realize o preenchimento da cavidade erodida. Este trabalho implementou algoritmos de segmentação, reconstrução e filtragem que interpretam a nuvem de pontos de uma cavidade e por meio de estratégia pré-estabelecidas de preenchimento, disponibilizam ao manipulador robótico as coordenadas da trajetória para o correto posicionamento dos cordões de solda, realizando desta forma o preenchimento da cavidade.

Já Ginani (2008), desenvolveu um sistema de digitalização tridimensional de superfícies baseado em visão computacional com varredura a laser para uso em metrologia dimensional. Seu principal objetivo foi desenvolver um sensor de digitalização tridimensional de superfícies que apresentasse em suas características uma grande flexibilidade, baixo custo e uma qualidade de precisão que possibilitasse seu uso em sistemas metrológicos. Para alcançar este objetivo, o mesmo propôs um sistema baseado em varredura a laser e com uso de técnicas de visão computacional, para desta forma, evitar o uso de sensor de posicionamento angular reduzindo o custo do sistema. Para o desenvolvimento do sistema foi utilizado dois *lasers*, sendo um fixo e um móvel, e os feixes devem obrigatoriamente ser perpendicular entre si.

Páris (2015), realizou o desenvolvimento e aplicação de um sistema de visão de máquina bidimensional para obtenção dos pontos de coordenadas globais (X, Y), referentes à imagem capturada de uma junta retilínea de topo de chapas de aço a serem soldadas pelo processo MIG/MAG, culminando na geração da trajetória e envio à unidade controladora para ser executada por um robô.

Stivanello et al (2009), realizaram o desenvolvimento de um sistema de medição 3D por triangulação laser aplicado à caracterização de superfícies metálicas. Os componentes básicos do sistema são uma câmera de vídeo, um projetor de folha laser e um sistema de atuação. Para o funcionamento do sistema a câmera está conectada ao computador por meio de uma placa de aquisição. Uma correia e um motor de passo são os responsáveis pela movimentação do laser que foi fixado em um suporte rotatório. O funcionamento do motor de passo e a emissão da luz laser são realizados por uma placa de controle conectada ao computador.

Este último sistema descrito foi utilizado como referência para o desenvolvimento do presente trabalho. Sendo utilizada a técnica de processamento

de imagem e realizado a integração do sistema ao robô manipulador de seis graus de liberdade.

Além dos sistemas descritos anteriormente, há no mercado sistemas comerciais de scanner 3D, tais como o braço articulado de medição da *HEXAGON METROLOGY* modelo *Rober Absolute Arm* que é um dispositivo de medição por coordenadas 3D, portátil e poli articulado que possui um scanner a laser embutido desenvolvido para obter os dados da superfície de praticamente qualquer objeto. Este equipamento possui um sistema de varredura que proporciona precisão no sistema de digitalização. Desta forma, este sistema foi utilizado para comparação e validação dos resultados. Para isso foi utilizado o software *Cloud Compare*, onde as nuvens de pontos medidas no sistema desenvolvido, foram comparadas as nuvens de pontos obtidas por este sistema comercial.

3 DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO INTEGRADO A UM BRAÇO ROBÓTICO

Neste capítulo é descrito o desenvolvimento de um sistema de medição 3D embarcado em um braço robótico para medição de peças. O desenvolvimento do sistema foi realizado em duas etapas: a primeira etapa consiste na montagem de um protótipo aliado ao desenvolvimento de um software para execução de testes. A segunda etapa é o processo de acoplar o sistema a um robô antropomorfo para realizar os testes de movimentação por meio do robô. Neste contexto, são apresentadas as técnicas utilizadas e os periféricos desenvolvidos para a execução do projeto, tais como a homografia, triangulação laser e a interface de comunicação.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO E LEVANTAMENTO DOS REQUISITOS

No presente trabalho procurou-se disponibilizar uma estrutura de valor acessível capaz de realizar medições 3D de peças a serem soldadas. Para tanto foi necessário realizar a captura de imagens, processar os dados e obter as coordenadas que compõe a junta a ser soldada, disponibilizando esses pontos para futuramente ser realizada a conversão juntamente com o sistema de coordenadas do braço robótico.

Por meio da captura de imagem é possível identificar as juntas a serem soldadas, com isso pretende-se identificar os pontos do sistema de medição para que futuramente possa ser implementada a execução de trajetória pelo robô.

Com base nas considerações descritas e relacionando aos objetivos geral e específicos deste trabalho, foram selecionados os seguintes requisitos funcionais a serem atendidos pelo sistema:

- 1) O sistema deve permitir a calibração do plano de trabalho;
- 2) O sistema deve gerar nuvem de pontos 3D;
- 3) O sistema deve realizar a detecção da junta de maneira semiautomática;
- 4) O sistema deve permitir a integração ao braço robótico para movimentação do sistema de medição.

Estes requisitos funcionais denotam a aplicabilidade do sistema. Pois são necessárias estas funcionalidades para permitir a caracterização da forma

tridimensional dos objetos de interesse, por meio da aplicação de visão computacional integrado a robotização.

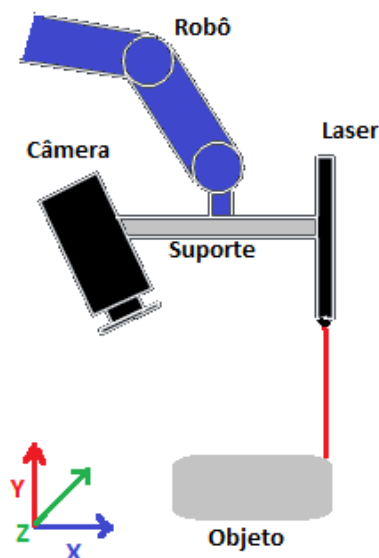
Bem como, foram levantados os requisitos não funcionais, os quais apesar de não estarem diretamente relacionados ao funcionamento do sistema são essenciais para atender os objetivos de operacionalidade fácil e sistema acessível financeiramente a empresas de pequeno e médio porte:

- 1) A operação do sistema deve ser fácil;
- 2) Utilizar biblioteca de processamento de imagens aberta;
- 3) Utilizar equipamentos com valores acessíveis a pequenas indústrias.

3.2 DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DA ARQUITETURA SELECIONADA

Com base nos requisitos apresentados na seção anterior optou-se por utilizar um sistema de visão 3D por triangulação laser, a ser embarcado em um braço robótico antropomorfo de seis eixos. Cabe destacar que outras arquiteturas poderiam ter sido selecionadas, entretanto após análise dos trabalhos correlatos optou-se por trabalhar com a triangulação laser acreditando ser a opção mais adequada para os requisitos solicitados.

O sistema é composto por uma câmera, um projetor de folha laser e um braço robótico para movimentação. A câmera e o laser estão fixados em um suporte acoplado no braço robótico, ambos estão conectados em uma interface que possibilita o chaveamento do laser e a captura da imagem, integrando o movimento do braço robótico com os comandos do sistema de captura desenvolvido e conectado através de uma interface. Uma imagem da configuração básica do sistema é apresentada na Figura 10.

Figura 10: Configuração básica do sistema

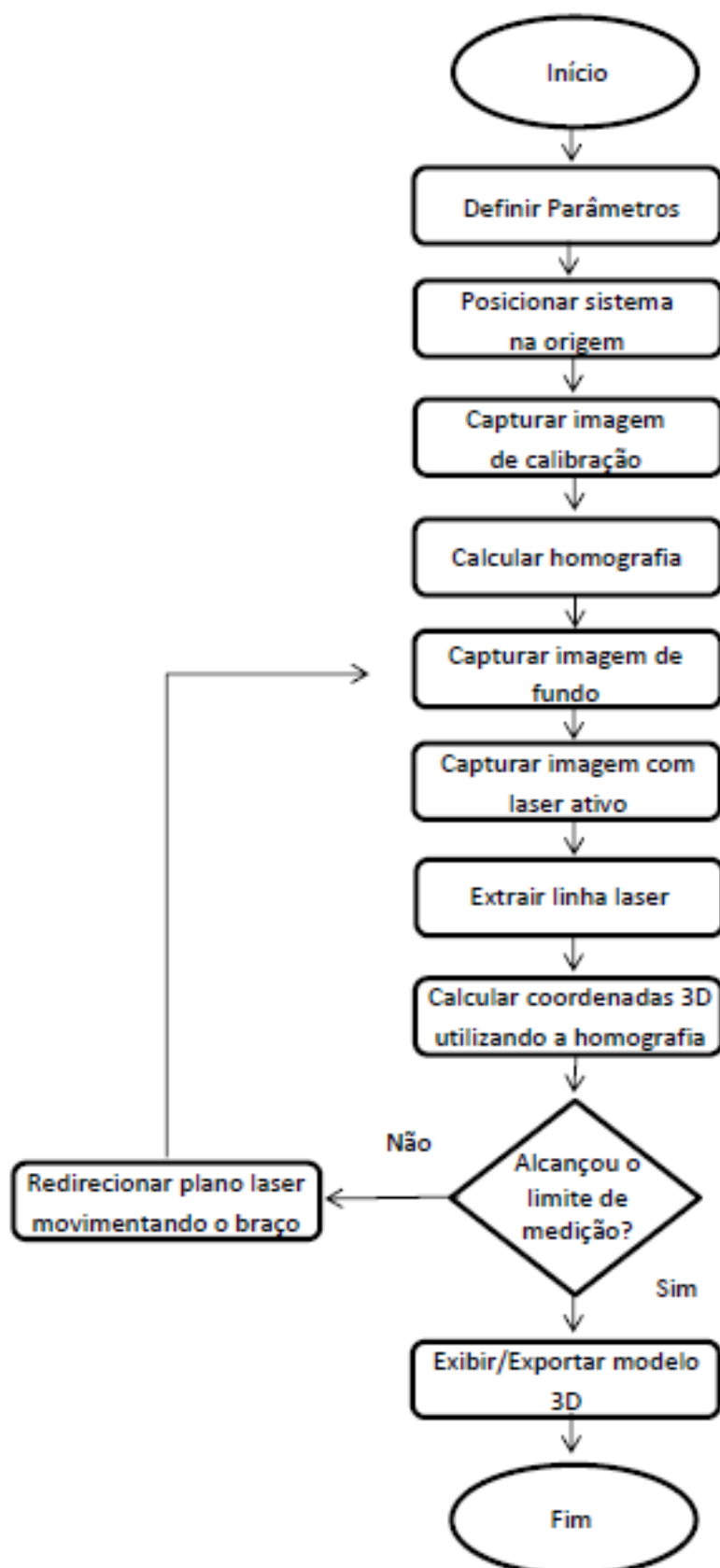
Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Por meio da estrutura apresentada, a folha de luz é direcionada ao longo do eixo X, sendo que o mensurando fica em posição fixa e o conjunto de medição é deslocado. A cada passo do braço robótico a câmera em ângulo captura uma imagem com o laser e outra imagem sem o laser, as imagens são processadas de modo que a linha laser seja identificada. As coordenadas bidimensionais da linha na imagem são convertidas em pontos no plano do mundo. Unindo os perfis obtidos ao longo da movimentação do robô é obtida a forma 3D do objeto.

O método de medição proposto trabalha com aplicação de medição por triangulação laser, conforme descrito na seção 2.2.3. Para tal é utilizado um laser de linha de varredura e uma câmera para captura das imagens. Para preparar o sistema é necessária uma etapa inicial de calibração, conforme descrito na seção 2.2.2.2.

O sistema de medição é apresentado por meio de um diagrama na Figura 11 e posteriormente descrito de maneira simplificada.

Figura 11: Fluxograma do Sistema



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

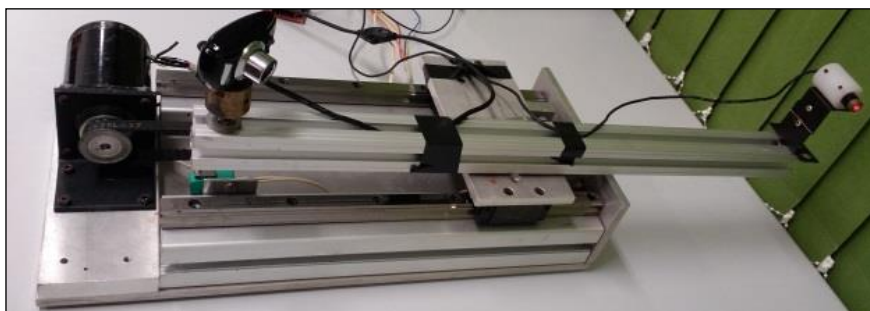
Antes de iniciar o processo de medição deve ser definido os parâmetros e inseridos no sistema, tal processo deve ser realizado uma única vez se os parâmetros forem os mesmos para as medições seguintes, caso haja alguma alteração é necessário modificar os parâmetros no programa. Para realizar a medição é necessário que o operador posicione a peça dentro da área de trabalho calibrada e que o sistema de movimentação do robô esteja em espera, aguardando um comando via software para iniciar as capturas de imagens.

Com o sistema calibrado é possível estimar um ponto 3D no sistema de coordenadas do ambiente baseado em um ponto 2D da imagem utilizando para isso as matrizes de transformação. Desta forma, o principal objetivo desta etapa é identificar a localização dos pontos da imagem correspondentes a linha laser.

Para tal, a cada passo dado pelo braço robótico o sistema de medição captura uma imagem de referência sem a emissão do laser. Para cada posição também ocorre uma nova captura com a emissão do laser. Posteriormente é realizada uma subtração de intensidade entre as imagens de referência e as imagens com laser. Desta subtração é obtida uma imagem com os pontos da linha laser em destaque e um processo de limiarização é empregado para obter uma imagem binária com os pontos de interesse isolados. Com a identificação da linha laser, é possível estimar as coordenadas dos pontos correspondentes no ambiente com base na matriz de transformação gerada pelo procedimento de calibração.

3.3 TESTES PRELIMINARES PARA VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA

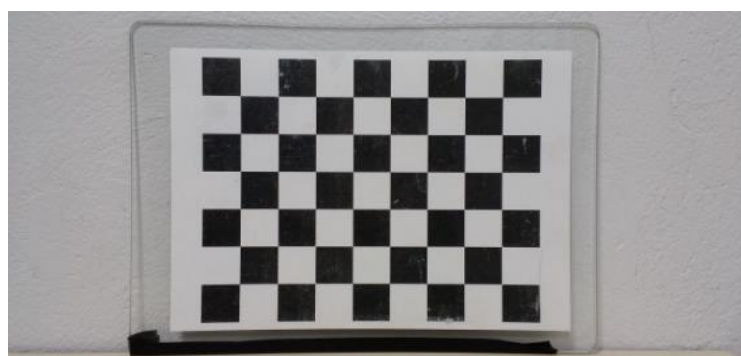
Para testar a configuração inicial foi desenvolvido um protótipo do sistema composto essencialmente por uma câmera de vídeo webcam, um laser e um sistema de atuação. A câmera de vídeo e o laser foram acoplados em uma guia de deslocamento linear, a qual possibilitou que o feixe de luz fosse deslocado ao longo do mensurando, e que a câmera acompanhasse este movimento realizando as capturas de imagem, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Protótipo experimental

Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Esta guia foi conectada ao computador por meio de uma placa de prototipagem eletrônica, utilizada no controle de movimentação da guia. Por meio da configuração apresentada é possível deslocar a folha de luz ao longo do eixo x, sendo que este procedimento é feito por meio do deslocamento do sistema. Um sistema eletrônico na placa de controle, faz com que a cada passo do motor de passo ocorra o chaveamento do laser. Desta maneira, é possível realizar aquisições de imagens com o laser incidindo ou não sobre o objeto.

Antes de realizar a captura das imagens é necessário calibrar o sistema de medição a laser, esta calibração foi realizada por meio da utilização de um gabarito plano, conforme Figura 13. Por meio deste procedimento limita-se o espaço de trabalho do sistema somente ao volume em torno da posição dos pontos pertencentes ao gabarito de calibração utilizado. Este procedimento de calibração deve ser realizado toda vez que for alterado a posição e orientação da câmera, pois ao modificar sua posição o seu ângulo de captura altera e necessita nova calibração. Nos testes em protótipo a calibração foi realizada por meio da marcação manual de quatro pontos do gabarito.

Figura 13: Gabarito de Calibração do Protótipo

Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Após calibrar o sistema é realizada a captura das imagens. Na sequência essas imagens são processadas em um programa escrito na linguagem C utilizando a biblioteca *OpenCV*. No processamento é realizada a limiarização das imagens, e a subtração entre as imagens com o feixe de luz e as imagens de fundo, identificando desta maneira a linha laser. Com isso, é possível estimar as coordenadas que caracterizam o objeto, e por meio da aplicação de um software específico é possível visualizar a nuvem de pontos do objeto, bem como aplicar filtros para melhorar a nuvem e eliminar ruídos.

Num primeiro momento foram realizados ensaios com o laser de menor intensidade em uma peça de madeira, apresentada na Figura 14, escolhida convenientemente pelo fato de não apresentar artefatos indesejados como pontos de reflexão não associados à linha laser. Durante o processamento desta peça foram realizadas pequenas alterações no módulo de hardware, com o objetivo de obter o melhor resultado. Cabe ressaltar, que a Figura 14 apresenta a imagem visualizada pela câmera, a qual devido à qualidade da mesma apresenta uma imagem desfocada.

Figura 14: Peça de madeira



Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Na Figura 15, é apresentada a nuvem de pontos obtida na medição da peça exibida na Figura 14. Essa imagem é formada pelas coordenadas X, Y e Z obtidas pelo processamento realizado no módulo de software desenvolvido e arquivadas num arquivo CSV conforme exemplo na Figura 16.

Figura 15: Visualização da nuvem de pontos.



Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Figura 16: Coordenadas X, Y e Z

X coord. ▼	Y coord. ▼	Z coord. ▼
0.00	238.17	111.31
0.00	237.39	111.32
0.00	236.62	111.33
0.00	235.82	112.56
0.00	235.05	112.57
0.00	234.27	112.58
0.00	233.52	111.37
0.00	232.74	111.38

Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Após os testes realizados em peças de madeiras, deu-se início aos testes em chapas metálicas que caracterizam o mesmo tipo de material a ser soldado. A Figura 17 corresponde à imagem da chapa metálica. O mesmo processo de medição realizado na madeira foi aplicado na chapa metálica. Porém, observou-se a presença de artefatos como ruídos provenientes de reflexões indesejadas nos resultados de medição na nuvem de pontos. Isto se dá, pelo fato da chapa metálica

ser muito refletiva, conforme pode ser observada na Figura 18, característica esta que dificulta a leitura da peça e interfere no resultado final.

Figura 17: Chapa de aço 1010



Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

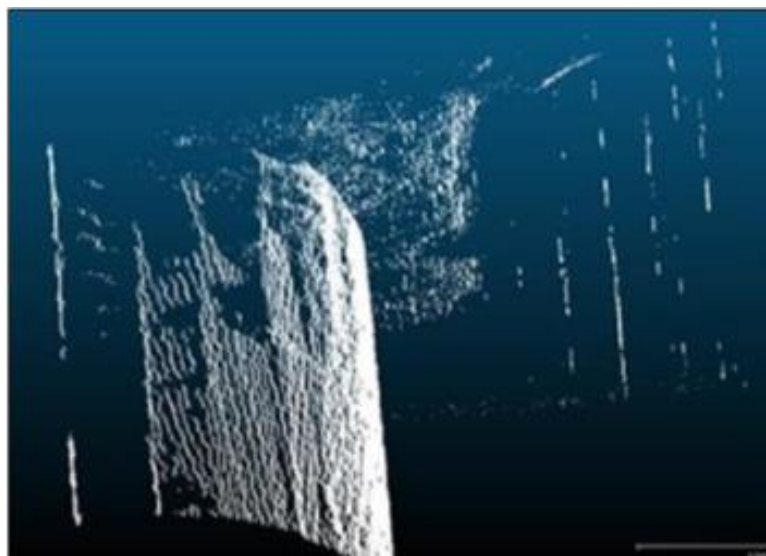
Figura 18: Refletividade da chapa de aço 1010



Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Devido às interferências e ruídos causados na imagem na etapa de processamento, o resultado da nuvem de pontos não é satisfatório, sendo possível a visualização na Figura 19 da nuvem de pontos com os ruídos, sendo que esta situação precisou ser contornada no desenvolvimento final do sistema fazendo uso de um spray revelador que minimiza a refletividade da peça metálica.

Figura 19: Nuvem de pontos da chapa de aço



Fonte: (DA PESQUISA, 2016).

Com base nos testes realizados no protótipo verificou-se a viabilidade da técnica selecionada. Tal viabilidade fundamenta-se pela caracterização da nuvem de pontos em 3D por meio da movimentação da “folha de luz” sobre o objeto. Sendo que nas situações onde não se tem refletividade, a nuvem de pontos é satisfatória para testes iniciais. Nos casos onde a refletividade gera ruídos a aplicação do revelador soluciona o problema, proporcionando desta maneira a aplicação da técnica de triangulação ativa por projeção de plano de luz com movimentação da “folha de luz” sobre o objeto.

3.4 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO FINAL DO SISTEMA

Com o protótipo em funcionamento possibilitou-se realizar a evolução do mesmo para o acoplamento ao braço robótico e melhoria do processamento de imagem. Este processo foi dividido em três etapas, desenvolvimento mecânico do hardware, projeto eletroeletrônico de acionamento da câmera e do laser, bem como o desenvolvimento do software. Além disso, foi realizado o acoplamento do sistema no robô da fabricante Yaskawa modelo MH12.

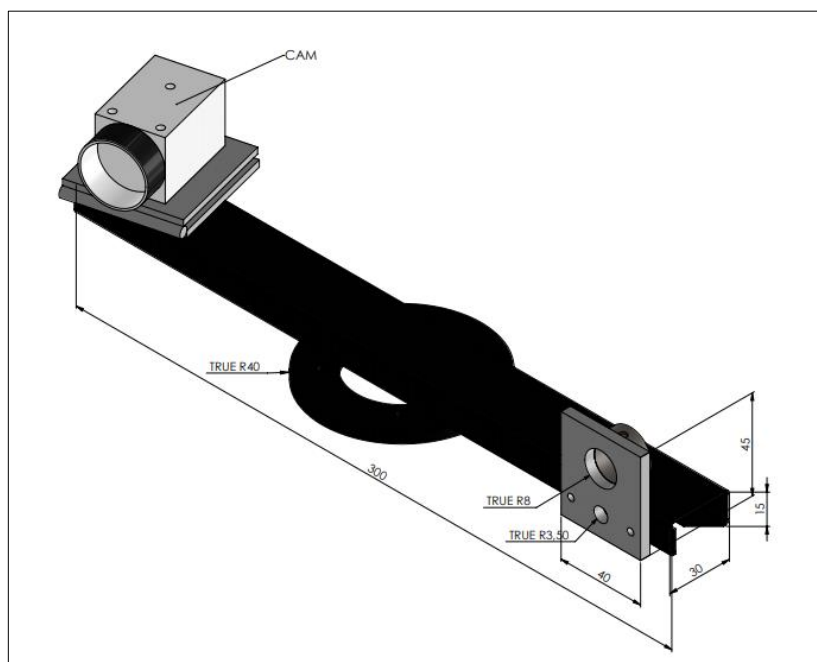
3.4.1 Projeto Mecânico Hardware

A seleção dos materiais e equipamentos foi realizada de acordo com os recursos disponíveis e infraestrutura instalada do laboratório de Robótica da Universidade Alto Vale do Rio do Peixe – UNIARP e, do laboratório de P&D do IFSC Campus Florianópolis.

Para o desenvolvimento do sistema final de captura de imagem foi escolhido uma câmera da marca Basler modelo acA 1300 – 60gc e uma lente da marca Tamron CCTV Lens modelo 12VM412ASIR com comprimento focal de 4 à 12 mm e formato de sensor de 1/2". Bem como foi utilizado um laser de linha vermelha que possui dimensões físicas de 16mm de diâmetro e 65mm de comprimento, informação necessária para o projeto do suporte de fixação.

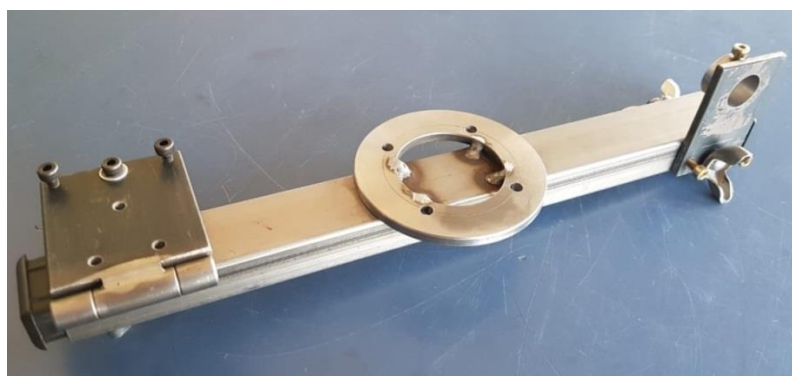
Para realizar a integração do sistema de visão com o braço robótico, foi necessário desenvolver uma base para fixação da câmera e do laser. Para isto fez-se necessário realizar o desenho da peça de acordo com medidas físicas que atendessem a distância de base mínima para bom desempenho do sistema correspondente a 230 mm, bem como, foi necessário considerar a possibilidade de regulagem de ângulo no posicionamento da câmera e do laser. Além disso, foi necessário considerar situações mecânicas de movimentação do braço robótico.

O robô aplicado é um robô antropomorfo de 6 GDL no qual pode ser utilizado um único suporte. Neste, é possível regular a inclinação da câmera e altura do laser, mantendo os dois elementos alinhados. Esta funcionalidade proporciona os ajustes necessários para adequar o suporte as condições do ambiente de medição. Na Figura 20 é apresentado o projeto do suporte.

Figura 20: Projeto do Suporte mecânico

Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Cabe destacar que a fixação no robô foi projetada para um robô de 6 eixos da marca Yaskawa. Para robôs de outras marcas é importante verificar as furações de fixação. Com o projeto pronto, o suporte do robô foi fabricado atendendo as dimensões necessárias, como exibido na Figura 21.

Figura 21: Suporte para robô antropomorfo 6 GDL Yaskawa

Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

A base desenvolvida foi instalada no braço robótico. Para tal os eixos foram posicionados de maneira que cada grau de liberdade esteja em condições de movimentação, levando em conta as limitações de cada eixo. A Figura 22 apresenta a estrutura mecânica embarcada no braço robótico.

Figura 22: Estrutura embarcada no braço robótico



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

3.4.2 Projeto Eletroeletrônico

Para integrar o sistema de visão ao braço robótico é necessário realizar a conexão dos comandos do software com o hardware. É por meio desta conexão que o braço robótico executa os movimentos solicitados pelo sistema de visão. Bem como, é o que possibilita que todos os componentes físicos executem suas atribuições conforme programado no sistema de visão computacional.

Para realizar a captura das imagens é necessário enviar ao robô dois sinais, um para posicionar o sistema de visão na origem e outro para realizar o movimento do passo e habilitar nova captura de imagem. Para realizar a integração entre o software desenvolvido e o braço robótico foi utilizado um Arduino como placa de prototipagem eletrônica.

Entretanto, o nível de tensão do Arduino e do robô Yaskawa são diferentes, sendo 5V e 0V respectivamente. Desta forma, para comunicar o Arduino com o robô foi necessário desenvolver uma interface de comunicação.

A interface de comunicação foi projetada já considerando aplicações futuras de aperfeiçoamento do sistema, por isso apresenta canais reservas de comunicação entre os dispositivos envolvidos. Desta forma a placa de interface é composta por 4 canais no sentido Arduino para o robô onde recebe o sinal 5 Vcc do Arduino e envia GND para o robô, estes canais correspondem aos comandos de ir para a origem (posição inicial), passo do robô para nova captura de imagem, comando para executar a trajetória da junta e um canal reserva. Além dos canais de entrada para o robô, tem-se 3 canais no sentido robô para Arduino onde é enviado o sinal de 5 Vcc do Arduino para o comum dos relés e recebe o retorno do robô, tais saídas estão

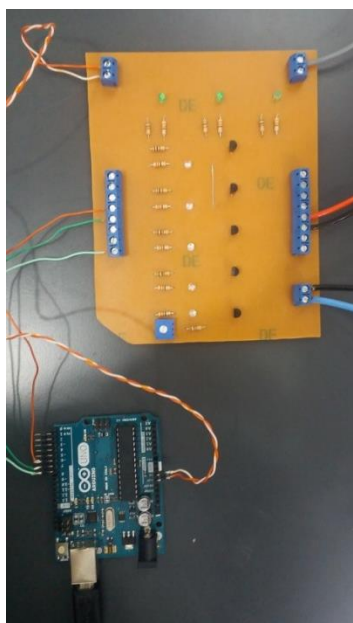
disponíveis para implementação de um retorno do braço robótico de comando executado. Junto à placa de interface foi implementado um circuito amplificador para acionamento do laser. O laser é acionado pelo Arduino e apesar de possuir o mesmo nível de tensão, a corrente elétrica consumida é superior à corrente limite da saída digital do Arduino.

Nos sinais do Arduino para o robô foram utilizados transistores NPN, modelo BC547, para possibilitar a comutação do GND conforme requerido pelo robô. Nos sinais do robô para o Arduino não se fez necessária a utilização de nenhum componente de interface em função das saídas do robô já possuírem relés. No circuito amplificador do laser foi utilizado transistor NPN, modelo BC547. Além dos circuitos funcionais foram incluídos LED's com seus referidos resistores limitadores de corrente para visualização dos sinais do Arduino. Os sinais do robô podem ser visualizados na interface de operação do robô, denominada Pendant.

Os componentes mencionados são os principais sendo que os mesmos precisam de componentes adicionais para o seu correto funcionamento, conforme apresentado no diagrama elétrico da placa no Apêndice A.

Após a elaboração do projeto da interface foi realizada a construção da placa eletrônica. Sendo a mesma apresentada na Figura 23, conectada ao Arduino. No Apêndice B são apresentadas as trilhas e componentes da placa eletrônica de interface.

Figura 23: Sistema eletroeletrônico de comunicação



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Cabe destacar que poderia ter sido usado um CLP (Controlador lógico programável) no lugar do Arduino, o que tornaria o sistema mais robusto e com mais possibilidades de interação. Porém para demonstração do funcionamento do sistema de visão, o sistema com Arduino atende a demanda para testes de maneira simplificada e comprova a possibilidade de execução do processo.

3.4.3 Projeto do Software

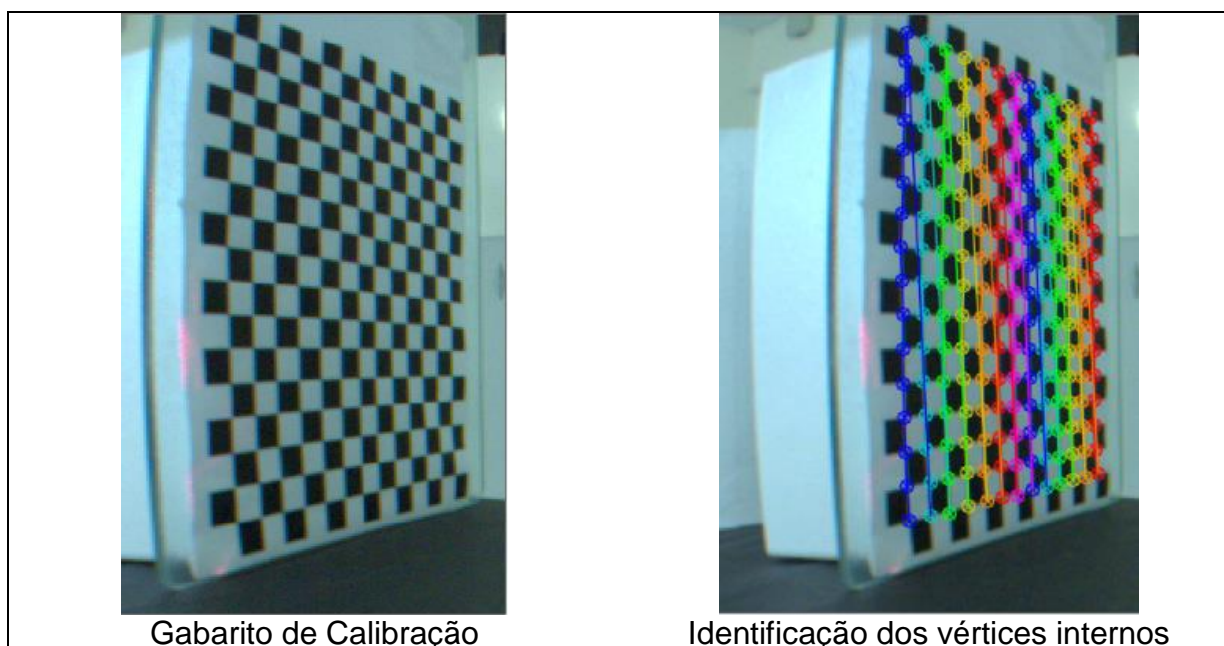
O desenvolvimento do sistema de captura e processamento de imagem foi realizado empregando a linguagem C++ utilizando a biblioteca de processamento de imagens *OpenCV*. As duas principais funcionalidades do sistema são calibração e a medição.

A calibração foi realizada conforme descrito na seção 2.2.2.2. Pra tal, foi utilizado o método convencional, conforme descrito por Pereira Junior e demais autores. Neste método é utilizado um padrão de calibração de duas ou três dimensões. O gabarito empregado é simplificado e de fácil construção, impresso em material de alta qualidade e fixado em uma superfície plana e rígida. O gabarito denominado como um tabuleiro xadrez de dimensões conhecidas proporciona a fácil identificação dos vértices formados pela junção dos quadrados pretos. Para tal aplicação foi informado no software às dimensões do tabuleiro padrão e implementado uma calibração automática, no qual o sistema reconhece na imagem as arestas internas.

A rotina de calibração foi implementada como um passo inicial, ou seja, é realizado antes da operação do sistema de visão. E só é necessária uma nova calibração se forem realizadas alterações de posicionamento do sistema. Esse procedimento consiste na calibração da câmera, sendo que para tal o gabarito é posicionado em paralelo com a linha do laser. Ao realizar a captura do gabarito são identificados os vértices internos do padrão que são denominados como pontos característicos de interesse, e para cada ponto associa-se as coordenadas do ambiente. O primeiro vértice interno do canto inferior esquerdo do gabarito é definido como a origem do ambiente. As coordenadas X e Y dos demais vértices internos correspondem a distância em milímetros em relação a origem e a coordenada Z é definida como zero.

Na Figura 24 é exibida uma amostra do gabarito utilizado na calibração do sistema e as respectivas identificações dos vértices internos. Por meio das arestas identificadas é realizado um processo de estimação da homografia, que corresponde à matriz que descreve a projeção entre os dois planos, um o mundo real e outro o plano da imagem. Conforme descrito na seção 2.2.2.2.

Figura 24: Calibração



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Por sua vez a medição envolve duas etapas principais, que são a detecção da linha laser e a conversão dos pontos bidimensionais da linha na imagem em pontos tridimensionais nas coordenadas do robô.

Para detectar a linha é necessário realizar a aquisição de imagens, esta etapa corresponde à coleta de imagens para o processamento. Estas imagens são coletadas de duas maneiras, uma sem o laser (Figura 25), denominada imagem de fundo e outra com o laser (Figura 26). Esse procedimento é realizado em função do chaveamento do laser, sendo que a cada passo movimentado no eixo X, o sistema registra as duas imagens.

Figura 25: Captura de imagem sem laser



Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

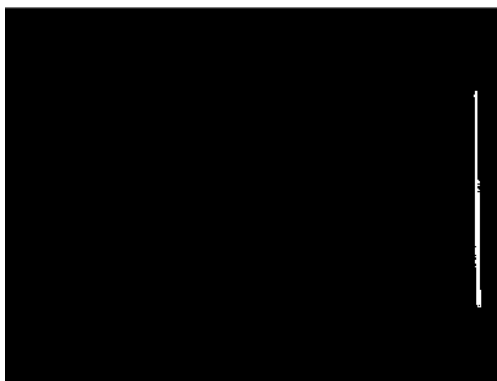
Figura 26: Captura com o laser



Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

Após a obtenção das imagens de fundo e das imagens com o laser, é aplicada a operação aritmética de subtração. Ao subtrair o fundo da imagem com o laser obtém-se a linha do laser e com isso é possível extrair as coordenadas dos pontos que compõe esta linha.

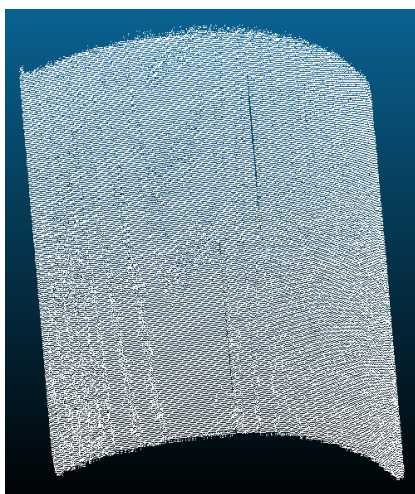
Com a linha laser detectada é aplicado o processo de limiarização, o qual categoriza os pixels de uma imagem de acordo com a intensidade dos tons de cinza. No sistema em questão este processo é realizado através de limiarização global, sendo que o valor de limiar pode variar em função da iluminação do ambiente. Com aplicação da limiarização no sistema em questão o resultado obtido é uma imagem com dois valores de intensidade, 1 (preto) ou 0 (branco). Na Figura 27 é apresentada a imagem limiarizada.

Figura 27: Linha do laser

Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

Uma vez detectados os pontos centrais da linha é realizado a conversão de coordenadas por meio de uso da matriz de homografia obtido na etapa de calibração. Ao final do processamento das imagens e obtenção dos pontos 3D os mesmo são exportados para um arquivo CSV que possui as coordenadas X, Y e Z de cada ponto obtido no processamento das imagens.

Para a visualização e tratamento da nuvem de pontos foi utilizado o software *Cloud Compare*. Onde foi possível visualizar as nuvens de pontos, realizar os levantamentos estatísticos, computação de distâncias e identificação das coordenadas que compõe a junta de soldagem. Esses dados levantados no sistema proporcionam a realização dos testes de validação do sistema desenvolvido. Na Figura 28 é apresentada a visualização de uma nuvem de pontos no *Cloud Compare*.

Figura 28: Visualização nuvem de pontos

Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

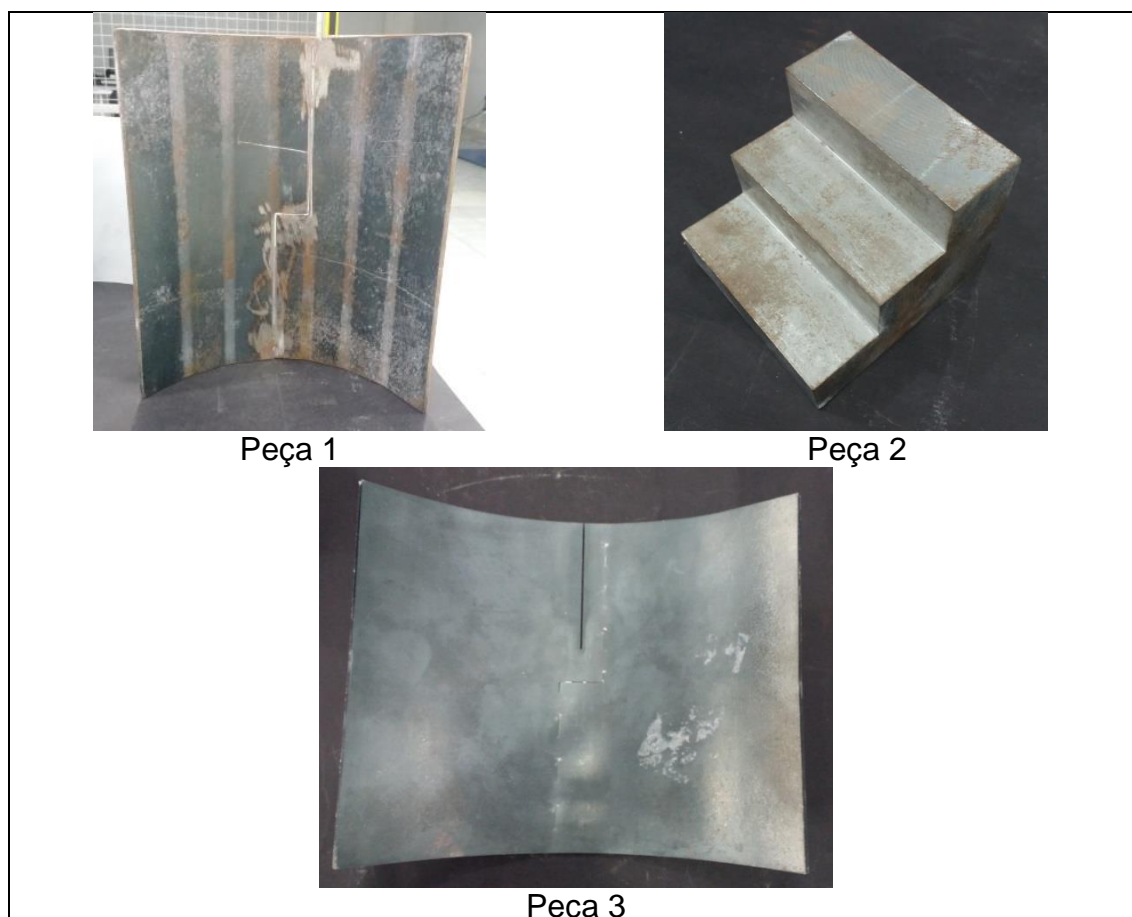
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados para validação do sistema desenvolvido. Os testes aplicados correspondem a repetitividade, a dispersão dos pontos medidos e uma comparação do sistema de medição desenvolvido com um sistema comercial.

Durante a avaliação do método implementado o principal requisito funcional considerado foi à aquisição de nuvens de pontos para caracterização tridimensional de objetos. Para tal foi considerado que os objetos de interesse estariam localizados a uma distância de aproximadamente 400 milímetros.

Foram utilizadas três peças de medição com dimensões conhecidas. Duas das peças possuem formatos similares com dimensões diferentes e variação angular. A terceira apresenta um formato de degrau. As peças, assim como seus identificadores, são apresentadas na Figura 29.

Figura 29: Mensurandos



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Para o bom desempenho do sistema é necessário comprometimento com alguns parâmetros de montagem do sistema utilizado, tais como, resolução, distância entre a câmera e projetor laser, angulação da câmera e configuração da lente. Para análise do sistema, estas variáveis foram determinadas considerando a distância de operação desejada. O volume de medição considerado foi de 800,0 mm X 238,0 mm X 196,0 mm. A linha de base utilizada foi de 230 mm. A câmera foi utilizada com resolução de 640 X 480 pixels.

Testes iniciais confirmaram a inviabilidade de medição das peças sem tratamento, conforme apresentado no Apêndice B. Mediante esse resultado, todas as peças de aço submetidas a medições precisaram ser preparadas para medição, sendo que essa preparação corresponde à aplicação de um revelador, conforme apresentado na Figura 30.

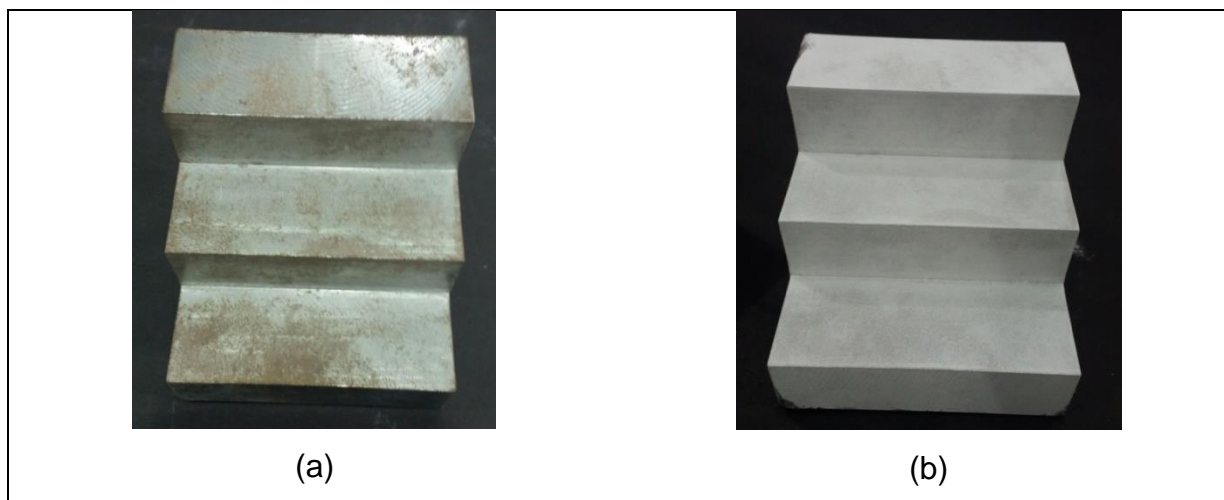
Figura 30: Aplicação do revelador



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

O revelador cria na peça uma camada de pó branco. Este pó ajuda a reduzir significativamente a refletividade indesejada do laser na peça. Como trata-se de um material destinado a processos de soldagem, em futuras aplicações de soldagem este revelador não irá interferir no cordão de solda, pois o revelador evapora em função da temperatura do processo. Na Figura 31 é apresentado um exemplo visual da peça sem revelador e um da peça com revelador.

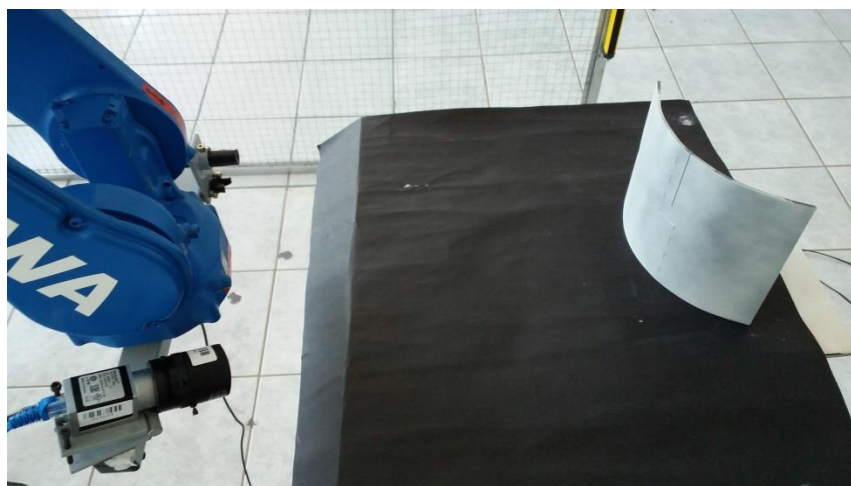
Figura 31: Uso do revelador: (a) Peça sem revelador; (b) Peça com revelador



Fonte: (Da pesquisa, 2018).

Após o sistema ser calibrado, a peça é preparada e posicionada para que a medição possa ser executada. Na Figura 32 é apresentado o cenário de medição, onde o sistema está embarcado e o mensurando posicionado para medição.

Figura 32: Cenário de medição



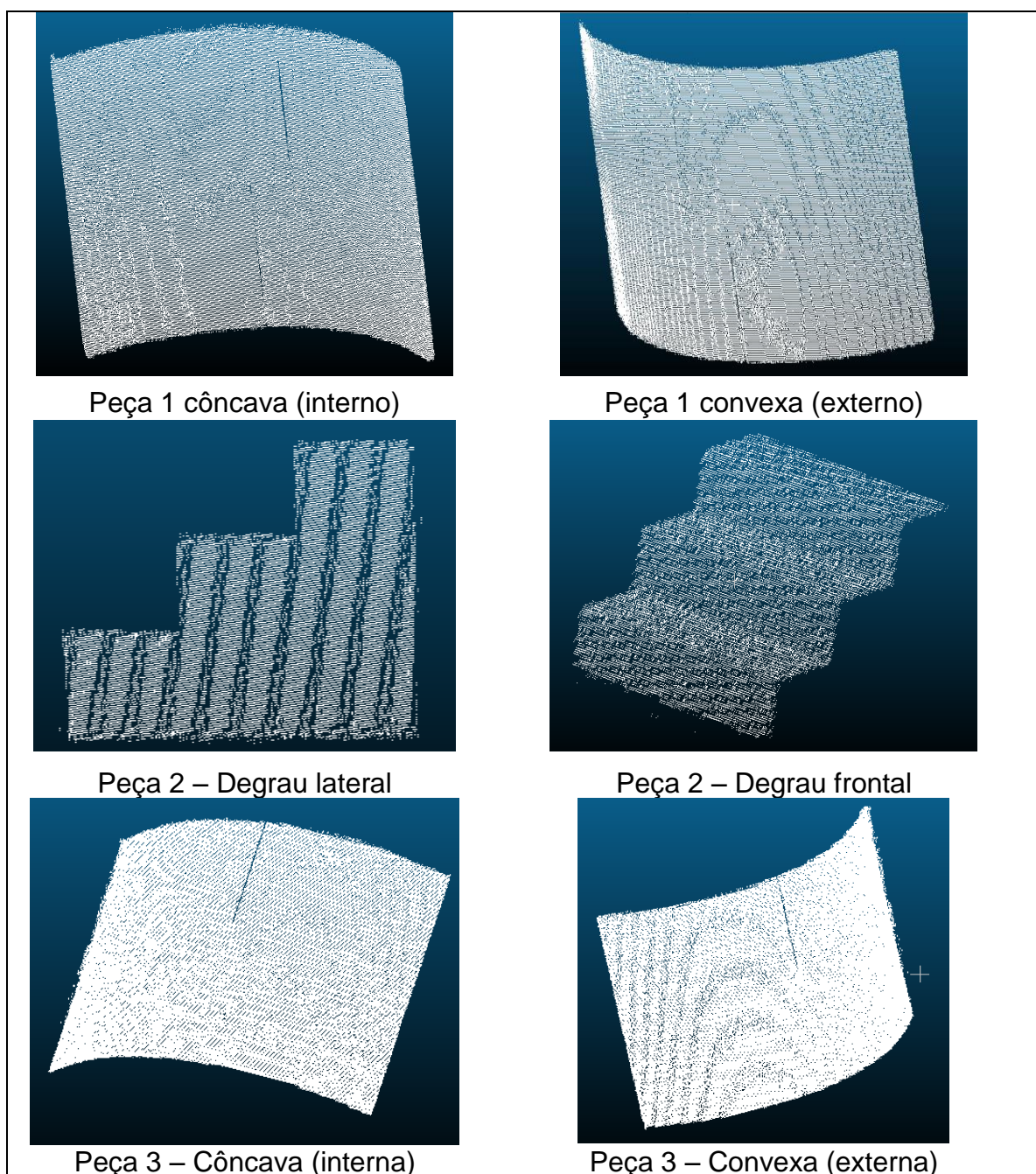
Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Para validação do sistema foram realizados três testes. O primeiro teste foi o de repetitividade, o segundo teste de dispersão dos pontos medidos empregando um plano e o terceiro teste foi uma comparação do sistema de medição desenvolvido com um sistema de referência.

4.1 REPETITIVIDADE DAS MEDIÇÕES

Para avaliar a repetitividade de resultados obtidos pelo sistema, foram realizadas seis medições seguidas em cada peça sem alteração do cenário de medição, mantendo o sistema e a peça nas mesmas posições iniciais. Na Figura 33, é apresentada uma nuvem de pontos de cada objeto.

Figura 33: Nuvens de pontos



Fonte: (Da pesquisa, 2018).

Nestas medições esta sendo avaliada a forma tridimensional dos objetos, para que posteriormente possam ser extraídas as áreas de interesse para a aplicação de soldagem. Para realizar o levantamento estatístico foi efetuada a comparação entre as medições de cada peça. Ou seja, cada peça foi medida por seis vezes sem alteração do cenário, essas seis medições foram comparadas entre si. Na Tabela 01 são apresentados os resultados obtidos para a Peça 1..

Tabela 01: Comparação de medições peça 1a – côncava

Comparação	Entre	Distância média	Desvio Padrão
1	Leitura 1 Leitura 2	0,086320	0,324156
2	Leitura 1 Leitura 3	0,088459	0,405481
3	Leitura 1 Leitura 4	0,099677	0,358299
4	Leitura 1 Leitura 5	0,106393	0,360823
5	Leitura 1 Leitura 6	0,112815	0,244160
6	Leitura 2 Leitura 3	0,070779	0,188727
7	Leitura 2 Leitura 4	0,077432	0,201169
8	Leitura 2 Leitura 5	0,082382	0,214585
9	Leitura 2 Leitura 6	0,086984	0,213040
10	Leitura 3 Leitura 4	0,062523	0,185031
11	Leitura 3 Leitura 5	0,071945	0,203064
12	Leitura 3 Leitura 6	0,074797	0,197142
13	Leitura 4 Leitura 5	0,055003	0,170134
14	Leitura 4 Leitura 6	0,062439	0,177241
15	Leitura 5 Leitura 6	0,050690	0,163706
	Média	0,079243	0,240451

Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

Conforme visualizado na Tabela 01, a comparação entre as seis medições totalizou em 15 comparações para cada mensurando. Na Tabela 02 é apresentado o valor médio obtido na análise de diferença entre as nuvens de pontos das diferentes peças, onde \bar{x} é a distância média e σ é o desvio padrão.

Tabela 02: Diferença entre as nuvens de pontos

Objeto	Pontos Avaliados	\bar{x}	σ
Peça 1a – côncava	190.225	0,079243	0,240451
Peça 1b – convexa	173.546	0,065779	0,192824
Peça 2a - degrau lateral	17.797	0,093463	0,435695
Peça 2b – degrau frontal	32.756	0,162272	0,292294
Peça 3a – côncava	148.083	0,126827	0,252743
Peça 3b – convexa	140.433	0,085150	0,190767

Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

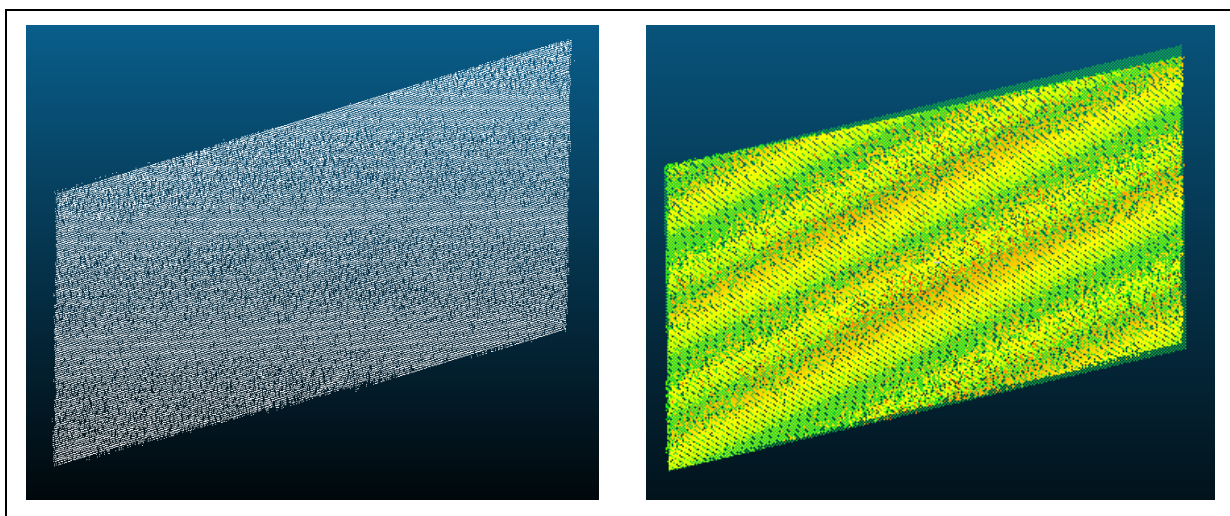
Com base nos diferentes resultados apresentados, consideramos que as nuvens de pontos caracterizam adequadamente a forma tridimensional dos objetos de teste. Sendo estimada uma distância média entre os pontos de 0,102122mm, e um desvio padrão médio de 0,267462mm, podemos considerar que em aplicações de soldagem este erro pode ser desconsiderado em função do diâmetro do cordão de solda ser superior a este valor, o que faz com que a junta seja preenchida mesmo apresentando este erro de medição.

4.2 DISPERSÃO DE PONTOS

Com o objetivo de realizar uma avaliação geral do sistema de medição proposto em relação à dispersão de pontos medidos pela técnica aplicada, foi utilizada a métrica Erro de Pontos – Plano, seguindo o método apresentado por Stivanello (2013). Um plano consistindo em uma chapa plana pintada de branco foi posicionada na área de medição e medida pelo sistema. Posteriormente, foi ajustado um plano a nuvem tridimensional de pontos obtida na etapa de reconstrução no software *Cloud Compare* e aplicado o algoritmo de comparação.

Na Figura 34 é apresentado o objeto plano testado e o ajuste dos pontos ao plano ideal.

Figura 34: Objeto plano e plano ideal



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Para o plano obtido foi calculado por meio do algoritmo a distância entre cada ponto ao plano ajustado. As distâncias obtidas para cada uma das seis medições são apresentadas na Tabela 03.

Tabela 03: Distâncias Ponto – Plano (mm)

Plano	Pontos Avaliados (un.)	\bar{x}	σ
Leitura 1	123.760	0,000002	0,56577
Leitura 2	123.584	-0,000003	0,47817
Leitura 3	123.744	0,000006	0,492543
Leitura 4	124.368	0,000005	0,498994
Leitura 5	124.306	0,000002	0,555691
Leitura 6	124.265	-0,000001	0,555969
Média	124.004	0,000002	0,524523

Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

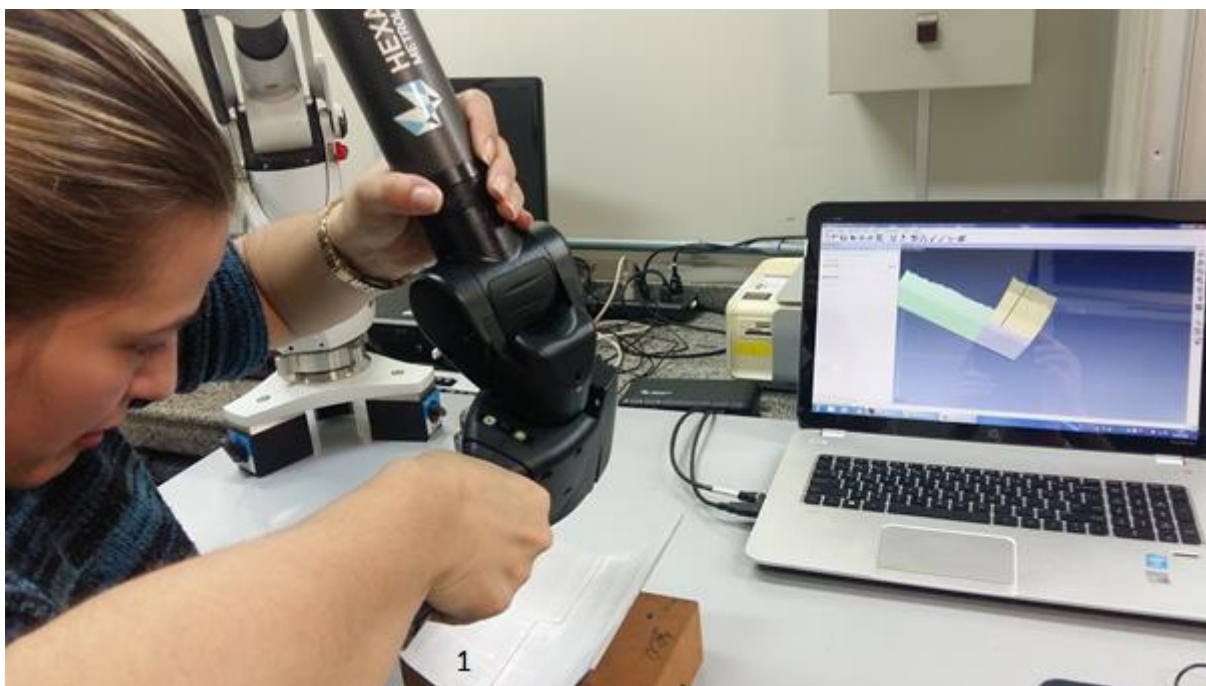
A distância média obtida de 0,000002 mm corresponde a um resultado satisfatório, desta forma, pode-se considerar que a dispersão dos pontos é insignificante na medição 3D dos objetos na aplicação em questão.

4.3 COMPARAÇÃO DE MEDIÇÃO COM SISTEMA DE REFERÊNCIA

Para se avaliar a qualidade das medições obtidas foram realizadas comparações entre os resultados do sistema desenvolvido frente aos resultados de um sistema comercial. Para tal, foi utilizado o braço articulado de medição da HEXAGON METROLOGY modelo *Rober Absolute Arm* que é um dispositivo de medição por coordenadas 3D, portátil e poli articulado. Este equipamento está disponível no laboratório de metrologia do IFSC. Maiores especificações estão disponibilizados nos Anexos A e B.

Na Figura 35 é apresentada uma imagem do processo de medição com o dispositivo de medição por coordenadas 3D citado. É possível visualizar o braço articulado que permite a movimentação do sistema em todos os ângulos, de acordo com a posição que o operador escolher. É projetada na peça uma linha laser e um ponto laser, os quais devem estar sobrepostos para obter resultados adequados, conforme pode ser visualizado no ponto 1 destacado na peça. São as coordenadas da linha laser que o sistema utiliza para obter o formato 3D da peça.

Figura 35: Imagens do processo de medição no Scanner 3D

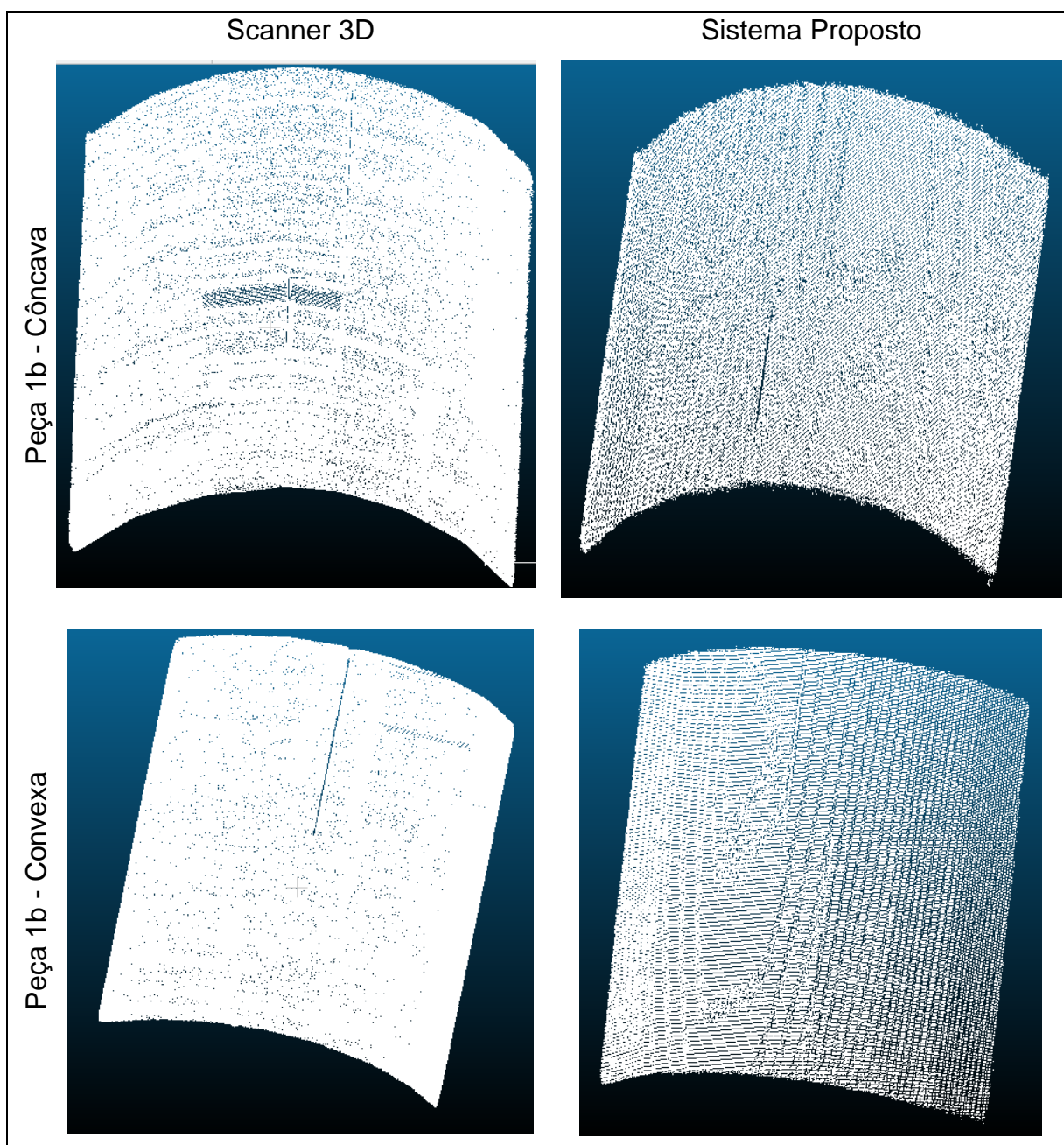


Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

O processo de comparação foi realizado nos três objetos medidos. Para isso foi realizada a medição no sistema proposto e a medição no dispositivo de medição de coordenadas 3D citado acima. Cada peça foi medida em duas posições, a peça 1 e a peça 2 foram medidas no lado interno e externo, já a peça 3 foi medida sua lateral e a sua parte frontal.

Na Figura 36, são apresentadas as medições da peça 1 em ambos os sistemas.

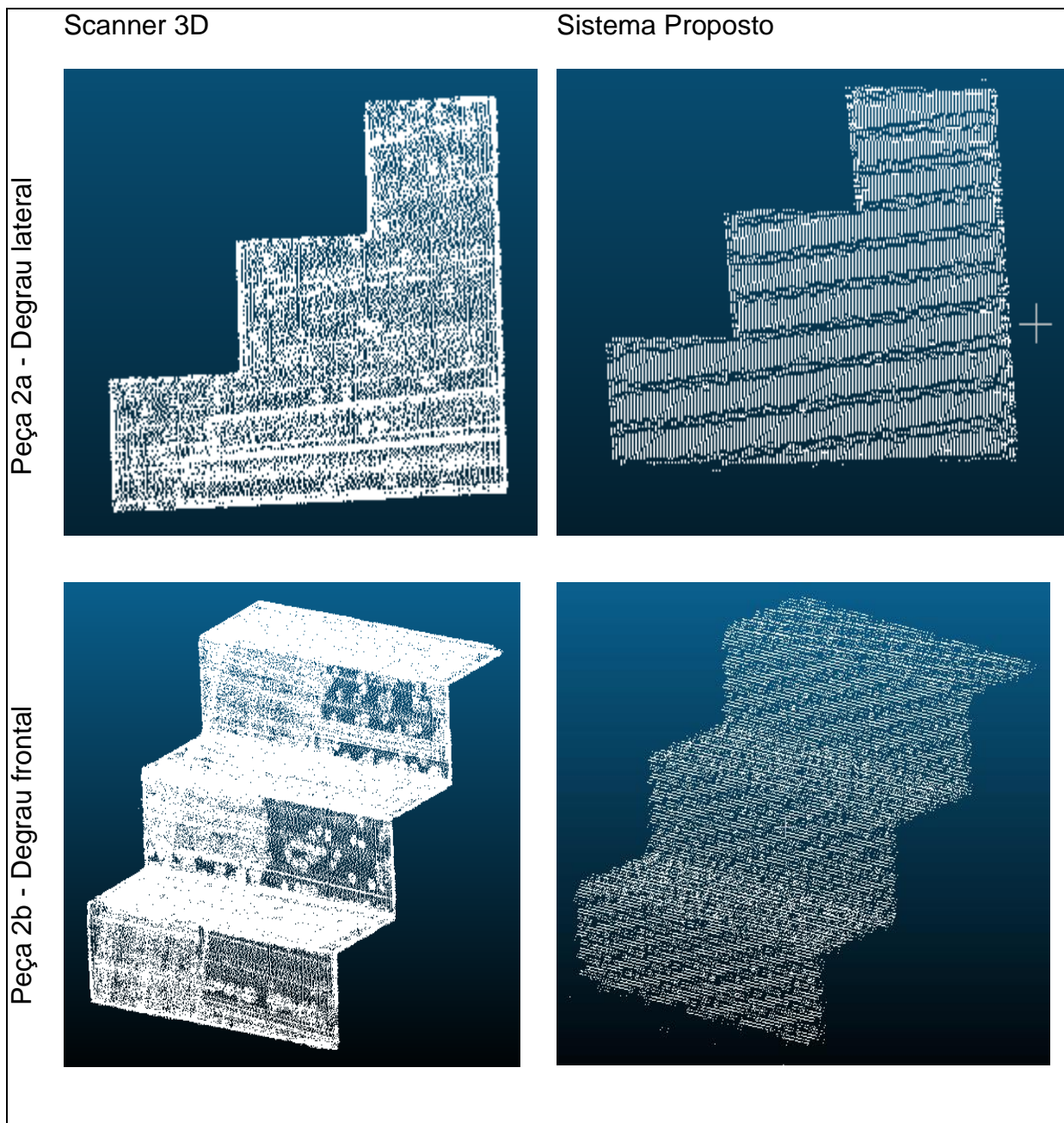
Figura 36: Nuvens de medição para comparação da Peça 1



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

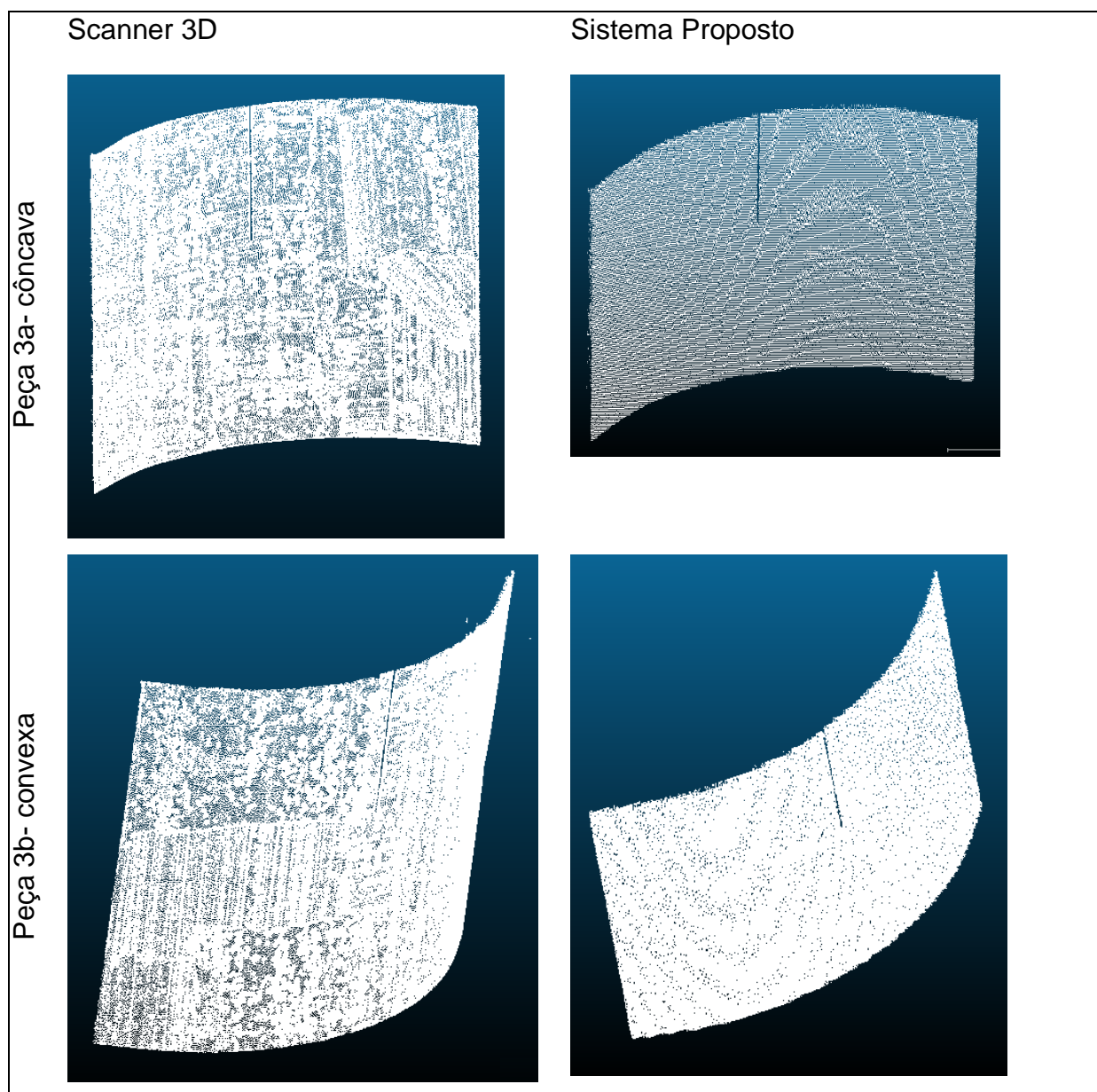
Na Figura 37, são apresentadas as medições da peça 2 em ambos os sistemas.

Figura 37: Nuvens de medição para comparação da Peça 2



Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Na Figura 38, são apresentadas as medições da peça 3 em ambos os sistemas.

Figura 38: Nuvens de medição para comparação da Peça 3

Fonte: (DA PESQUISA, 2018).

Conforme citado na seção 3.4.3, o software *Cloud Compare* possibilita visualizar, editar e comparar nuvens de pontos. Desta forma, é possível alinhar as duas nuvens de pontos e obter a distância média entre os pontos e o desvio padrão. Aplicando a função “*register entities*” foi possível realizar o alinhamento entre as nuvens de pontos. Este procedimento possibilita que o processamento das comparações, após esta etapa foi solicitado ao software o cálculo da distância média e do desvio padrão, sendo os dados apresentados na Tabela 04.

Tabela 04: Distâncias entre nuvens dos sistemas comparados

Objeto	Número de Pontos Obtidos		Distância Média	σ
	Scanner 3D	Sistema Proposto		
Peça 1a – côncava	1.126.255	173.546	0,730814	0,556355
Peça 1b – convexa	1.155.712	190.225	0,525372	0,434437
Peça 2a - degrau lateral	38.950	17.797	0,57553	0,428713
Peça 2b - degrau frontal	304.063	32.756	0,162272	0,292294
Peça 3a – côncava	493.452	140.433	0,784963	0,557269
Peça 3b – convexa	458.953	148.083	0,804403	0,528342
Média			0,597226	0,466235

Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

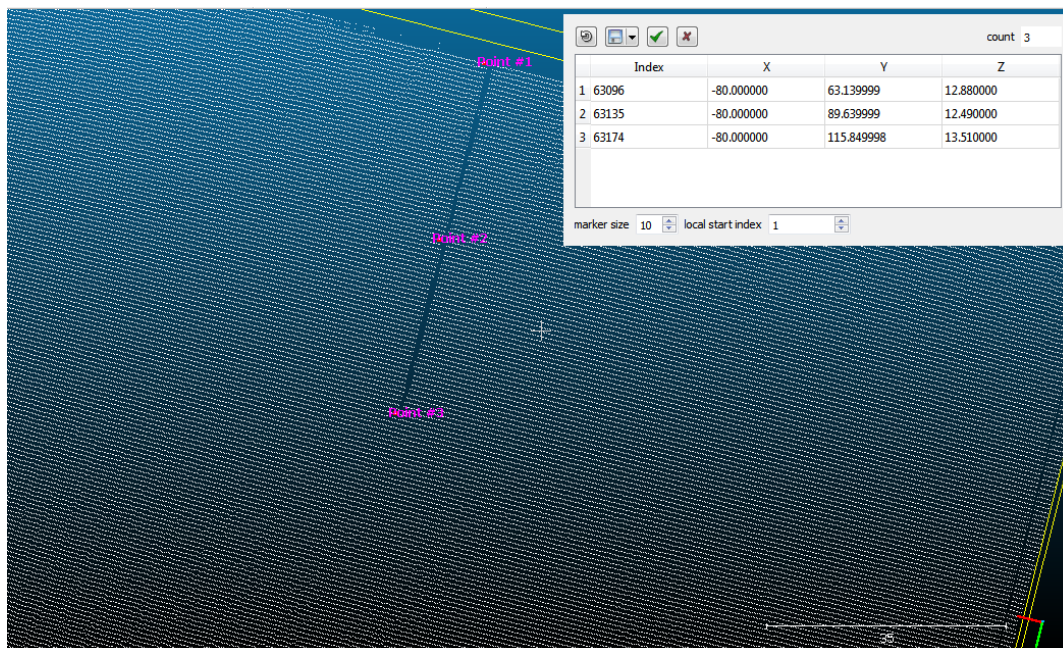
É possível observar que ambas as nuvens são consistentes e apresentam poucos pontos oclusos. Porém, a nuvem de pontos do sistema de medição Scanner 3D apresenta uma quantidade de pontos superior ao sistema desenvolvido. Porém, mesmo com um número de pontos menor o sistema proposto possibilita a identificação das juntas para soldagem.

Baseado nos resultados obtidos e apresentados, é possível considerar que as nuvens de pontos caracterizam a forma tridimensional da peça de maneira aceitável. Bem como que os resultados obtidos no sistema proposto são próximos aos obtidos pelo sistema comercial.

4.4 IDENTIFICAÇÃO DA JUNTA DE SOLDAGEM

Com a reconstrução 3D do mensurando realizada é possível identificar os pontos que compõe a junta de soldagem. Para tal, foi utilizada a função “*point list picking*” do *Cloud Compare*. Com esta função o usuário seleciona os pontos desejados e obtém como resposta as coordenadas destes pontos.

Na Figura 39, é demonstrada a identificação desses pontos em uma nuvem de pontos.

Figura 39: Obtenção das coordenadas de interesse

Fonte: (DA PESQUISA, 2018)

As coordenadas dos pontos podem ser extraídas do *Cloud Compare* e salvas em um arquivo txt. Neste arquivo cada ponto está expresso por sua posição em X, Y e Z. Cabe destacar que estes pontos estão nas coordenadas do sistema de visão desenvolvido. Desta forma, para percorrer o caminho da junta de soldagem é necessário converter estas coordenadas para o sistema de coordenadas do robô, sendo este processo realizado por meio da aplicação da técnica de homografia, executando desta forma o mapeamento de pontos do plano do sistema de visão para o plano do braço robótico.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

No presente trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de visão computacional integrado a um robô manipulador para caracterização de formas tridimensionais. Para esse fim é utilizada uma técnica de medição ativa com o objetivo de obter informações tridimensionais suficientes para operação de um robô de soldagem. Estes dados podem ser utilizados para a obtenção de trajetórias para processos de soldagem robotizada.

Foi implementado no trabalho o método de medição por triangulação ativa por projeção de plano de luz. O método apresenta as coordenadas tridimensionais que compõem um objeto medido. O sistema desenvolvido possui duas etapas principais, sendo elas calibração e medição.

Na etapa de calibração foi possível transformar os pontos da imagem em pontos do mundo aplicando uma técnica de calibração convencional por meio do uso de um gabarito quadriculado associado à homografia. No presente trabalho não foi realizada a correção de distorção radial. Esta distorção pode estar influenciando nas pequenas diferenças apresentadas no sistema, conforme verificado nos testes de comparação com um sistema comercial.

O ciclo de medição realiza a movimentação do sistema de posicionamento, a captura das imagens e o processamento destas. A cada passo dado pelo braço robótico novas capturas são realizadas e as imagens obtidas são processadas, obtendo desta maneira as coordenadas 3D que compõem o objeto.

Foram realizados testes experimentais de validação do sistema em função da qualidade da nuvem de pontos. No teste de repetitividade do sistema, obteve-se uma distância média entre os pontos de 0,102122mm, ou seja, uma variação de 0,1 mm, o que caracteriza um bom resultado. Realizou-se também teste de dispersão, este se caracterizou pela determinação de um plano ideal e pela comparação entre estes, obtendo uma variação de 2×10^{-6} mm, ou seja, 2nm.

Foram realizadas comparações entre o sistema proposto e um sistema de medição por coordenadas 3D comercial. Objetos com variação nos três eixos foram avaliados em duas posições. Comparando as nuvens de pontos obtidas no sistema proposto e no sistema de comparação, obteve-se um resultado de 0,597226mm de distância média entre os pontos.

Pela avaliação dos resultados considerando a distância média entre as nuvens de pontos, a repetitividade do sistema e a dispersão em relação a um plano perfeito, é possível concluir que são obtidos resultados satisfatórios do sistema de visão computacional e que o sistema possui potencial de aplicação em sistemas de soldagem robotizada, isto se dá pelo fato de possibilitar a obtenção de nuvens de pontos que caracterizam o objeto e possibilitam a extração das coordenadas da junta de interesse.

O sistema desenvolvido atendeu os principais requisitos levantados na fase de análise. Isto se comprova pelo fato do sistema caracterizar a forma do objeto tridimensional de maneira satisfatória empregando uma fácil operação e equipamentos acessíveis a pequenas empresas. Como resultado final é possível obter as coordenadas tridimensionais dos pontos que compõe a junta de solda de maneira semiautomática. Informações estas que precisam ser tratadas e transformadas para o plano de coordenadas do robô para guiar aplicações robóticas de soldagem automatizada.

Desta forma é possível concluir que os requisitos funcionais do sistema foram atendidos, sendo que o sistema permite calibrar o plano de trabalho, gera a nuvem de pontos 3D, realiza a detecção da junta de maneira semiautomática e propicia a integração ao braço robótico. Da mesma forma, o sistema atende os requisitos não funcionais, pois apresenta uma fácil operação do sistema, foi desenvolvido com o uso de bibliotecas abertas e utiliza equipamentos economicamente acessíveis a pequenas indústrias.

Como principais contribuições do trabalho é cabível citar a disponibilização de uma ferramenta de baixo custo e com utilização de bibliotecas abertas, ferramenta esta que pode ser utilizada como embasamento para o desenvolvimento de sistemas robóticos para soldagem, bem como para outros processos de fabricação.

Desta forma, ficam como sugestões de trabalhos futuros as seguintes questões:

- a) A conversão das coordenadas obtidas no sistema desenvolvido para as coordenadas do braço robótico, o que irá possibilitar o desenvolvimento de um programa padrão para o braço robótico possibilitando a execução de trajetórias diversas de maneira automatizada, bem como, pode ser realizado a melhoria do sistema por meio da aplicação de correção de distorção radial;

- b) O estudo de utilização de filtros na câmera que eliminem a necessidade de uso do spray revelador;
- c) Aplicação do sistema com o uso de equipamentos mais robustos e apropriados para o meio industrial, como por exemplo um CLP.

REFERÊNCIAS

BUSCHINELLI, Pedro de Deus Vieira. **Desenvolvimento de um sistema óptico por triangulação cônica para inspeção do perfil interno de dutos.** 2007. 135p. Dissertação, Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

FERNANDES, Édilla Marice Gonçalves. **Montagem Experimental Para Caracterização de Câmeras Digitais.** 2011. 146p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Elétrica, Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FERNANDES, Leandro Augusto Frata. **Estudo de métodos para extração de formas e realização de medidas a partir de imagens.** 2005. 32p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. Trabalho Individual TI – 1159.

FORESTI, Renan Luís.: **Sistema de Visão Robótica Para Reconhecimento de Contornos de Componentes na Aplicação de Processos Industriais.** 2006. 64p. Dissertação, Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GAZZIRO, Mario. **Scanner 3D: Construção e Aplicações.** São Paulo: Editora Biblioteca 24 Horas, 2011. 19 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=62G5qQUtJCoC&oi=fnd&pg=PA9&dq=+Scanner+3D+Gazzino&ots=gkPeGWTjNZ&sig=b16DMce8eI_JdAkP0UuCdoDs3rs#v=onepage&q=Scanner%203D%20Gazzino&f=false>. Acesso em: 05 de junho de 2018.

GINANI, Luciano Selva. **Desenvolvimento de um Sistema de Digitalização Tridimensional de Superfícies Baseado em Visão Computacional com a Laser para Uso em Metrologia Dimensional.** Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 2008. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7255/1/2008_LucianoSelvaGinani.pdf>. Acesso em: 05 de junho de 2018.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. **Processamento Digital de Imagens.** 3ª ed., São Paulo: Pearson, 2010.

GRASSI, Maurício Velloso. **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Visão Para Robô Industrial de Manipulação.** 2005. 85p. Dissertação, Mestrado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 3ª ed. São Paulo: Pearson, 2011.

GUIMARÃES, Alexandre de Almeida. **Análise da Norma ISO11783 e sua Utilização na Implementação do Barramento do Implemento de um Monitor de Semeadora**. 2003. 114p. Dissertação. Curso de Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LAGES, Walter Fetter. **Geração de Trajetórias**. 17 f. 2005. Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica – Robótica A. UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em:
<<http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/eng04479/traj.pdf>> Acesso em: 06/02/2018.

LUCAS, Rafael Polezi. **Sistema de Geração de Trajetórias em Manipulador Cartesiano para Aplicações em Soldagem Naval**. 2011. 113p. Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

LOGITECH: **HD Pro Webcam C920: Especificações**. Disponível em:
<<http://www.logitech.com/pt-br/product/hd-pro-webcam-c920>>. Acesso em: 09/01/2015.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H.: **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MELO, José Altino Tupinambá. **Projeto e Montagem de Equipamento para Controle de Sistema de Análise Não Destrutiva Usando Radiação Nuclear**. 2006. 101p. Dissertação. Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). São Paulo, 2006.

PÁRIS, Fabrício. **Aplicação de visão de máquina para geração de pontos de trajetória num processo de soldagem robotizado**. 2015. 126p. Dissertação, Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2015.

PAZOS, F.: **Automação de Sistemas & Robótica**. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2002.

PEDRINI, Hélio; SCHWARTZ, William Robson. **Análise de imagens digitais**. 1ª ed. São Paulo: Thonsom, 2008.

PEREIRA JUNIOR, Osmando. **Método Local de Correção da Distorção da Lente Aplicado a Visão Estereoscópica**. 2014. 112p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PINHEIRO, Leandro Soares. **Mapeamento 3D e planejamento de trajetórias para preenchimento de cavidades por meio de soldagem em múltiplos passes usando o processo gmaw robotizado.** 2014. 158p. Dissertação. Mestrado em Sistemas Mecatrônicos. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

ROMANO, V. F.: **Robótica Industrial – Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos.** 1ª ed., São Paulo: Edgar Blücher Ltda., 2002.

SILVA, André Luiz Vieira da. **Arquitetura Compacta para Projeto de Robôs Móveis Visando Aplicações Multipropósitos.** 2008. 180p. Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e Controle Discreto.** 4. ed. São Paulo: Érica, 1998.

SIQUEIRA, Thiago Almeida. **Controle de Uma Célula de Soldagem através de um PDA.** 2006. 54p. Projeto de Graduação. Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

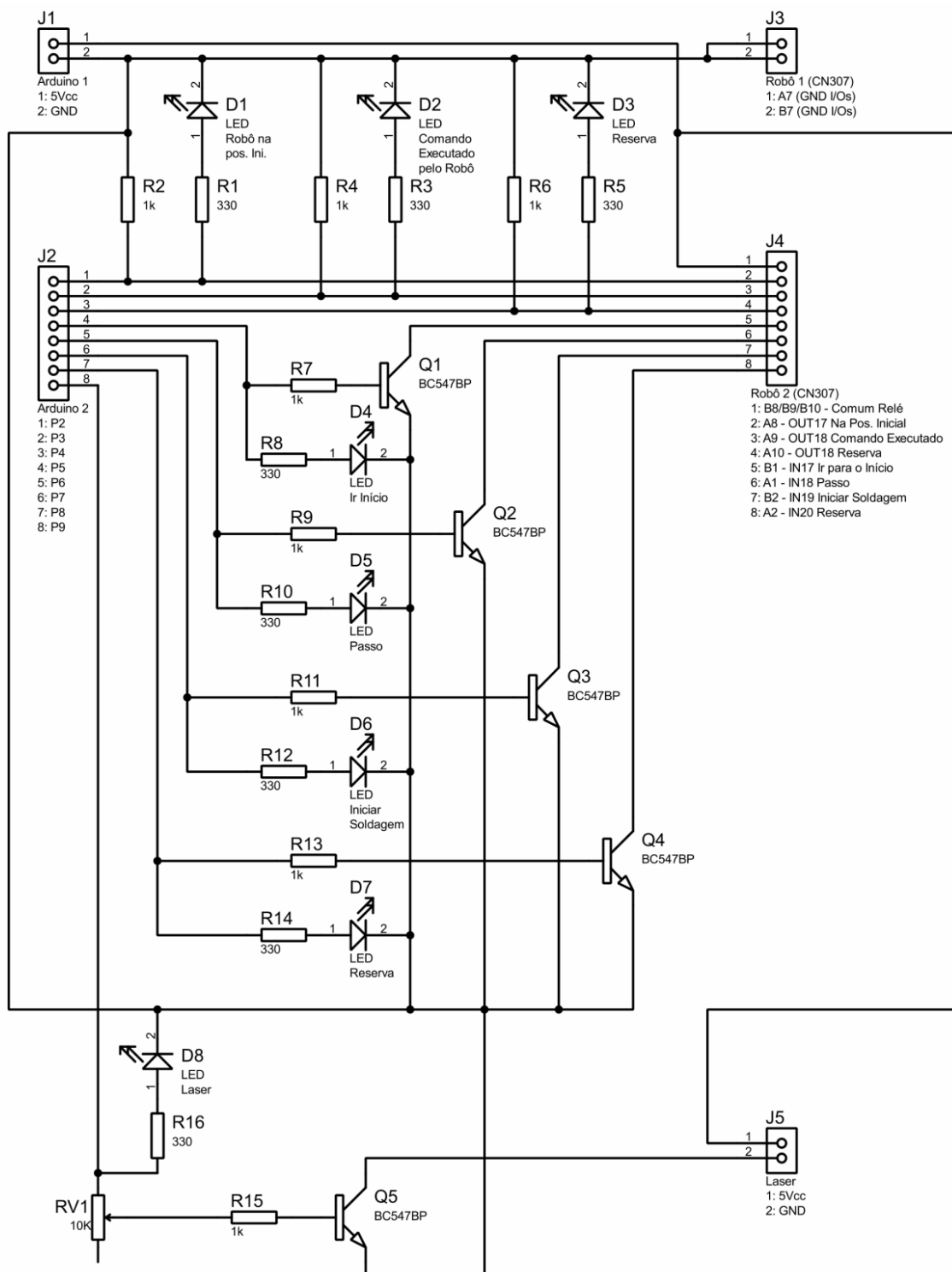
SOLOMON, Chris; BRECKON, Toby. **Fundamentos de Processamento Digital de Imagens: Uma Abordagem Prática com Exemplos em Matlab.** Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013.

SOUZA, Jhonata Serra de; CARDOZA, Jorge Alexander Sosa. **Sensores de Imagem Digitais CCD E CMOS.** Artigo. VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, 2012.

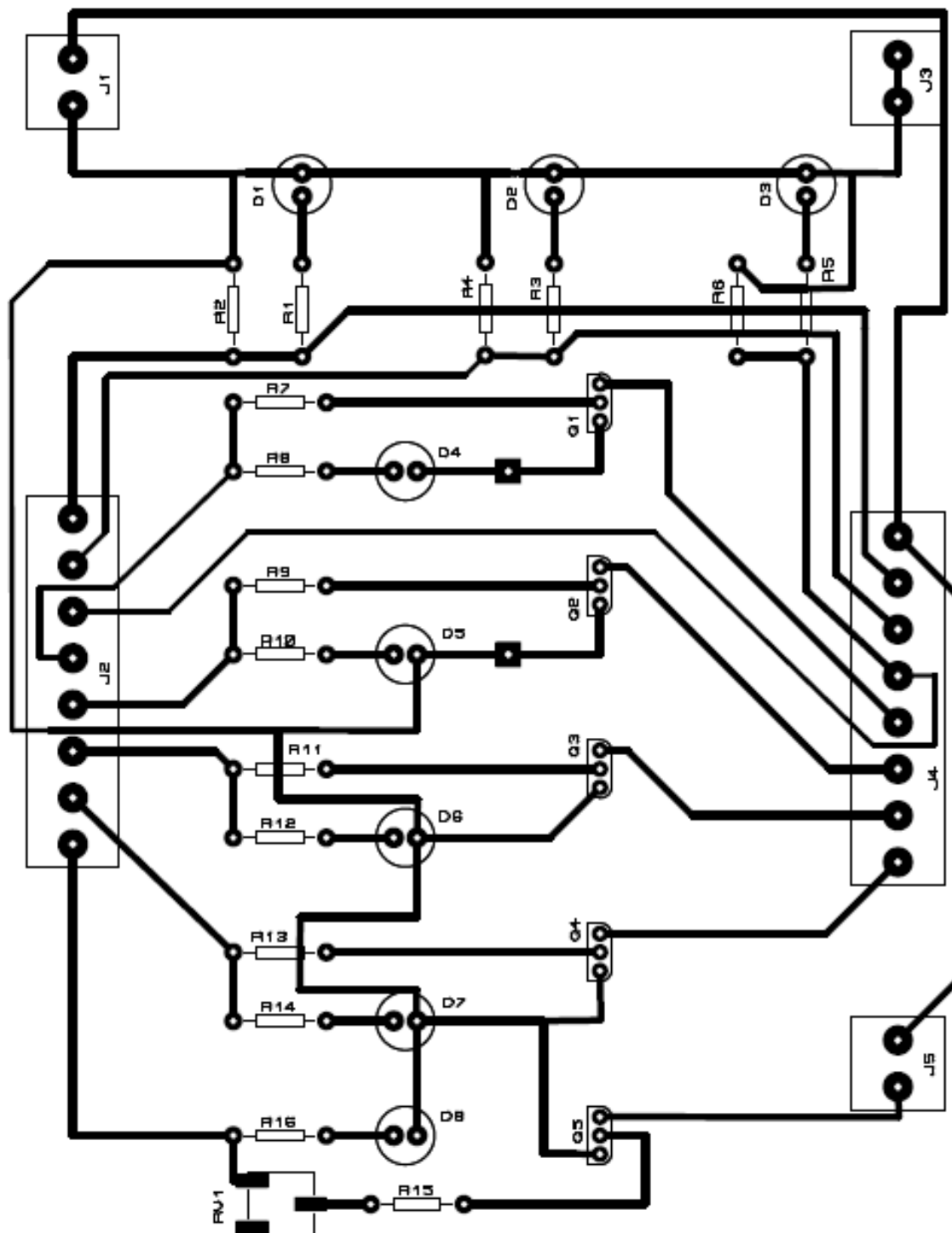
STIVANELLO, Maurício Edgar. **Algoritmos para medição de superfícies em movimento usando visão 3D.** 2013. 149p. Tese. Doutorado em Engenharia de Automação e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

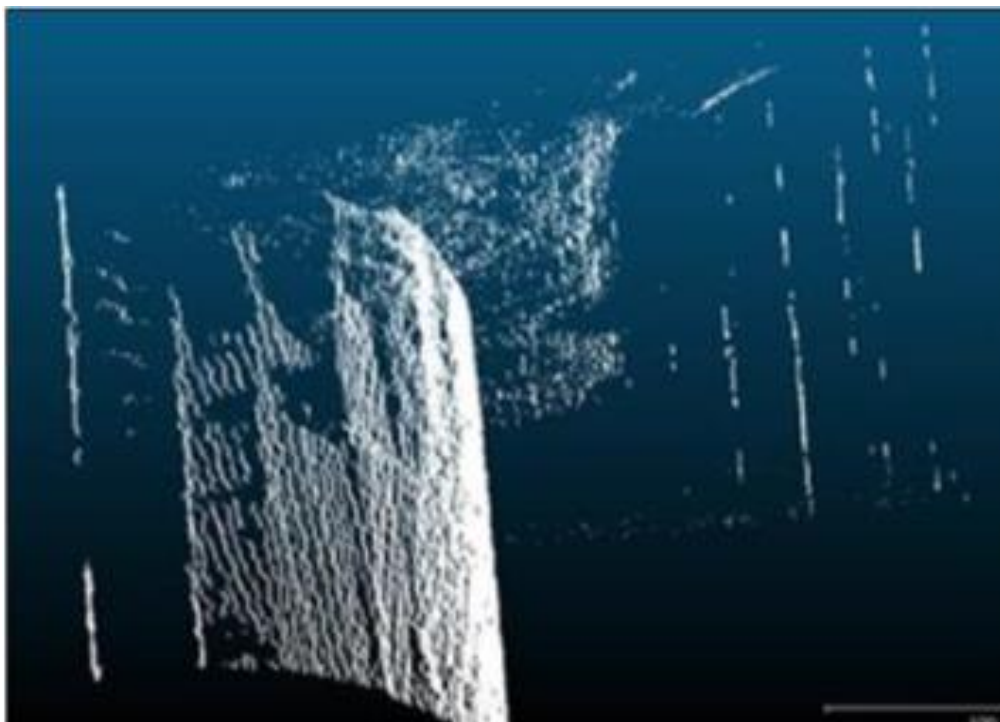
STIVANELLO, Maurício Edgar; et. al. **Desenvolvimento de um sistema de medição 3D por triangulação laser aplicado à caracterização de superfícies metálicas.** Artigo. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

APÊNDICE A - DIAGRAMA ELÉTRICO INTERFACE COM O ROBÔ YASKAWA






APÊNCIDE B – Trilhas e componentes placa eletrônica de interface



APÊNDICE C – Nuvem de pontos de peça metálica sem tratamento

ANEXOS

ANEXO A – Especificações da exatidão

	Versão 1 Contrabalanço travado rígida.	Versão 2 Contrabalanço com sistema de trava.
		

Romer Absolute Arm – Exatidões do Contato

Os dados seguintes representam as exatidões dos distintos tamanhos e níveis do ROMER Absolute Arm.

Todos os valores se referem ao padrão the ASME B89.4.22 e são mostrados em milímetros.

Todas as especificações dos apalpadores são atingidas com o ROMER Absolute Arm montado em uma placa base ou placa base magnética e utiliza um apalpador esférico de 15 mm, em aço, com um comprimento de 50 mm em condições estáveis do ambiente.

	Exatidão Volumétrica		Repetitividade do Ponto Simples	
	73	75	73	75
Versão 1				
2000 (6 pés)	±0.061	±0.033	±0.044	±0.023
2500 (8 pés)	±0.069	±0.039	±0.049	±0.028
3000 (10 pés)	±0.110	±0.066	±0.085	±0.048
3500 (12 pés)	±0.136	±0.093	±0.108	±0.061
4000	±0.168	±0.106	±0.120	±0.074
4500	±0.198	±0.126	±0.156	±0.088
Versão 2				
2000 (6 pés)	±0.061	±0.033	±0.044	±0.023
2500 (8 pés)	±0.069	±0.038	±0.049	±0.027
3000 (10 pés)	±0.100	±0.058	±0.079	±0.042
3500 (12 pés)	±0.125	±0.081	±0.099	±0.055
4000	±0.151	±0.098	±0.115	±0.067
4500	±0.179	±0.119	±0.141	±0.084

Fonte: (ROMER, 2012).

ANEXO B – Especificações do escâner RS1

Especificações Técnicas	
Posicionamento	150 mm ± 50 mm
Pontos por linha	1000
Resolução da linha (máx.)	0,046 mm
Comprimento da linha laser	65 ± 20 mm (depende da altura)
Frequência	30 Hz
Taxa dos dados	30 000 pts / s
Exatidão do escâner	30 µm
Imunidade à luz do ambiente	10 000 Lux
Ângulo de triangulação	24°
Peso	340 g
Temperatura disponível	5 a 40° C
Comunicação do PC	Ethernet LAN
Temperatura de armazenamento	-25 to 70 °C
Classe do laser	2
Máxima potência	<1,8 mW AE
Comprimento de onda	658nm, 635nm
	Cumprir com os padrões de desempenho, da FDA, para produtos laser, exceto para os desvios, nos termos do Laser Notice N° 50, de 24 de junho de 2007.

Fonte: (ROMER, 2012).