

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Fabício Páris

APLICAÇÃO DE VISÃO DE MÁQUINA PARA GERAÇÃO DE PONTOS
DE TRAJETÓRIA NUM PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADO

Passo Fundo

2015

Fabício Páris

**APLICAÇÃO DE VISÃO DE MÁQUINA PARA GERAÇÃO DE PONTOS
DE TRAJETÓRIA NUM PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADO**

Orientador: Prof. Dr. Jocarly do Patrocínio de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Passold

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2015

Fabício Páris

APLICAÇÃO DE VISÃO DE MÁQUINA PARA GERAÇÃO DE PONTOS DE TRAJETÓRIA NUM PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 29 de maio de 2015.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Jocarly do Patrocínio de Souza
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Fernando Passold
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Guilherme Holsbach Costa
Universidade de Caxias do Sul - UCS

*Dedico este trabalho a minha noiva Daniele e
a meus pais, Vilmar e Marli.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à minha mãe Marli Michelin Páris, meu pai Vilmar J. Páris e minha noiva Daniele Silveira pelo carinho, atenção, compreensão e total apoio durante a realização do mestrado, mantendo-me motivado nas incansáveis viagens da cidade de Caçador (SC) à UPF na cidade de Passo Fundo (RS).

Agradeço ao Professor Dr. Charles Leonardo Israel, Coordenador do Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação da UPF que lançou-me o desafio de desenvolver este trabalho em questão, o qual me proporcionou aplicar conhecimentos avançados referentes à área da minha graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Um especial agradecimento ao meu orientador Professor Dr. Jocarly do Patrocínio de Souza e ao meu Coorientador Professor Dr. Fernando Passold que se dispuseram a orientar o meu trabalho, direcionando-me da melhor forma possível para o desenvolvimento do projeto.

Como também especialmente agradeço ao meu grande amigo e colega de Profissão o Eng^o Julio Cesar Carvalho, pela fundamental ajuda e as horas dedicadas a me auxiliar com dedicação e atenção, tornando possível a execução das etapas deste projeto. Da mesma forma, agradeço o admirável empenho e comprometimento da minha aluna na época e atualmente Eng^a Mayne Francieli Gonçalves e meu amigo e aluno de graduação em Engenharia de Controle e Automação, Phelipe Viski, que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, desde a idéia conceitual à aplicação prática do sistema de visão, não podendo deixar de registrar aqui um dos momentos de descontração da frase marcante do Sr. Phelipe ressaltando que: “...esse igual é diferente!”

Quero agradecer ao Rogério Pasinato pela amizade e companheirismo em sala de aula no mestrado, a parceria nas viagens, a hospitalidade na casa de seus pais na cidade de São José do Ouro (RS), as tantas conversas e risadas durante este período.

Registro aqui também, um fraternal agradecimento aos Professores Ms. Antônio Pedro Tessaro e Ms. Everaldo Cesar de Castro, pelo apoio e incentivo para cursar o mestrado.

Finalmente, agradeço a todos os colegas de mestrados, amigos, professores e familiares, que de alguma maneira me ajudaram na conquista de mais este degrau em busca do conhecimento e capacitação profissional.

*Uma imagem vale mais que mil palavras.
Autor Anônimo.*

RESUMO

O presente trabalho aborda o desenvolvimento e aplicação de um sistema de visão de máquina 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. A etapa de aquisição da imagem é efetuada por meio da utilização de uma *webcam*, a qual foi calibrada, gerando-se os parâmetros intrínsecos e extrínsecos, atribuindo maior precisão ao sistema na realização da captura da imagem. A área específica de captura é constituída por uma mesa projetada para fixação das chapas de aço, caracterizando assim a estação de referência de trabalho. O sistema de processamento de imagens desenvolvido permite identificar automaticamente os *pixels* correspondentes à junta retilínea para soldagem, utilizando limiarização pelo *Método de Otsu* e algoritmos morfológicos, ou então, de forma semiautomática através da indicação manual da sequência dos pontos sobre a imagem da junta, constituindo assim o caminho correspondente à geometria desta. A posição de cada ponto é então processada e transformada em coordenadas cartesianas, e enviada para a unidade de controle do robô, que efetua a trajetória, simulando um processo de soldagem. A transmissão ao controlador do robô é realizada em protocolo específico, via porta serial.

Palavras-chave: Sistemas de visão. Processamento digital de imagens. Soldagem robotizada. Automação de processos.

ABSTRACT

The current paper approaches the development and applying of a machine vision system for obtaining global coordinate points (X, Y) , regarding images captured from a rectilinear joint from a top of steel sheets to be welded through the MIG/MAG process, ending up on its trajectory and sending it to the control unit to be done by the robot. The stage of the image acquisition is done through the usage of a webcam, which was gauged, this way creating the intrinsic and extrinsic parameters, giving the system more precision on the image capture. A table, projected for the fixing of the steel sheets, characterizing this way the work reference station, constitutes the specific area for capture of the image. The system of image processing allows us to identify automatically the pixels correspondent to the rectilinear joint for welding, using thresholding through the *Otsu Method* and morphological algorithms, or so, in a semi-automatic way, through a manual indication of point sequence over the joint image, making the path corresponding to the geometry of it. The position of each point is, then, processed and transformed in Cartesian coordinates, and sent to the robot control unit, which makes the trajectory, simulating a welding process. The transmission to the robot controller is made in a specific protocol, via serial port.

Key-words: Vision systems. Processing of digital Images. Robot Welding. Automation of Processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Percentual mundial de aplicações de robôs do primeiro trimestre de 2014 – RIA.	18
Figura 2 – Controle de um robô através de um sistema de visão.	23
Figura 3 – Sistema de visão de máquina com rastreamento da junta para soldagem em tempo real.	24
Figura 4 – Princípio de funcionamento do processo GMAW	27
Figura 5 – Composição básica de um sistema de soldagem MIG/MAG.	28
Figura 6 – Juntas básicas de união por soldagem.	30
Figura 7 – Configurações básicas mais empregadas em robôs industriais de soldagem.	32
Figura 8 – Célula de soldagem a arco (proteções ocultadas para melhor visualização).	33
Figura 9 – Etapas de um sistema de processamento de imagens.	37
Figura 10 – Componentes de um sistema de processamento de imagens de uso geral.	38
Figura 11 – Imagem binária; tipo de dado de <i>pixel</i> : inteiro (0 ou 1).	39
Figura 12 – Imagem em escala de cinza de 8 bits; tipo de dado de <i>pixel</i> : inteiro (0→255).	40
Figura 13 – Matriz 3D, RGB 24 bits.	41
Figura 14 – Ilustração do espaço de cor RGB como um cubo.	42
Figura 15 – A carga do CCD é movida <i>pixel a pixel</i> e convertida em tensão na saída. No CMOS a carga é convertida em tensão em cada <i>pixel</i> .	45
Figura 16 – Sistemas de coordenadas para correspondência de pontos no espaço do objeto na imagem.	47
Figura 17 – Padrões de calibração bidimensional de câmeras digitais.	49
Figura 18 – Imagem ideal (a), imagens distorcidas (b) e (c).	50
Figura 19 – Tipos de iluminação na visão de máquina.	51
Figura 20 – Três formas básicas de representar $f(x, y)$.	53
Figura 21 – Região de interesse da imagem em representação matricial 5 x 5 <i>pixels</i> .	55
Figura 22 – Efeitos de redução da resolução espacial (em <i>pixels</i>).	56
Figura 23 – Tipos de vizinhança-4 e vizinhança-8 de um <i>pixel</i> .	57
Figura 24 – Exemplos de operações aritméticas em imagens monocromáticas.	59
Figura 25 – Ilustração de operações lógicas envolvendo <i>pixels</i> .	61
Figura 26 – Região de vizinhança 3 x 3 <i>pixels</i> .	63

Figura 27 – Funcionamento da filtragem espacial linear utilizando uma máscara 3 x 3 <i>pixels</i>	64
Figura 28 – Quatro tipos básicos de imagens e seus histogramas correspondentes.	67
Figura 29 – Histograma de intensidade dividido por um único limiar T	69
Figura 30 – Processo de limiarização.	70
Figura 31 – Operação morfológica de erosão em imagem binária.	72
Figura 32 – Operação morfológica de dilatação em imagem binária.	73
Figura 33 – Operação morfológica de extração de fronteira de um objeto em imagem binária.	76
Figura 34 – Localização dos sistemas de referência padrões.	78
Figura 35 – Rotações RPY e correspondência usual num punho de robô.	79
Figura 36 – Modelo cinemático do robô RV-2AJ com 5 GDL.	80
Figura 37 – Sistema de referência de elos fixados através da representação de D-H.	82
Figura 38 – Parâmetros de D-H atribuídos ao RV-2AJ.	83
Figura 39 – Bancada de testes.	87
Figura 40 – Mesa de fixação das chapas de aço, para aquisição de imagens.	88
Figura 41 – <i>Webcam</i> Logitech, modelo C920.	89
Figura 42 – Interface do <i>Ciros Programming</i>	90
Figura 43 – Processo de calibração da <i>webcam</i> Logitech C920.	91
Figura 44 – Representação da distorção da imagem fornecida pela <i>webcam</i> Logitech C920 .	92
Figura 45 – Testes para especificação da cor para área de fundo.	93
Figura 46 – Sistema de aquisição de imagem da junta para soldagem.	95
Figura 47 – Teste de aquisição de imagens da junta a ser soldada.	96
Figura 48 – Delimitação da região de interesse.	97
Figura 49 – Modo automático do processamento de imagens da junta a ser soldada.	99
Figura 50 – Modo semiautomático do processamento de imagem da junta a ser soldada.	100
Figura 51 – Coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos obtidos pelo modo automático de detecção da junta.	101
Figura 52 – Coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos obtidos pelo modo semiautomático de detecção da junta.	102
Figura 53 – Fluxograma do funcionamento da interface de comunicação entre aplicativo e o robô.	104

Figura 54 – Interface do aplicativo para o sistema de visão de máquina aplicado a soldagem robotizada.	105
Figura 55 – Fluxograma das rotinas principais do aplicativo.....	106
Figura 56 – Procedimento inicial para calibração do sistema.	107
Figura 57 – Seleção da área de interesse.	108
Figura 58 – Detecção de junta pelo aplicativo no modo automático.....	109
Figura 59 – Detecção de junta pelo aplicativo no modo semiautomático.....	110
Figura 60 – Chapas de aço utilizadas nos testes.....	112
Figura 61 – Bancada de testes com suporte para pincel marcador permanente.	113
Figura 62 – Resultados obtidos dos testes de validação experimental do sistema de visão pelo modo automático.	114
Figura 63 – Resultados obtidos dos testes de validação experimental do sistema de visão pelo modo semiautomático.....	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes básicos de um sistema para soldagem robotizado.	32
Tabela 2 – Simbologia dos parâmetros de Denavit-Hartenberg.....	81
Tabela 3 – Parâmetros de D-H do robô RV-2AJ.....	82
Tabela 4 – Configurações da comunicação serial	86
Tabela 5 – Especificação da comunicação serial RS232.....	103
Tabela 6 – Comandos e Funções de operação do robô RV-2AJ.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RIA	<i>Robot Industries Association</i>
IFR	<i>International Federation of Robotics</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas/Metal Active Gas</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
LBW	<i>Laser Beam Welding and Cutting</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding and Cutting</i>
RSW	<i>Resistance Spot Welding</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
GDL	<i>Graus de Libertade</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
CD-ROM	<i>Compact Disc Read-Only Memory</i>
2D	<i>Duas Dimensões</i>
3D	<i>Três Dimensões</i>
VGR	<i>Vision-Guided Robotic System</i>
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
NTSC	<i>National Television System(s) Committee</i>
CCD	<i>Charge Couple Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
XGA	<i>Extend Graphics Array</i>
QXGA	<i>Quad-Extended Graphics Array</i>
HXGA	<i>Hyper-Extended Graphics Array</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
MAT	<i>Medial Axis Transformation</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>

RPY	<i>Roll-Pitch-Yaw</i>
EIA	<i>Electronic Industries Association</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
COM	<i>Communication port</i>
USB	<i>Universal Serial Barrament</i>
UNIARP	Universidade Alto Vale do Rio do Peixe
UPF	Universidade de Passo Fundo
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
HD	<i>Hard Disk</i>
D-H	<i>Denavit-Hartenberg</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	Estrutura do Trabalho	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Estado da Arte	22
2.1.1	Aplicação de sistemas de visão de máquina	22
2.2	Soldagem Robotizada	24
2.2.1	Processos de soldagem ao arco elétrico e robotização	26
2.2.1.1	Processo de soldagem GMAW	27
2.2.1.2	Tipos de juntas e tolerâncias para o processo de soldagem GMAW	29
2.2.2	Robôs industriais e aplicação em soldagem	31
2.2.2.1	Classificação dos robôs industriais para soldagem	31
2.2.3	Limitações da soldagem robotizada	34
2.3	Visão de Máquina	35
2.4	Imagem	39
2.4.1	Tipos de imagens e dados	39
2.5	Aquisição de Imagens	43
2.5.1	Câmeras	44
2.5.2	Fator iluminação	50
2.6	Digitalização da Imagem	52
2.6.1	Modelo matemático de imagem digital monocromática	53
2.6.2	Amostragem e Quantização	54
2.7	Relacionamentos Básicos entre <i>Pixels</i>	56
2.7.1	Vizinhança entre <i>pixels</i>	57
2.7.2	Conectividade, adjacência, regiões e fronteiras	57
2.7.3	Operações lógicas e aritméticas	58
2.8	Pré-Processamento de Imagens	61

2.8.1	Realce de imagens	62
2.8.2	Histograma	65
2.9	Segmentação	68
2.9.1	Limiarização	68
2.10	Processamento Morfológico de Imagens	72
2.10.1	Erosão.....	72
2.10.2	Dilatação	73
2.10.3	Abertura e fechamento morfológicos	74
2.10.4	Afinamento	75
2.10.5	Esqueletização	75
2.10.6	Extração de contornos	76
2.11	Geração de Trajetórias	77
2.11.1	Orientação do punho	79
2.11.2	Modelo cinemático do robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ	79
2.11.3	Representação de Denavit-Hartenberg.....	81
2.12	Interfaces de Comunicação	85
2.12.1	Comunicação serial.....	85
3	MATERIAIS E MÉTODOS	87
3.1	Materiais, Equipamentos e <i>Softwares</i>	87
3.2	Desenvolvimento do Sistema de Visão.....	90
3.2.1	Calibração da câmera.....	91
3.2.2	Especificação do fundo	92
3.2.3	Aquisição da imagem da junta.....	94
3.2.4	Processamento de imagem da junta	97
3.2.5	Geração das coordenadas de pontos para trajetória.....	100
3.2.6	Interface de comunicação.....	103
3.3	Aplicativo	104
3.3.1	Descrição e utilização do aplicativo.....	106
4	VALIDAÇÃO E RESULTADOS	112
4.1	Validação Experimental do Sistema de Visão	112
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
	REFERÊNCIAS	119

ANEXO I.....	124
ANEXO II.....	125

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação mecânica passam constantemente por progressivas modificações, obedecendo a critérios de organização e programação da produção, demandando um importante trabalho de planejamento estratégico da manufatura para readequar o layout da linha de produção e implantar novas tecnologias, visando otimizar o processo e potencializar a capacidade produtiva.

Neste contexto, destaca-se a crescente tendência à robotização industrial das células de manufatura, a qual oferece soluções inovadoras aplicáveis aos processos de fabricação, onde segundo a RIA - *Robot Industries Association* (2014), o principal setor de aplicação de robôs no chão de fábrica é a soldagem, principalmente com arco elétrico, mostrando-se como técnica alternativa para impulsionar um aumento substancial de produção. A robotização de processos propicia benefícios, como a redução de custos, melhoria da qualidade, eficiência e confiabilidade, através do controle, supervisão e gerenciamento integrado ao processo operacional de fabricação, agregando ganhos significativos, devido à capacidade dos robôs apresentarem repetitividade e precisão durante todo o ciclo de operação, trabalhando por longos períodos de tempo sem intervalos de descanso.

Todavia, os movimentos que um robô de soldagem executa dependem de um programa específico pré-concebido, demandando operadores treinados para realizar a programação específica da trajetória de cada junta diferente a ser soldada. Entretanto, este procedimento pode apresentar problemas inerentes à execução devido a vários fatores como o grande número de parâmetros variáveis, erro de gravação de pontos da trajetória, complexidade, demanda excessiva de tempo e etc.

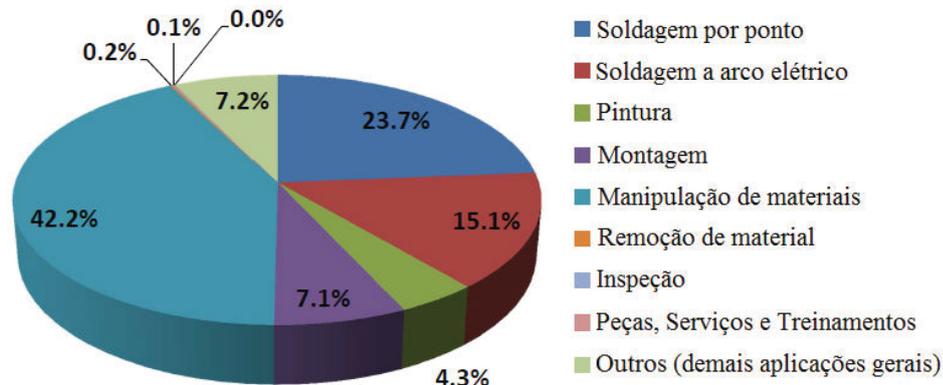
Dessa forma, os problemas constatados que podem ocorrer durante a programação dos movimentos dos robôs, despertaram o interesse pelo tema de pesquisa a ser abordado, que é o de conferir maior autonomia ao robô em um processo de soldagem de chapas de aço, por meio da aplicação de um sistema de visão de máquina, que consiste na captura e processamento de imagens para reconhecer as bordas das chapas de uma junta a ser soldada, propiciado assim a automatização da tarefa de programação e gravação dos pontos da trajetória dos movimentos do robô, minimizando a interferência do operador.

1.1 Justificativa

A tendência à robotização de processos industriais pode ser evidenciada verificando-se os indicadores das pesquisas realizadas pela IFR - *International Federation of Robotics* (2014), que apontam para o número de 178.132 mil unidades de robôs industriais vendidas em 2013, sendo de longe, o maior nível já registrado por um ano, chegando à marca de 12% a mais que o ano de 2012. A IFR ainda informa que, mesmo com o desenvolvimento incerto da economia global no ano de 2014, estima-se um aumento nas instalações de robôs em cerca de pelo menos 15%, chegando ao total de 205 mil unidades.

Entre as aplicações de robôs, mundialmente mais utilizadas, conforme os dados da Associação de Indústrias de Robôs (*Robot Industries Association* - RIA) referente ao primeiro trimestre de 2014 – representado pelo gráfico da Figura 1 –, é possível evidenciar os notáveis percentuais das utilizações de robôs industriais em processos de solda por ponto (23,7%) e solda a arco elétrico (15,1%).

Figura 1 – Percentual mundial de aplicações de robôs do primeiro trimestre de 2014 – RIA.



Fonte: RIA, 2014.

A robotização de processos de soldagem a arco é resultante de uma série de fatores atribuídos principalmente às exigências das indústrias em aumentar a capacidade produtiva, através da automatização dos processos de fabricação. À vista disso, o nível de competitividade entre os fabricantes de robôs é muito alto, a fim de produzir robôs de alta performance para atender as demandas industriais. No caso das aplicações de robôs para soldagem, há avanços em uma série de aspectos, tais como integração à sistemas dinâmicos para controle de planejamento da trajetória, rastreamento da junta a ser soldada, capacidade de reprodução e etc. (HUSSIN, DAUT, 2013).

Em geral, a soldagem robotizada ainda exige que os operadores humanos identifiquem a localização das juntas para soldagem e em seguida realizem programação dos robôs para soldá-las. O operador humano pode levar uma quantidade significativa de tempo e custo para programar o robô para soldar peças novas. Isso pode ser justificado em um ambiente de produção em massa, no qual o volume compensa os custos iniciais de programação do robô a cada nova peça. No entanto, para volumes de médias e baixas aplicações em processos de fabricação, o tempo e o custo da necessidade constante de programar um robô para cada novo ciclo de produção, reduz as vantagens de sua utilização. Por isso, pode ser mais eficiente a soldagem manual (FANG, DINHAM, 2012).

Tratando-se então da programação de robôs de soldagem, Groover (2011) aponta um problema onde o “... processo de posicionamento de ambos (robô e posicionador), normalmente é realizado através do processo conhecido como ponto-a-ponto ou *leadthrough*”, fazendo-se necessário que o programador conduza o robô através de cada ponto da trajetória a ser executada, sendo que cada ponto deve ser gravado na memória do robô, tornando o sistema de programação de um robô de soldagem demorado, além de poder causar a interrupção do processo de produção durante a programação.

Grassi (2005) ressalta que, “... apesar do emprego de robôs industriais estar plenamente estabelecido em tarefas repetitivas e que dependam apenas de um programa pré-concebido que lida com parâmetros fixos, o mesmo não se pode dizer do campo em que se tratam parâmetros variáveis”. À vista disto, o autor explana sobre a necessidade de se realizar uma programação que se auto-adapte, vislumbrando assim a vantagem da não necessidade de constante intervenção humana em tarefas industriais.

Diante destes fatos, Pedrini e Schwartz (2008) citam a visão de máquina como uma alternativa que procura auxiliar a resolução de problemas altamente complexos, podendo imitar a habilidade de cognição humana na tomada de decisões conforme as informações contidas em uma imagem. O principal objetivo do processamento digital de imagens é o de obter uma descrição que contenha informação suficiente para distinguir entre diferentes objetos de interesse, de forma confiável. Consiste em um conjunto de técnicas para capturar, representar e transformar imagens com o auxílio do computador, resultando na interpretação automática por meio de máquinas, minimizando a intervenção humana.

Logo, com relação às dificuldades evidenciadas à programação de robôs para soldagem, e no âmbito de tornar automática a execução de tarefas complexas, remete-se a

soluções por meio da implementação de sistemas de visão de máquina, os quais tem desempenhado um papel de forma eficiente, propiciando maior agilidade, confiabilidade e precisão no processo de soldagem robotizada com parâmetros fixos e variáveis.

Tendo em vista também que, os sistemas fechados comerciais de visão de máquina disponíveis no mercado, providos de tecnologia consolidada (equipamentos e softwares para captura da imagem, processamento e hardware de comunicação), apresentam alto custo agregado para sua implementação. Serviram de motivação neste trabalho para o desenvolvimento de um aplicativo de processamento de imagens digitais, utilizando os recursos de um software de funções lógicas, junto a materiais e equipamentos com custos acessíveis. Assegurando de forma integrada a obtenção da trajetória para um robô executar a soldagem MIG/MAG de chapas de aço, com juntas retilíneas de topo, que podem variar de dimensões e orientações. As quais demandariam maior tempo para que o operador humano do robô realizasse a programação, sendo que com o sistema de visão de máquina desenvolvido para este fim propicia a otimização deste processo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de processamento de imagens para geração de pontos de trajetória, visando sua aplicação num processo robotizado de soldagem MIG/MAG de chapas de aço, com juntas retilíneas de topo.

1.2.2 Objetivos específicos

O sistema a ser desenvolvido buscará atender os seguintes objetivos específicos:

- a) Estudar algoritmos de processamento de imagens;
- b) Desenvolver um aplicativo para processamento e reconhecimento de imagens da junta de topo retilínea de chapas de aço a serem soldadas pelo robô;
- c) Gerar os pontos de coordenadas globais (X,Y) , para que o robô realize a trajetória;

- d) Estabelecer comunicação entre o aplicativo do sistema de visão e a unidade controladora do robô;
- e) Realizar testes para validar o sistema.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está subdividido em 5 capítulos para melhor entendimento da proposta e desenvolvimento.

O capítulo dois apresenta o referencial teórico que fundamenta este trabalho. Nele são expostas as principais abordagens de soldagem robotizada, visão de máquina, geração de trajetórias e interfaces de comunicação.

No capítulo três estão descritos os materiais utilizados e os métodos aplicados que possibilitaram o desenvolvimento do sistema de visão de máquina proposto.

O capítulo quatro apresenta os resultados obtidos através da realização dos testes experimentais em laboratório para validação da aplicação do sistema de visão de máquina, culminando na obtenção dos pontos de coordenadas da junta de chapas de aço a serem sondadas por um processo robotizado e sua execução.

As conclusões são então apresentadas no capítulo 5, onde também se discute, as limitações do sistema desenvolvido e as sugestões de trabalhos futuros decorrente desse trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A base teórica de sustentação desse trabalho abrange o estado da arte quanto à aplicação de sistemas de visão de máquina, soldagem robotizada, processamento de imagens, geração de trajetória para manipuladores robóticos e comunicação entre sistemas.

2.1 Estado da Arte

A subdivisão de funções e aplicações de sistemas de visão de máquina apresentada no estado da arte, dado o nível de conhecimento e as ferramentas analíticas correntemente disponíveis neste campo, pode ser visualizada como uma aproximação prática para implementação desses sistemas associados ao controle de robôs em processos de soldagem (GRASSI, 2005; NIKU, 2013).

2.1.1 Aplicação de sistemas de visão de máquina

Os sistemas de visão de máquina são utilizados em vários tipos de aplicações, sendo comum sua implementação conjunta com células de manufatura robotizadas, em operações onde há necessidade de se obter informações do ambiente de trabalho (NIKU, 2013).

Neste contexto, quanto à associação de sistemas de visão com robôs, Foresti argumenta que:

Robôs dotados de um sistema de visão possuem maior flexibilidade, autonomia e certa inteligência artificial, permitida através de captura, processamento e interpretação de imagens de objetos cujas posições e orientações passam a ser conhecidas via sistema computacional de apoio associado ao controle do manipulador. São capazes de interagir com o meio de trabalho de forma a responder em tempo real a alterações operacionais (FORESTI, 2006).

As aplicações de sistemas de visão de máquina em processos industriais, de acordo com Groover (2011) podem ser classificadas em três grupos, sendo:

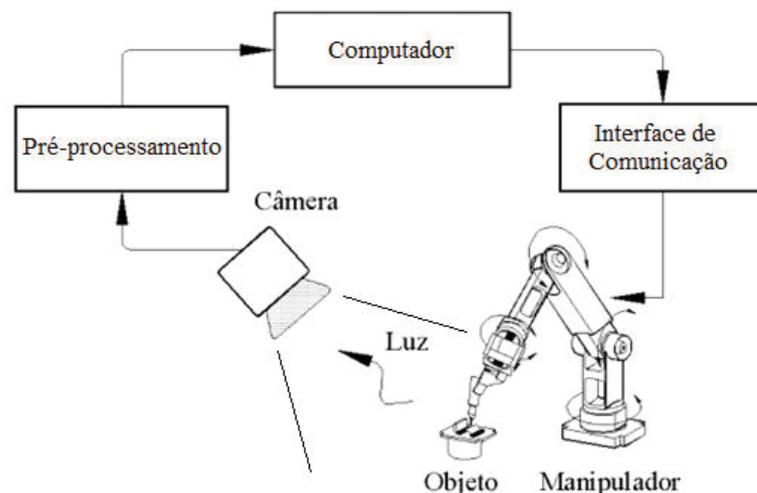
- **Inspeção:** tem como principal função auxiliar no controle da qualidade dos produtos durante o processo de fabricação e/ou finais. Estas aplicações envolvem o controle de medição e calibragem dimensional, verificação de presença de componentes em produtos montados, verificação da localização de furações e também da quantidade de furos em peças, detecção de falhas e defeitos superficiais. A inspeção pode ser realizada em sistemas de duas dimensões (2D) e/ou tridimensionais (3D);

- **Identificação:** caracteriza-se pela distinção e reconhecimento de peças e/ou objetos para que posteriormente seja realizada uma ação como, por exemplo, separação de peças, contagem de componentes iguais ou com geometrias diferentes ao longo de uma linha de transporte de produção e monitoramento de estoque. A identificação de peças é geralmente executada por sistemas de visão 2D;

- **Orientação e controle visual:** também conhecida como sistema robótico guiado por visão (do inglês, *vision-guided robotic system* – VGR). Este tipo de aplicação geralmente contempla o uso de um robô e/ou um equipamento similar em conjunto com um sistema de visão de máquina que possibilita, por exemplo, controlar o movimento do robô a partir do processamento de uma imagem, rastrear uma junta a ser soldada a arco contínuo, posicionar peças, corrigir a orientação do manipulador, pegar peças em movimento em transportadores ou mesmo peças que estão paradas, evitar colisões, operações de fabricação e montagem. Atualmente estas aplicações são possíveis devido às recentes otimizações de softwares que controlam as operações do sistema de visão computacional robótico (GROOVER, 2011).

No caso de uma aplicação de um sistema de visão de máquina, por exemplo, para rastrear uma junta a ser soldada e determinar a trajetória a ser executada por um robô, o sistema de visão pode fornecer diretamente a informação de controle cinemático do robô para determinar a posição e orientação do dispositivo de solda. Podendo ainda determinar o sinal de referência em função da informação visual da junta, e ser expresso no espaço de tarefas e variável segundo as condições do ambiente reconhecidas através da imagem do sistema de visão. A Figura 2 representa a aplicação de um sistema de visão associado ao controle de um robô (PAZOS, 2002).

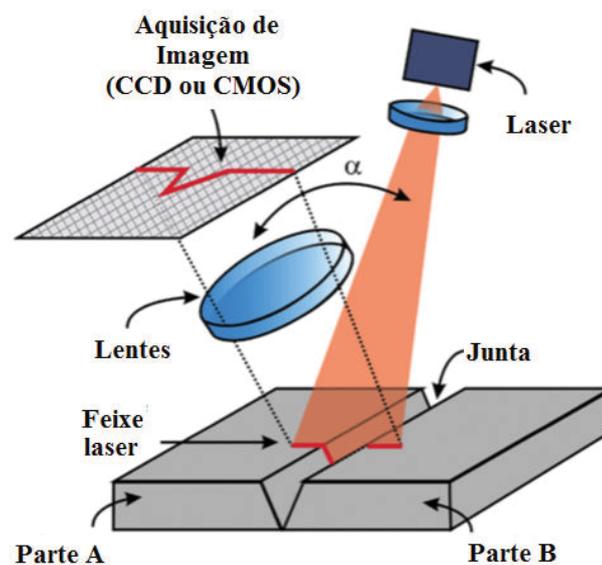
Figura 2 – Controle de um robô através de um sistema de visão.



Fonte: Adaptado de Pazos, 2002.

Seguindo esta linha de aplicações de sistemas de visão de máquina em processos de soldagem robotizados, destacam-se também os métodos que possibilitam a realização do rastreamento da junta a ser soldada que executam a correção em tempo real dos parâmetros atrelados ao processo de soldagem, quanto ao posicionando a ferramenta (tocha) à medida que o robô movimenta-se ao longo da trajetória de solda. Esta aplicação tem por objetivo aumentar a qualidade do cordão de solda obtida. Entretanto, estes métodos são geralmente sistemas fechados comercialmente e com tecnologia de alto custo de aquisição. Um exemplo de um sistema de visão de máquina, como este mencionado, é ilustrado na Figura 3, onde um sensor laser é posicionado próximo à ferramenta de solda, à frente dela, emitindo um feixe de laser de baixa potência que é projetado sobre a superfície das peças a serem soldadas. A luz difundida é refletida e entregue de volta, sob a forma de uma imagem a um sensor de aquisição CCD ou CMOS, em seguida o controlador extrai os sinais da imagem que podem ser usados, tanto para fins de inspeção ou de seguimento de solda. (JUNEGHANI; NURUKI, 2009).

Figura 3 – Sistema de visão de máquina com rastreamento da junta para soldagem em tempo real.



Fonte: Adaptado de Juneghani, Nuruki, 2009.

2.2 Soldagem Robotizada

A soldagem robotizada é uma forma específica de soldagem automática, sendo definida pela AWS (*American Welding Society*) "... como a soldagem feita com equipamento

(robô, manipulador, etc.) o qual executa operações de soldagem, após programação, sem ajuste ou controle por parte do operador de solda” (ROMANO, 2002).

Segundo Niku (2013) a soldagem robotizada é uma das aplicações mais comuns nas indústrias, ressaltando que um robô de solda pode provavelmente soldar com melhor qualidade que um soldador humano, onde as soldas produzidas pelo robô, devidamente ajustado ao processo, são muito uniformes e precisas, em virtude da movimentação do robô ser homogênea e consistente. Além disso, Moussa (2011) cita que as principais vantagens da utilização de robôs em processos de soldagem são as melhorias das condições de trabalho do ser humano, que deixa de trabalhar em altas temperaturas e de usar máscaras e roupas protetoras; redução de demanda de tempo na execução de trabalho, especialmente quando a solda é feita em curta trajetória; redução de custos, devido a pouca utilização de mão-de-obra altamente especializada e a habilidade de trabalho contínuo do robô (24 horas por dia), uma vez que os operadores humanos devem descansar ocasionalmente, devido às condições difíceis de soldagem, além de garantir sempre a mesma qualidade da solda.

Diversos são os fatores que motivam as aplicações de soldagem robotizada como Merrifield (2005) e Villafuerte (2005) evidenciam:

- A dificuldade de se encontrar no mercado de trabalho, soldadores experientes e hábeis, o que supervalorizou a mão-de-obra deste profissional;
- A eliminação de fatores inerentes à sociedade e seres humanos, que de alguma forma afetam o desempenho no processo de manufatura, resultando em quebras de componentes/peças, retrabalho, férias do operador, doenças adquiridas, entre outros;
- O consequente aumento de produtividade, repetitividade e flexibilidade proporcionada pelos manipuladores robóticos.

A aplicação da soldagem robotizada na indústria conforme Henriques (2005) divide-se em dois grandes grupos, sendo a de soldagem a ponto, principalmente utilizada na indústria automobilística, onde os movimentos dos robôs são programados para se deslocar em uma trajetória de ponto a ponto; e o processo de soldagem em trajetória contínua na junção de peças, processo este em que o robô efetua o movimento de transição entre pontos conduzindo a tocha de soldagem ao longo de uma trajetória contínua definida no espaço cartesiano, seguindo as definições de posição e orientação de cada ponto.

2.2.1 Processos de soldagem ao arco elétrico e robotização

A definição de arco elétrico é dada por Udin; H. apud Brandi et al. (2004) sendo como: "... a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (catodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido". Brandi (2004) também salienta que o arco elétrico para soldagem a descarga elétrica tem baixa tensão e alta intensidade.

Moreira (2008) evidencia em sua pesquisa que desde a descoberta do arco elétrico em 1801 por Sir Humphrey Davy, o processo de soldagem elétrica vem evoluindo ao longo das décadas até os dias atuais, citando o desenvolvimento de estudos da soldagem por resistência elétrica de Thomson em 1877 e os estudos de soldagem por arco de N. Bernardo e S. Olszewski em 1885, passando pela utilização do gás inerte como proteção do arco elétrico por H. M. Hobart e P. K. Denver em 1929.

Atualmente, entre os vários processos de soldagem, o de arco elétrico tem se destacado por sua tendência a robotização. A RIA (2014) aponta um total de 38,8% da aplicação no mercado mundial de robôs industriais destina-se a esta finalidade.

Os principais processos de soldagem e corte com interface com os robôs industriais existentes, são (ROMANO, 2002):

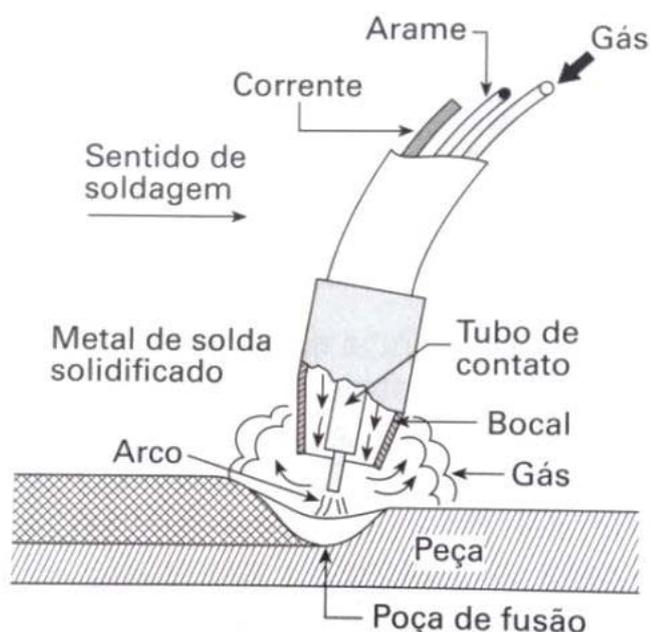
- GMAW, (*gas metal arc welding*), processo de soldagem com eletrodo contínuo sob proteção gasosa;
- GTAW, (*gas tungsten arc welding*), soldagem TIG (*tungsten inert gas*);
- LBW, (*laser beam welding and cutting*), soldagem e corte a laser;
- PAW, (*plasma arc welding and cutting*), soldagem e corte a plasma;
- RSW, (*resistance spot welding*), soldagem por resistência elétrica por pontos.

Tung (2004) e Felizardo et al. (2007) enfatizam que dentre os principais processos de soldagem, o GMAW destaca-se dos demais quando se trata da robotização de soldagem, salientando quanto à versatilidade e a facilidade para automação deste, justificando que isto se deve as características de trabalho que normalmente consistem em operações repetidas com trajetórias fixas, e a possibilidade dos controladores serem pré-programados para operar juntos em pontos determinados. Felizardo et al. (2007) também argumenta que alguns pesquisadores estão implementando junto a estes processos equipamentos de visão, sensores ou modelos matemáticos na busca por maior otimização.

2.2.1.1 Processo de soldagem GMAW

Segundo a ASM (2011) a terminologia GMAW foi determinada pela AWS (*American Welding Society*), sendo reconhecida também, de acordo com ANSI/AWS A3.0-2010, como soldagem MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), devido ao emprego químico de gás de proteção inerte e gás ativo. A Figura 4 representa o esquema de funcionamento do processo GMAW.

Figura 4 – Princípio de funcionamento do processo GMAW

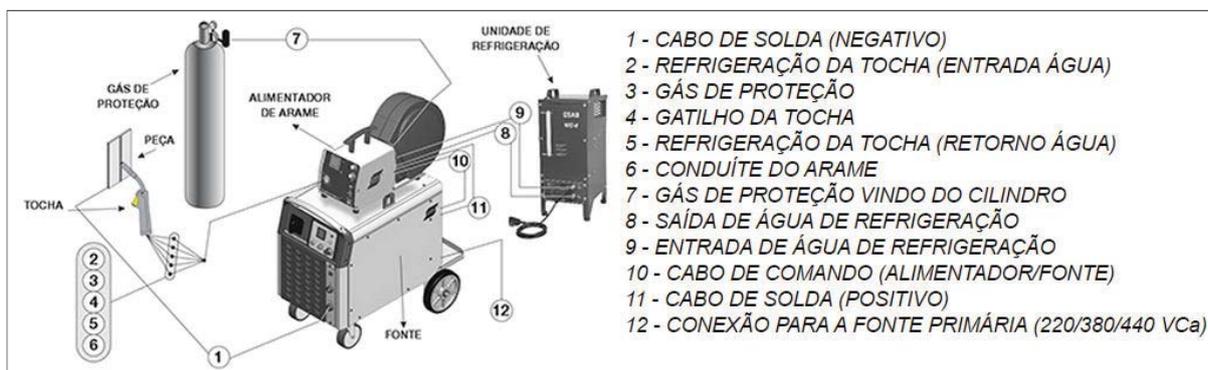


Fonte: Romano, 2002.

Em síntese o processo de soldagem GMAW emprega um arco elétrico que se estabelece entre a peça e um consumível (eletrodo) na forma de arame. O calor gerado pelo arco elétrico funde o arame (poça de solda) à medida que este é alimentado continuamente, formando assim o metal de solda que durante o movimento simultâneo de deslocamento da tocha de soldagem sobre a junta é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás (ou mistura de gases) inerte ou ativo. (ROMANO, 2002; FORTES, 2005; ASM, 2011).

Fortes (2005) apresenta um detalhamento do equipamento necessário para o processo de solda ao arco GMAW, o qual é composto por: fonte de energia de soldagem (tensão constante); alimentador de arame; fonte; tocha de soldagem; sistema de fornecimento de gás de proteção; como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Composição básica de um sistema de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Fortes, 2005.

As principais vantagens que o tornam a utilização do processo de soldagem GMAW como escolha popular para várias aplicações, são a flexibilidade e a alta produtividade. Além destas, podem ser citadas (ASM, 2011, tradução nossa):

- A alimentação contínua do arame (eletrodo) permite a realização de soldas em longos percursos, com altas taxas de deposição, sem paradas;
- Taxas de velocidade de soldagem e de deposição são tipicamente várias vezes mais altas do que a soldagem GTAW;
- GMAW pode ser implementado como um processo semi-automático, mecanizado, ou a operação automática (é o mais amplamente usado no processo de soldagem a arco robotizado);
- Pode ser usado em todas as posições, com procedimentos de soldagem adequados;
- Não produz escória pesada, não havendo a necessidade de remoção desta após operações de soldagem;
- GMAW geralmente produz menos fumaça e fumos que outros processos;
- Há muitas variações do processo GMAW que proporcionam vantagens adicionais para aplicações específicas em otimizações.

Tal como acontece com qualquer processo de soldagem, o GMAW tem limitações que restringem seu uso (ASM, 2011, tradução nossa).

- A alimentação contínua do eletrodo e o suprimento externo de fornecimento de gás de proteção torna o equipamento do processo mais complexo, menos portátil, e requer mais manutenção de rotina em comparação com a soldagem por eletrodo revestido;

- A interrupção da cobertura de gás de proteção e problemas de alimentação de arame, ou a manutenção inadequada da pistola (tocha) pode afetar a qualidade da solda;
- A execução da soldagem GMAW em ambientes externos (ao ar livre), pode exigir proteção de correntes de ar que podem perturbar o fluxo de cobertura do gás de proteção;
- A acessibilidade é limitada pela proximidade do bico da pistola com a peça de trabalho (geralmente inferior a 20 mm, ou 0,8 polegadas), a fim de manter a cobertura adequada de gás de proteção;
- Dependendo do processo de soldagem e consumíveis utilizados, o GMAW pode produzir respingos que irão aderir à peça de trabalho, pistola de soldagem, ou parte ferramental;
- A GMAW possui menor precisão quando comparada à GTAW e geralmente tem menor taxa de deposição, embora recentemente avanços nos equipamentos do processo de GMAW estão reduzindo estas limitações;
- Aceitação do operador pode ser reduzida devido o maior peso da pistola do GMAW, além da maior intensidade da luz irradiada pelo arco quando comparada a outros processos de soldagem ao arco elétrico.

2.2.1.2 Tipos de juntas e tolerâncias para o processo de soldagem GMAW

Alves (2009) caracteriza como junta a região que une as partes pela soldagem. Os tipos mais comuns de juntas básicas em processos de soldagem são: junta de topo; junta em “T”; junta sobreposta; junta de canto e junta de aresta, conforme representa a Figura 6. A descrição dada pela ASM (2011) para estes tipos de juntas é:

- **Junta de topo:** é a união entre duas partes que se encontram adjacentes ao mesmo plano (face a face), podendo ser soldadas sem preparação. No entanto, quando a espessura do metal for superior a 6 milímetros, a junta de topo exige que se faça um chanfro para evitar a falta de fusão e ocasionar o enfraquecimento da solda. São aplicadas na soldagem onde se deseja continuidade da secção, tal como na soldagem de chapas, vasos de pressão, oleodutos, decks, tanques e construção semelhantes;
- **Junta “T”:** são juntas em que as partes estão posicionadas sob a forma de um "T". São adequadas para soldas de filete sem preparação, mas em materiais de com espessuras maiores, pode ser necessário a preparação de um chanfro. A junta “T” é frequentemente

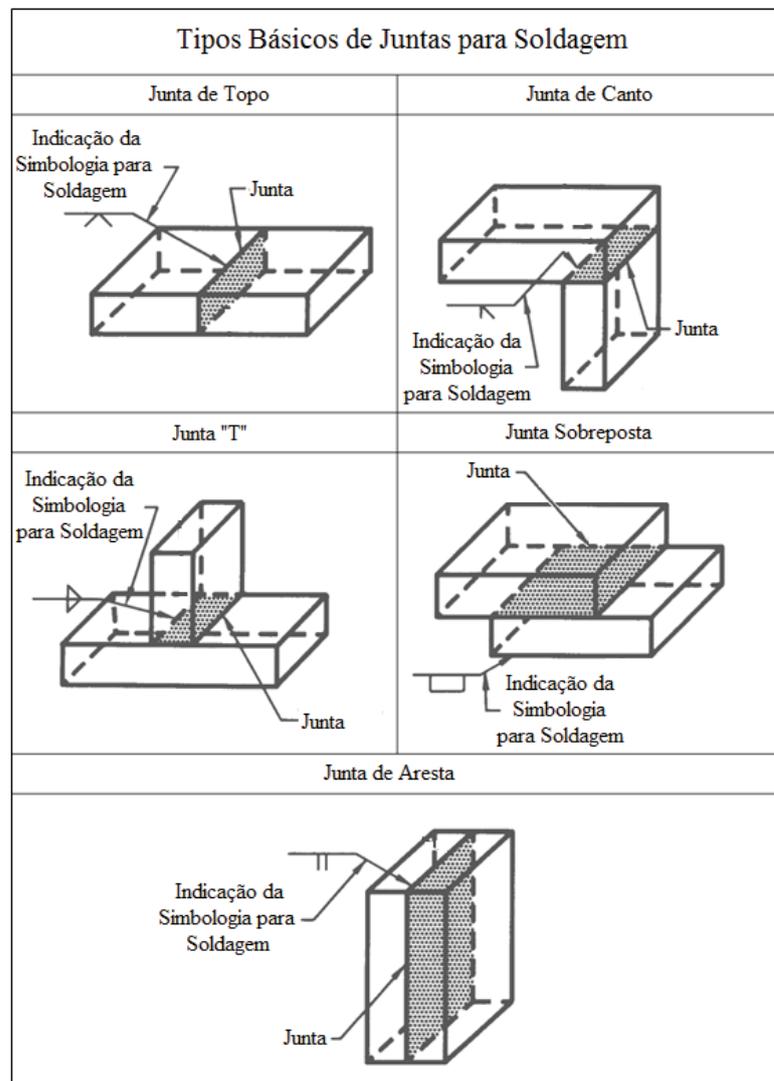
utilizada na produção de soldagens de componentes de máquinas, flanges, placas rígidas, vigas, montagem de laminados e na construção de estruturas tubulares;

- **Junta de canto:** são juntas entre membros localizados em ângulos aproximadamente retos, que se encontram na forma de um "L". As aplicações típicas são as mesmas que as juntas "T";

- **Junta sobreposta:** são soldas feitas com sobreposição de dois membros. Eles não necessitam de preparação borda. Juntas de sobreposição são necessárias para o uso em costura e de solda ponto de chapas metálicas;

- **Junta de Aresta:** são juntas entre as bordas de dois ou mais membros paralelos ou quase paralelos. Eles podem não requerer a adição de material de enchimento para a soldagem e são frequentemente utilizadas para juntar bordas finas viradas para fora.

Figura 6 – Juntas básicas de união por soldagem.



Fonte: Adaptado de *American Welding Society Welding Symbol Chart; A2.4, 2012.*

Quanto às tolerâncias para união entre duas peças por soldagem GMAW robotizado, Romano (2002) comenta que vários fatores devem ser considerados, como a posição de soldagem e os parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem, tipo de gás, etc.), mencionando que algumas regras práticas podem ser utilizadas, por exemplo, “... a abertura entre as partes a soldar não pode ser superior à metade do diâmetro do eletrodo. Nesse caso se o diâmetro do eletrodo for de 1,2 mm, a repetição do processo só ocorrerá se as aberturas entre as juntas não forem superiores a 0,6 mm”.

2.2.2 Robôs industriais e aplicação em soldagem

A RIA define robô industrial como “... manipulador multifuncional reprogramável, projetado para movimentar materiais, partes, ferramentas ou peças especiais, através de diversos movimentos programados, para o desempenho de uma variedade de tarefas” (RIA, 2014).

2.2.2.1 Classificação dos robôs industriais para soldagem

A classificação dos robôs industriais pode ser feita de acordo com o número de juntas, as quais definem o número de graus de liberdade – GDL, com o tipo de controle, com o tipo de acionamento, geometria, espaço de trabalho e grau de rigidez referente à extensão de controle sobre o curso do movimento e de acordo com as aplicações adequadas e inadequadas a eles (ROSÁRIO, 2005; GROOVER, 2011; CRAIG, 2012).

As quatro principais configurações de robôs industriais utilizados em células de operação de soldagem são descritas a seguir podendo serem identificados na Figura 7 (ROMANO, 2005; MARQUES et al., 2009):

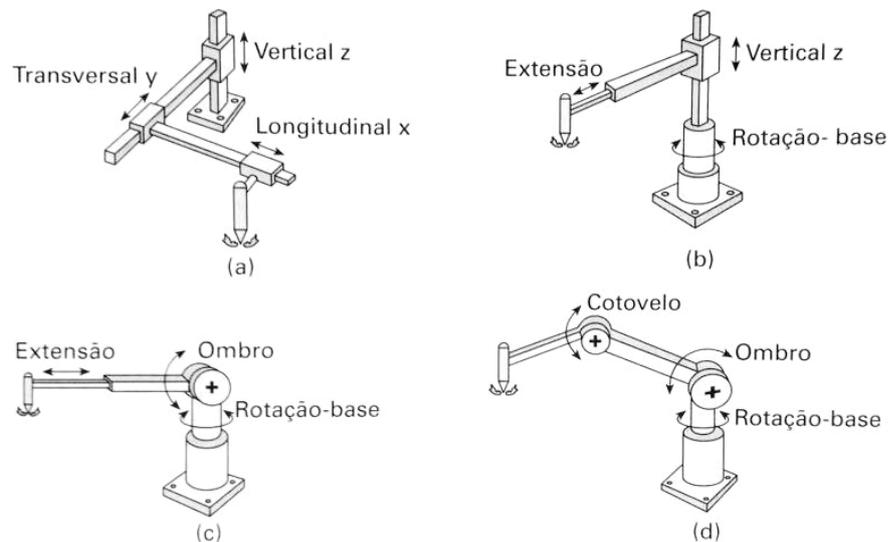
a) Robô cartesiano: sua configuração é retangular, realiza o movimento da tocha nas direções x , y e z , sendo empregados na solda de juntas lineares. Ilustrado na Figura 7 (a);

b) Robô cilíndrico: similar ao cartesiano, pois realiza movimento de deslizamento, porém, somente em duas direções sendo a vertical “ z ” e extensão “ x ”, mas possuem uma junta de rotação que estabelece o espaço de trabalho cilíndrico (círculo plano da base e um retângulo na elevação). Ilustrado na Figura 7 (b);

c) Robô esférico: conhecido também como polar, por possuir um eixo deslizante e outros dois eixos rotativos, resultando em um espaço de trabalho esférico. Ilustrado na Figura 7 (c);

d) Robô articulado: todos os movimentos deste robô são de rotação, os quais possibilitam realizar trabalhos mais complexos e irregulares, o que o torna adequado para ser aplicado em processos de soldagem lineares ou fora de posição, sendo este o tipo mais utilizado atualmente na indústria. Ilustrado na Figura 7 (d).

Figura 7 – Configurações básicas mais empregadas em robôs industriais de soldagem.



Fonte: Romano, 2002.

Com relação a utilização de robôs na automação de processos de soldagem, Romano (2002) descreve na Tabela 1, os componentes de uma célula robótica de soldagem.

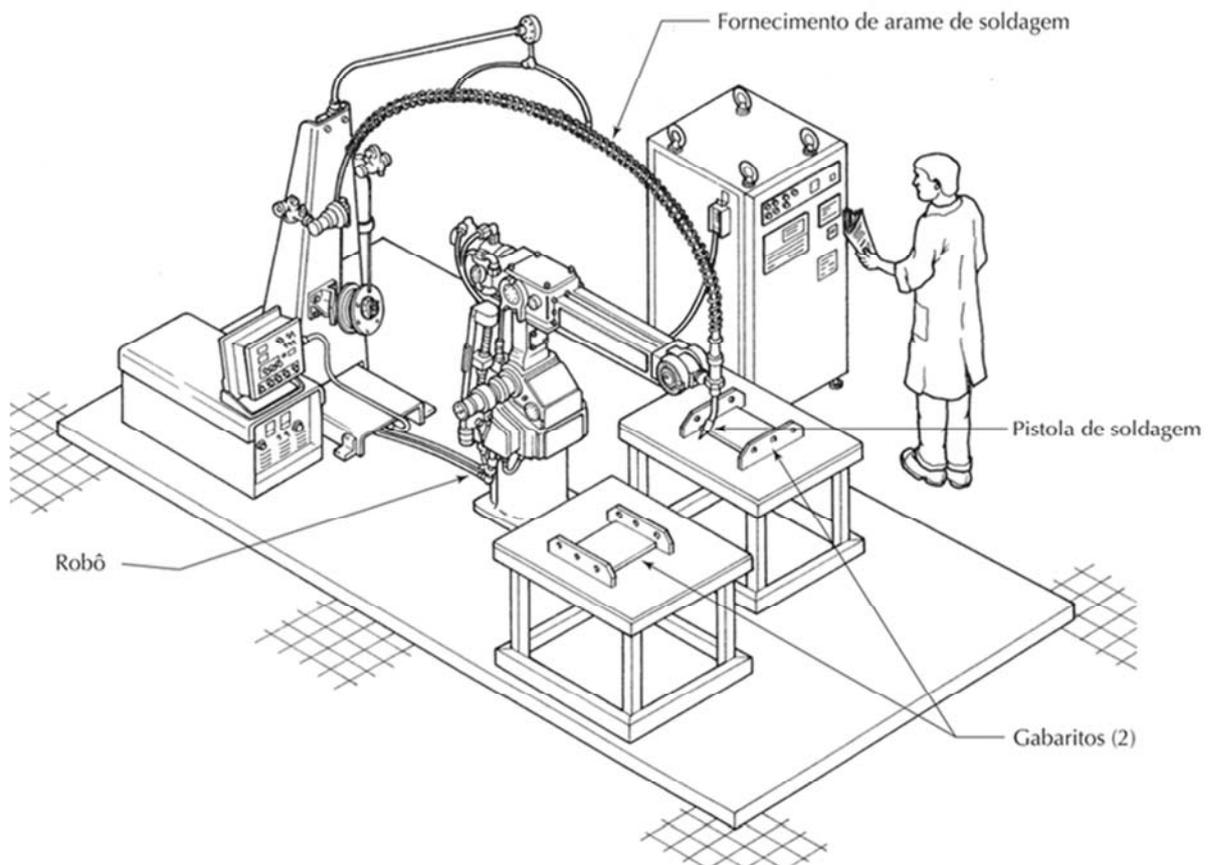
Tabela 1 – Componentes básicos de um sistema para soldagem robotizada.

COMPONENTES BÁSICOS	CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES
Robô	Graus de liberdade, envelope de trabalho (faixa), destreza (precisão), fonte de energia, repetibilidade, velocidade, capacidade de carga, tipo de acionadores.
Controle computacional do robô	Técnica de programação, ferramentas para realimentação do controle, tamanho da memória e do arquivo de backup, armazenamento do programa, interfaces, softwares especiais de soldagem.
Fonte de energia para soldagem	Ciclo de trabalho (usualmente 100% é desejável), interface com o controle do robô, precisão (corrige pequenas flutuações da tensão do arco) e habilidade de constantemente iniciar o arco elétrico.
Equipamentos e acessórios para soldagem a arco	Tipo de alimentador do arame (2 ou 4 roletes, por exemplo), tipo de controle, interface com o controle do robô, tocha de soldagem (capacidade, precisão, dimensões), cabos (comprimento e montagem), ferramentas para alinhamento, estação de limpeza do bocal da tocha, estação do operador e equipamento de segurança.

Fonte: Romano, 2002.

Uma célula robotizada de soldagem é ilustrada na Figura 8, exemplificando um arranjo de local de trabalho que consiste de robô, aparato de soldagem (unidade de força, controlador, ferramenta de soldagem e mecanismo alimentador) e um gabarito que posicione os componentes para o robô (GROOVER, 2011).

Figura 8 – Célula de soldagem a arco (proteções ocultadas para melhor visualização).



Fonte: Groover, 2011.

Moussa (2011) explana que na operação de solda a arco executada pelo robô na união entre duas partes, a tocha de solda é fixada como atuador deste (pistola de soldagem), onde o eletrodo (arame) é alimentado através de um cabo condutor posicionado paralelamente ao braço do robô, sendo a pistola de solda também responsável por dispersar o gás de proteção para manter a qualidade da solda. O processo de solda em arco necessita de robôs com as seguintes características:

- Cinco a seis graus de liberdade;
- Controle de trajetória contínua, para mover-se exatamente ao longo da trajetória de solda e regulagem de velocidade;

- Alta repetitividade.

Moussa (2011) também enfatiza que além destas características acima citadas o processo de solda em arco exige o uso de robôs de alta qualidade que possuam softwares sofisticados, capazes de realizar operações como:

- Rápido Movimento para a área de contato com a solda;
- Comunicação de dados entre unidade controladora do robô e estação de soldagem;
- Movimento preciso ao longo do caminho de solda enquanto preservando constante a orientação do eletrodo em relação à superfície a ser soldada;
- Habilidade para realizar movimentos de “tecelagem”, para se atingir uma boa junção entre dois corpos de metal e garantir a qualidade da solda.

2.2.3 Limitações da soldagem robotizada

Henriques (2005) explana que de uma maneira geral, para se obter uma solda de qualidade, deve-se obedecer aos parâmetros de operação do processo de soldagem, como por exemplo, a utilização de arame (eletrodo) adequado, velocidade de deslocamento da tocha e o controle de deposição do material no cordão de solda. No entanto relata que, tais especificações são eventualmente difíceis de serem alcançadas, mesmo utilizando a operação robotizada, devido ao fato da ocorrência de imprecisões de posicionamento de origem mecânica e restrições cinemáticas durante a execução da trajetória pelo robô, inviabilizando o processo.

Sob o ponto de vista de Romano (2002) quando a soldagem robotizada está sendo implantada em uma indústria, o engenheiro de soldagem responsável por esta aplicação deve estar consciente de que o robô é uma máquina que segue de forma precisa as instruções que lhe foram programadas. Entretanto, Niku (2013) destaca que o processo de soldagem é complexo e impreciso. Justificando que um robô que não utiliza sensores não pode ver a solda, nem ter a sensibilidade do que está realizando, diferentemente do soldador humano que pode compensar eventuais problemas decorrentes destes fatos evidenciados tratando-se da cognição humana.

Para a programação *off-line* a desvantagem evidenciada por Groover (2011) é quando há a necessidade de gabarito para calibração da célula, perdendo-se tempo de produção com este procedimento.

Segundo Chen (2009) a maioria dos robôs de soldagem utilizados nas linhas de produção ainda é do tipo articulado com programação do tipo guiada (ensino ponto-a-ponto e ensino de acompanhamento). Estes robôs articulados podem não atender bem aos requisitos de qualidade quanto à diversificação de peças na produção de soldagem, porque estes tipos de robôs não têm capacidade de adaptação às circunstâncias de mudanças e distúrbios durante o processo de soldagem. Na prática, o processo de soldagem pode apresentar muitas variáveis, tais como os erros de preparação da junta, montagem da peça e ainda durante a execução da soldagem pode haver a ocorrência de distorções térmicas, que podem mudar a posição da junta. Os robôs não podem corrigir automaticamente suas rotas de acordo com a mudança da posição durante o processo de soldagem, já que a posição foi pré-programada (ensinada). A fim de reduzir as várias incertezas presentes quanto à posição real de uma junta a ser soldada, uma abordagem eficaz é melhorar as tecnologias para robôs de soldagem, como a adoção de visão de máquina para realizar o seguimento da junta da soldagem.

Moussa (2011) menciona também problemas inerentes à adaptação de robôs em processo de solda a arco, quanto à programação ensinada. O autor explana que esta tarefa, além de tediosa, fisicamente desgastante, é sujeita a erros, devido ser realizada manualmente pelo operador ao longo da trajetória, tornando-se mais difícil se for curva.

Grassi (2005) e Moussa (2011) comentam que a implementação de um sistema de visão de máquina integrado ao robô pode solucionar problemas quanto à capacidade de decisão em tempo real e eliminação do estágio de aprendizado. Moussa (2011) explica que a aplicação de um sensor de visão que identifique a linha da união entre os componentes, guiará automaticamente o manipulador ao longo da trajetória de solda, conferindo maior precisão de posicionamento durante o processo de soldagem.

2.3 Visão de Máquina

A visão de máquina é um sistema que trata da aquisição de imagem, seguida pelo processamento e análise da imagem e pela interpretação desses dados processados digitalmente pelo computador para alguma aplicação útil (GROOVER, 2011).

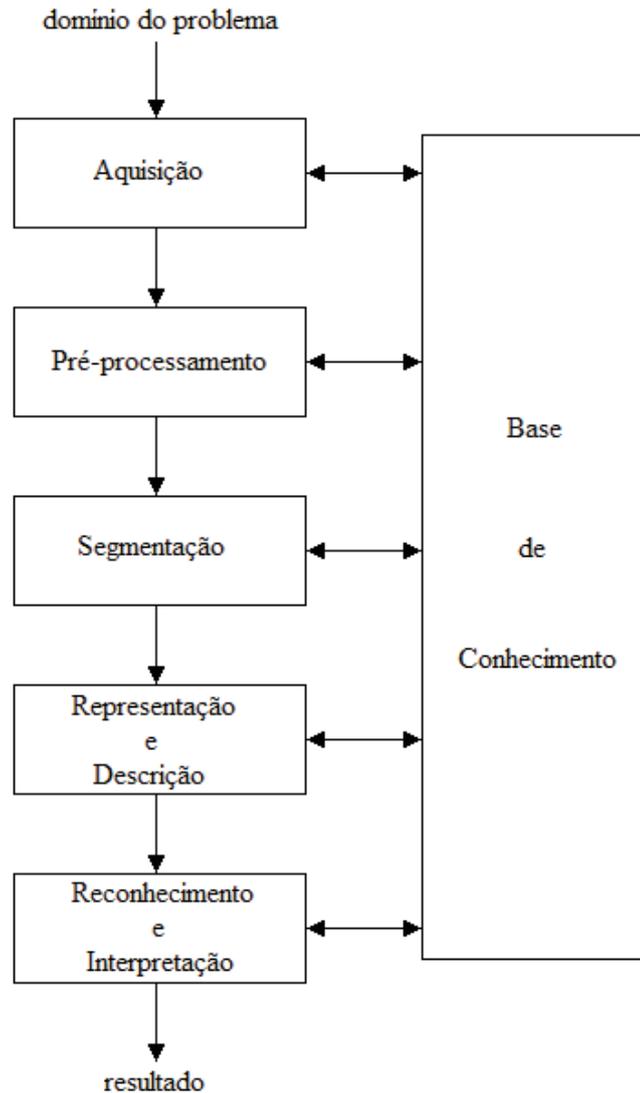
Pedrini e Schwartz (2008) destacam que o crescente avanço da tecnologia digital, junto ao desenvolvimento de novos algoritmos de programação, que buscam modelar a cognição humana e a habilidade de tomada de decisões, de acordo com informações extraídas

de uma imagem, tem viabilizado um maior número de aplicações da visão computacional em diversas áreas que anteriormente não era possível. Desde a execução de tarefas específicas, auxiliando na resolução de problemas de alta complexidade, como por exemplo, na automação industrial, permitindo a separação de peças por robôs em uma linha de montagem, a classificação de defeitos em solda por meio da inspeção e, a automatização de tarefas até então executadas por seres humanos. Os autores também explanam que a definição da sequência de passos pertinentes a um processo de sistema de visão (processamento e análise de imagens), na maior parte dos casos, é executada por um operador humano que possui experiência e conhecimento sobre o domínio da aplicação.

Dependendo da aplicação específica de um sistema de visão computacional, não há a necessidade de o agente saber “tudo” acerca do ambiente o qual este irá atuar. Visto que, para solucionar de forma satisfatória um problema inerente ao processo visual, devem-se impor restrições, selecionando apenas os aspectos que são necessários, não havendo a necessidade de uma descrição completa do ambiente para a tarefa ser realizada. Por exemplo, o autor cita tarefas de robôs na manipulação, nas ações de segurar peças, encaixar, inserir, etc. Onde somente as informações de geometria e localização das peças a serem manipuladas é que se fazem necessárias (ROMANO, 2002).

Para Pedrini e Schwartz (2008), tanto quanto para Gonzalez e Woods (2010), é fundamental conhecer as metodologias que podem ser aplicadas no processamento de imagens para as mais diversas finalidades e com diferentes objetivos. Para isto, parte-se do princípio de domínio do problema, que está codificado na forma de uma base de conhecimento, a qual é utilizada para guiar a comunicação entre as fases do processamento, desde a definição de qual informação tem que ser subtraída da imagem digital à forma que esta informação deverá ser disponibilizada como resultado final. Neste sentido, os autores determinam que um sistema de processamento de imagens seja construído por um conjunto de etapas sucessivas, sendo: aquisição; pré-processamento; segmentação; representação e descrição; reconhecimento e interpretação. A Figura 9 representa a ordem das etapas do processamento de imagens.

Figura 9 – Etapas de um sistema de processamento de imagens.



Fonte: Pedrini e Schwartz, 2008.

Sob o ponto de vista de Gonzalez e Woods (2010) é conveniente agrupar as etapas de um processamento de imagem de acordo com os níveis de complexidade da implementação. Os autores consideram três níveis de processos computacionais nessa linha contínua, sendo assim classificados e subdivididos:

- **Visão de baixo nível:** processos que compreendem operações primitivas, como pré-processamento de imagens a fim de se reduzir o ruído, realce de contraste e o aguçamento de imagens. Caracteriza-se pelo fato de que tanto a entrada quanto a saída são imagens;

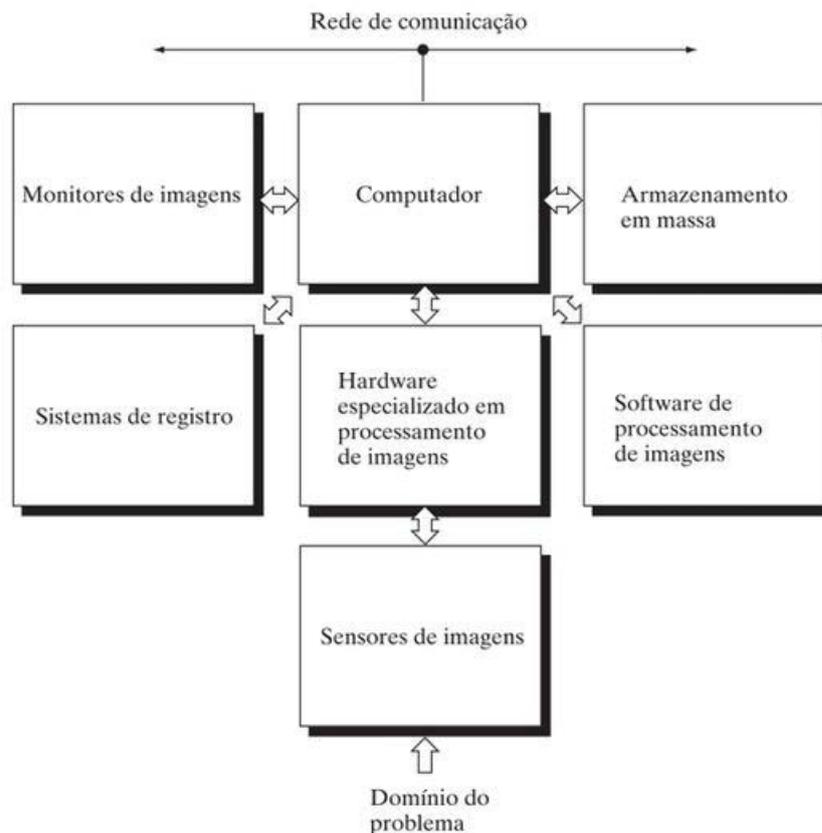
- **Visão de médio nível:** está associada a processos de extração, caracterização e marcação de componentes em uma imagem resultante de uma visão de baixo nível. Envolve a função de segmentação da imagem (separação de uma imagem em regiões ou objetos) e a

descrição desses objetos com o propósito de reduzi-los a uma forma apropriada para o processamento computacional e a classificação (reconhecimento) de objetos individualmente. Caracteriza-se por suas entradas serem geralmente imagens e as saídas serem informações (atributos) extraídas dessas imagens, como por exemplo, reconhecimento de bordas, contornos e a identidade de objetos individuais;

- **Visão de alto nível:** compreende o “dar sentido” a um conjunto de objetos já reconhecidos, como na análise de imagens e, no extremo dessa linha contínua, executar as funções cognitivas atribuídas à visão. O conhecimento e entendimento de processos de visão de alto nível são consideravelmente mais vagos e especulativos.

Associado às etapas e níveis de um sistema de visão, Pedrini e Schwartz (2008) assim como Gonzalez e Woods (2010) descrevem os componentes básicos que constituem um sistema de “uso geral” típico de processamento de imagens, desempenhando um importante papel, auxiliando na execução das tarefas de aquisição, armazenamento, processamento, transmissão e exibição de imagens. Os componentes de uso geral de um sistema de visão são apresentados na Figura 10.

Figura 10 – Componentes de um sistema de processamento de imagens de uso geral.



2.4 Imagem

Uma imagem é uma representação de uma cena real, seja preto e branco ou em cor, e seja impressa ou em formato digital (NIKU, 2013). Sob o ponto de vista de Gonzalez e Woods (2010) uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas do plano e f é a amplitude em qualquer par de coordenadas (x, y) , podendo ser chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Quando x, y e os valores de intensidade de f são quantidades finitas e discretas, chamamos de imagem digital.

2.4.1 Tipos de imagens e dados

Solomon e Breckon (2013) salientam que a seleção do formato de imagem para uma aplicação geralmente é determinado não só pelo conteúdo da imagem, como também pelo tipo de processamento que será realizado. Desta forma podem-se associar vários aspectos relacionados aos tipos de dados de imagens, podendo assim classifica-las como:

- **Imagens binárias:** tratam-se de matrizes (ou conjuntos) bidimensionais (2D) onde se designam os valores numéricos para um conjunto $\{0, 1\}$ a cada *pixel* de imagem. Por esta razão também são conhecidas como imagens lógicas – em que a cor preta corresponde a 0 (um *pixel* “desligado” ou de “fundo”) e o branco corresponde a 1 (*pixel* “ligado” ou “frontal”). Na prática estas imagens são representadas por uma sequencia de bits; inteiros de 8 bits nos formatos comuns. Um exemplo de imagem binária pode ser visualizado na Figura 11;

Figura 11 – Imagem binária; tipo de dado de *pixel*: inteiro (0 ou 1).



Fonte: Solomon e Breckon, 2013.

- **Imagens de intensidade ou escala de cinza:** também são matrizes ou conjuntos 2D, em que, cada *pixel* tem um valor numérico alocado, representando assim a intensidade de um ponto. Na Figura 12 está representada uma imagem de intensidade, contando com vários tons de cinzas em sua composição;

Figura 12 – Imagem em escala de cinza de 8 bits; tipo de dado de *pixel*: inteiro (0→255).



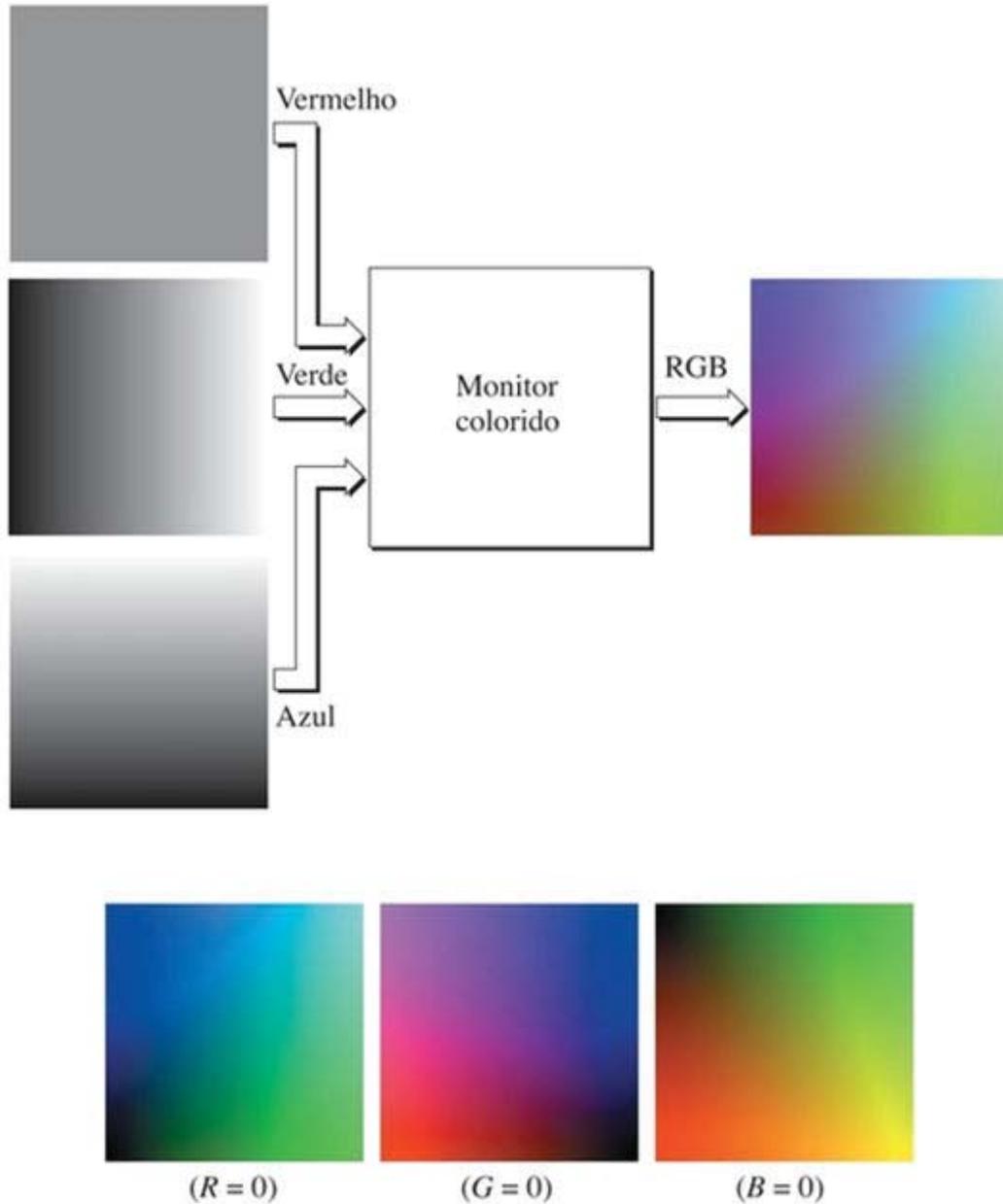
Fonte: Solomon e Breckon, 2013.

- **Imagens RGB ou de cores reais:** Segundo Solomon e Breckon (2013), “RGB é o espaço de cor mais usado para a representação de imagens digitais, pois corresponde às três cores primárias que são misturadas para exibição de imagens em um monitor ou dispositivo similar”.

De acordo com Gonzalez e Woods (2010) assim como Solomon e Breckon (2013), as imagens RGB são matrizes tridimensionais (3D) que podem ser conceitualmente consideradas como três planos 2D distintos, cada um correspondendo a um dos três canais de cores aditivas formado por vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*). Para cada *pixel* são alocados três valores numéricos, correspondendo respectivamente a uma das cores componentes do canal de imagem RGB, sendo então, constituída por $C \times R \times 3$, onde “C” é o número de colunas, “R” é o número de linhas de imagem e “n”, é o canal. O armazenamento destas imagens é sequencial em canais ordenados, como por exemplo, $R_0G_0B_0, R_1G_1B_1, \dots$, que podem ser acessados por coordenadas $I(C, R, n)$ em um matriz 3D. A Figura 13 exhibe as três

componentes (vermelho, verde e azul) de imagem uma RGB de 24 bits, além do esquema de aquisição de uma imagem colorida (em inversão).

Figura 13 – Matriz 3D, RGB 24 bits.

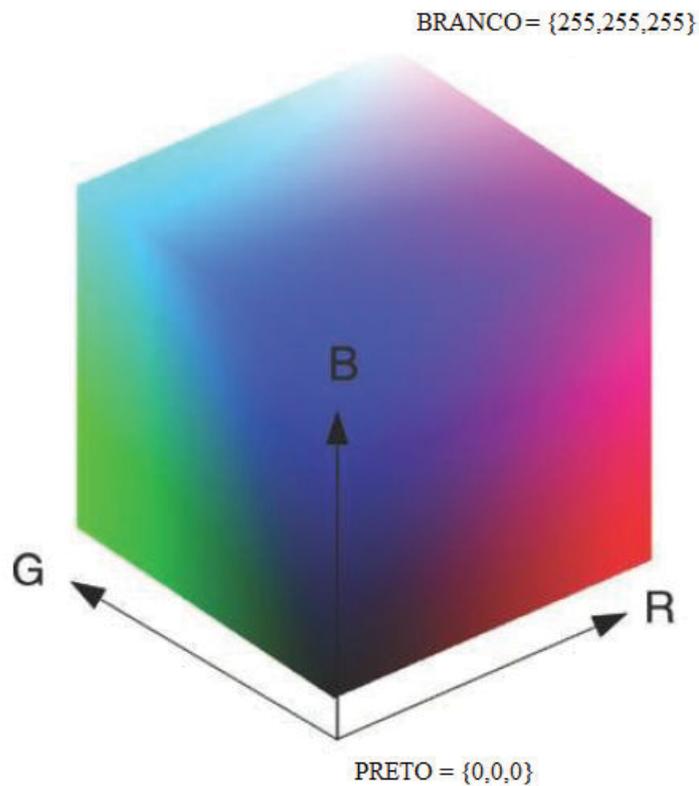


Fonte: Gonzalez e Woods, 2010.

Na descrição RGB, todas as cores podem ser representadas, essencialmente em um espaço de cor 3D (em cubo), com eixos R, G, e B. Os valores dos três eixos que correspondem à mesma faixa equivalente $0 \rightarrow 1$ (correspondendo à faixa $0 - 255$ na representação de 1 byte por canal de cor, para exibição de imagens de 24 bits). A cor preta

corresponde ao ponto $(0, 0, 0)$ de origem do cubo, em que as três cores são ausentes; já a cor branca se encontra no vértice oposto $(255, 255, 255)$, indicando o valor máximo das três cores. Desta forma todas as outras cores em espectro estão contidas no cubo, como pode ser observado na Figura 14 (GONZALEZ, WOODS, 2010; SOLOMON, BRECKON, 2013).

Figura 14 – Ilustração do espaço de cor RGB como um cubo.



Fonte: Solomon e Breckon, 2013.

Gonzalez e Woods (2010) ressaltam que, apesar de atualmente os monitores e placas de vídeos propiciarem uma representação satisfatória de cores em uma imagem RGB de 24bits, diversos sistemas implementados ainda limitam-se a 256 cores. Além do mais, os autores explicam que para a maioria das aplicações, algumas centenas de cores ou menos, já são mais que suficientes para uma função de análise de imagens.

A conversão de imagens RGB em escala de cinza segundo Solomon e Breckon (2013) é o ponto de início para muitos algoritmos na análise de imagens, pois possibilita a simplificar o volume de informação contida em uma imagem. Mantendo-se informações importantes que caracterizam a imagem como bordas, regiões, manchas, junções e etc. Neste sentido, os autores também destacam que os algoritmos com funções de detecção de formas e de

processamento geralmente trabalham com imagem em escala de cinza. A transformação de uma imagem em cores RGB, I_{Cores} , é convertida em escala de cinza, $I_{escala\ de\ cinza}$, através de:

$$I_{escala\ de\ cinza}(n, m) = \alpha I_{Cores}(n, m, r) + \beta I_{Cores}(n, m, g) + \gamma I_{Cores}(n, m, b) \quad (1)$$

Onde:

(n, m) : designa a posição de um *pixel* na imagem em escala de cinza;

(n, m, c) : canal de cor na posição do *pixel*, em que c deve ser substituído por r para o canal vermelho, por g para o canal verde e por b para o canal azul;

(α, β, γ) : são os coeficientes de ponderação, estabelecidos proporcionalmente à resposta perceptual do olho humano para cada um dos canais de cor. Como por exemplo, uma ponderação padronizada em um sistema NTSC – *National Television System(s) Committee* (Comitê Nacional do(s) Sistema(s) de Televisão), $\alpha = 0,2989$, $\beta = 0,5870$, $\gamma = 0,1140$.

Quanto aos tipos de imagens, Niku (2013) enfatiza que embora todas as cenas reais sejam tridimensionais, as imagens podem ser tanto 2D ou 3D. Usualmente as imagens obtidas por dispositivos de captura são bidimensionais, das quais podem ser extraídas informações bastante úteis para muitas aplicações, onde a profundidade da cena ou sua característica não precisam ser determinadas, como por exemplo, na definição do contorno da silhueta de um objeto.

2.5 Aquisição de Imagens

Conforme Gonzalez e Woods (2010) a captura e digitalização da imagem fazem parte do primeiro processo de um sistema de visão de máquina. Para que seja possível a análise computacional de imagens, se faz necessária a digitalização dos dados, por meio da conversão da luminosidade em sinais elétricos distribuídos em um espaço em que a imagem adquirida é convertida em sinal elétrico analógico por meio de sensores ópticos e, sendo na sequencia transformada eletronicamente em sinal digital. Dispositivos estes denominados de *frame grabbers* (dispositivo de captura de quadros) (MARQUES FILHO, VIEIRA NETO, 1999; FORESTI, 2006).

Para Groover (2011) “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 posterior análise”. Neste processo, ele explica que uma imagem obtida por uma câmera, é

dividida em uma matriz de elementos de imagem (*pixels*), nos quais cada elemento tem um valor atribuído proporcionalmente à intensidade de luz da região em que está localizado na imagem, em seguida é feita a conversão do valor de intensidade de cada *pixel* em um valor digital, em que, cada grupo destes valores dos *pixels* digitalizados se refere como um quadro da imagem. Por conseguinte, cada quadro é armazenado em um dispositivo de memória do computador, o *frame buffer* (memória em quadros).

Existem dois tipos de câmeras associadas com sistemas de visão para a captura de imagens, que são: analógicas e digitais. No entanto, atualmente as câmeras analógicas não são mais comuns em aplicações, apesar de terem sido utilizadas por muito tempo como câmeras-padrão nas estações de televisão. Independentemente disso, os sistemas de captura de imagem de forma analógica ou digital, auxiliam na compreensão quanto à detecção eletrônica de intensidade de luz, a transmissão e a digitalização da imagem em sistemas de visão (NIKU, 2013).

2.5.1 Câmeras

Solomon e Breckon (2013) explanam que quando uma câmera é utilizada como dispositivo de captura de imagens, a cena captada por este dispositivo é basicamente uma projeção do ambiente 3D em forma de uma representação 2D (a imagem).

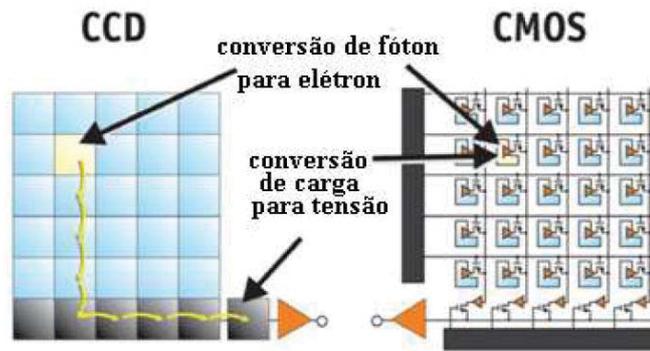
As câmeras digitais baseiam-se na tecnologia de estado sólido. Como em outras câmeras, um conjunto de lentes é utilizado para projetar a cena de interesse sobre a área de imagem da câmera. A parte fundamental da câmera é a área de imagem, onde se encontra uma pastilha de silício em estado sólido, estas operam de forma que, a imagem fique concentrada em uma disposição 2D de elementos fotossensíveis, finamente espaçados e extremamente pequenos, denominados de *photosites*. Formando assim, uma matriz de *pixels*, onde cada pequena área é uma célula de imagem ou *pixel*. Sendo assim, quando a imagem é projetada na área de imagem da câmera, uma carga elétrica é gerada para cada elemento (*pixel*) da pastilha, de acordo com a intensidade de luz naquele ponto. Para ler este grande volume de número de *pixels* (30 vezes por segundo), as cargas são movidas para os registradores opticamente isolados próximos a cada *photosite*. A saída é uma representação discreta de uma imagem (uma tensão capturada no tempo) (SICILIANO et al., 2009; GROOVER, 2011; NIKU, 2013).

Tratando-se dos sensores de imagem eletrônicos em câmeras de estado sólido, responsáveis por converter a luz em carga elétrica, processando-a através de sinais elétricos, destacam-se dois grandes grupos, sendo: CCD (do inglês, *Charge Couple Device*) e CMOS (do inglês, *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), onde:

“Inicialmente os CCDs eram os únicos sensores de imagem usados em câmeras, devido ao pobre desempenho dos circuitos e relação sinal-ruído em foto detecção, encontradas na fabricação de CMOS. Na década de 1990, o sensor CMOS obteve avanços em relação à tecnologia CCD, que se deveu ao controle de seu processo de fabricação. O baixo consumo de energia, a redução do tamanho do sistema de imageamento, e a possibilidade de se usar a mesma linha de produção CMOS usada para outros componentes (como de *mainstream logic* e de memória - o que traz economia na produção) também levaram a uma equivalência da tecnologia CMOS à CCD” (FERNANDES, 2011).

O sensor CCD é assim denominado devido à forma sequencial de transferência das cargas em seus *pixels* ao amplificador integrado de saída após uma exposição, deslocando as cargas para ele e em seguida para o conversor analógico-digital. Já o sensor CMOS caracteriza-se por uma matriz de diodos fotossensíveis, possuindo um diodo em cada *pixel* com seu próprio circuito individual integrado (*pixel* ativo). Devido a esta característica, cada *pixel* em um sensor de imagem CMOS pode ser lido diretamente em um sistema de coordenadas (X, Y), significando que enquanto um *pixel* CCD sempre transfere uma carga, um *pixel* CMOS detecta um fóton diretamente, converte-o para uma tensão e transfere as informações diretamente para a saída. A Figura 15 ilustra a conversão de fóton para tensão de saída executados pelo sensor CCD assim como pelo CMOS (SOUZA, CARDOZA, 2012; FERNANDES, 2011).

Figura 15 – A carga do CCD é movida *pixel* a *pixel* e convertida em tensão na saída. No CMOS a carga é convertida em tensão em cada pixel.



Fonte: Fernandes, 2011.

A quantidade de *pixels* presentes no sensor de imagem (CCD ou CMOS), distribuídos na forma de uma matriz $M \times N$ (quadrada ou retangular) de linhas e colunas de *pixels* (fazendo a amostragem de uma imagem bidimensional em duas direções ortogonais x e y), é o fator que determina a resolução de uma câmera. Câmeras digitais possuem diversas resoluções, como por exemplo: *Video Graphics Array* (VGA) 640x480, *Extend Graphics Array* (XGA) 1024x768, *Quad-Extended Graphics Array* (QXGA) 2048x1536, *Hyper-Extended Graphics Array* (HXGA) 4096x3072. Quanto maior a resolução do sensor, menor a fração de erro, ruído ou perda de nitidez em uma imagem capturada. Entretanto, é importante ressaltar que a lente da câmera pode ser um limitante da resolução efetiva apresentada pela câmera (SOUZA, CARDOZA, 2012; FERNANDES, 2011).

2.5.1.1 Calibração de câmera

A necessidade da determinação de parâmetros geométricos internamente à câmera, associados à óptica (parâmetros intrínsecos), bem como ao posicionamento tridimensional e a orientação da câmera – do termo inglês, *pose* – (parâmetros extrínsecos), em relação às coordenadas globais. Faz-se necessária a realização do processo de calibração da câmera, o que permite a dedução de informações 3D da cena a ser capturada, a fim de convertê-la em uma imagem bidimensional (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; PEREIRA JUNIOR, 2014).

Com base na referência bidimensional correspondente entre pontos no plano da imagem e pontos no espaço do objeto, expressa através da composição de transformações projetivas aplicadas sobre os quatro sistemas de coordenadas, torna-se possível fazer uma relação entre os sistemas de coordenadas, os quais são descritos a seguir, apresentando-se na Figura 16 a correspondência de pontos nos espaço do objeto da imagem (TSAI, 1987; PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

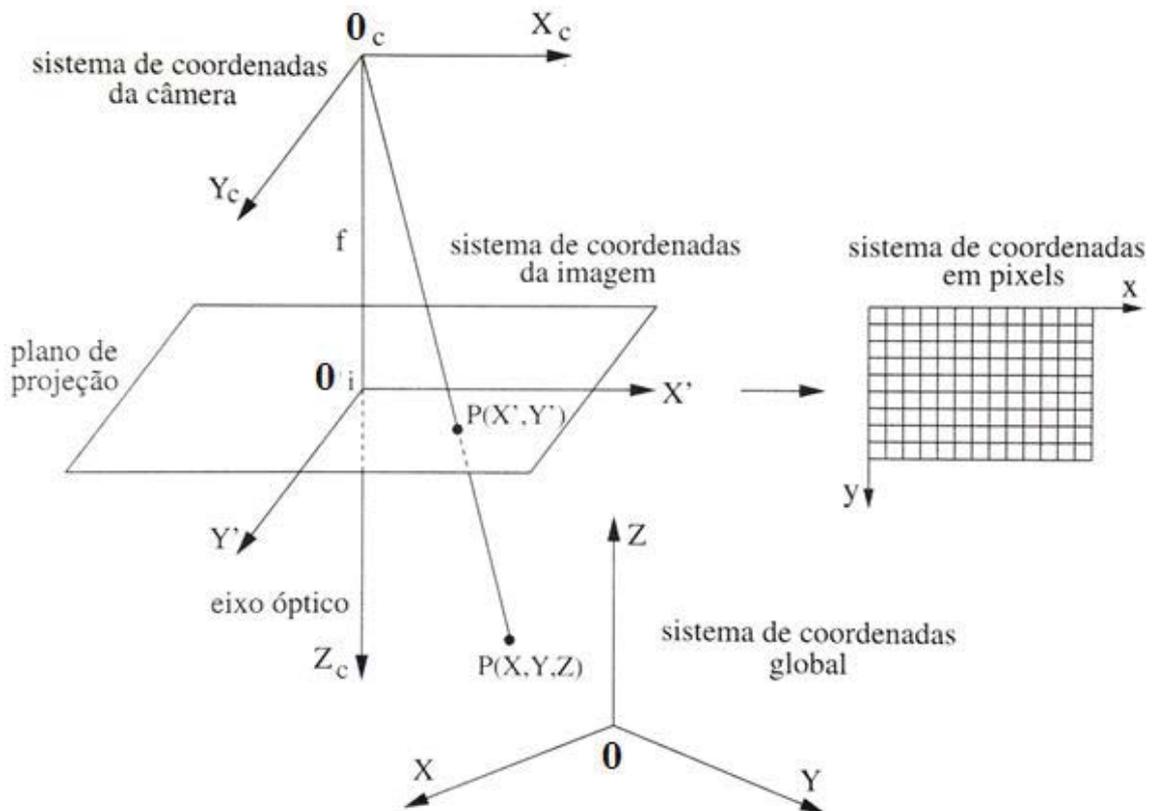
- **Sistemas de coordenadas do mundo ou global:** trata do sistema de referência tridimensional utilizados para descrever os objetos da cena. As coordenadas desse sistema são representadas por (X, Y, Z) , tendo como origem o ponto 0;

- **Sistema de coordenadas da câmera:** é o sistema tridimensional que tem como origem o centro óptico da câmera, dado por 0_c e as coordenadas são referenciadas por (X_c, Y_c, Z_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 da imagem:** é o sistema bidimensional posicionado no plano de projeção, com origem no ponto 0_i . As coordenadas deste sistema são dadas por (X', Y') ;

- **Sistema de coordenadas em *pixels*:** também se trata de um sistema bidimensional, com coordenadas denotadas por *pixels*, definindo a posição de um ponto da imagem conforme a grade de *pixels*. As coordenadas neste sistema são expressas por (x, y) .

Figura 16 – Sistemas de coordenadas para correspondência de pontos no espaço do objeto na imagem.



Fonte: Pedrini, Schwartz, 2008.

À vista do sistema de coordenadas, para a calibração de uma câmera, pode-se utilizar um método numérico em que uma dada matriz $M = M_1 M_2 M_3$, em que: M corresponde ao sistema de coordenadas global (X, Y, Z) ; M_1 ao sistema de coordenadas da câmera (X_c, Y_c, Z_c) ; M_2 ao sistema de coordenadas da imagem (X', Y') e M_3 ao sistema de coordenadas de *pixels*. Onde, as transformações M_1, M_2 e M_3 podem combinadas com o objetivo de transformar um ponto do sistema de coordenadas global (X, Y, Z) em sistema de coordenadas em *pixels* (x, y) ,

Portanto, através da combinação das três transformações resulta a equação expressa por (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008):

$$p = M_3 M_2 M_1 P \quad (2)$$

Onde: P corresponde às coordenadas do sistema global, p às coordenadas em *pixels*.

Ou, em coordenadas homogêneas na forma matricial, dada por:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ W \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} fs_x & ftan\theta & x_c & 0 \\ 0 & fs_y & y_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_K \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & R & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{RT} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Onde:

x e y : sistema de coordenadas em *pixels*;

W : corresponde ao fator de escala das coordenadas homogêneas;

K : é a matriz que contém os parâmetros intrínsecos da câmera, em que s_x e s_y representam o número de *pixels* por unidade de comprimento, nas direções horizontal e vertical, respectivamente. Os parâmetros x_c e y_c correspondem à posição da projeção ortográfica do ponto 0_i (Figura 16) sobre o plano de projeção, conhecido como ponto principal. O valor de θ corresponde ao ângulo formado entre as linhas e as colunas de *pixels*. A distância focal da câmera é dada por f ;

RT : representa a matriz com os parâmetros extrínsecos, em que R corresponde a matriz de rotação e T ao vetor de translação, relacionados à posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas global.

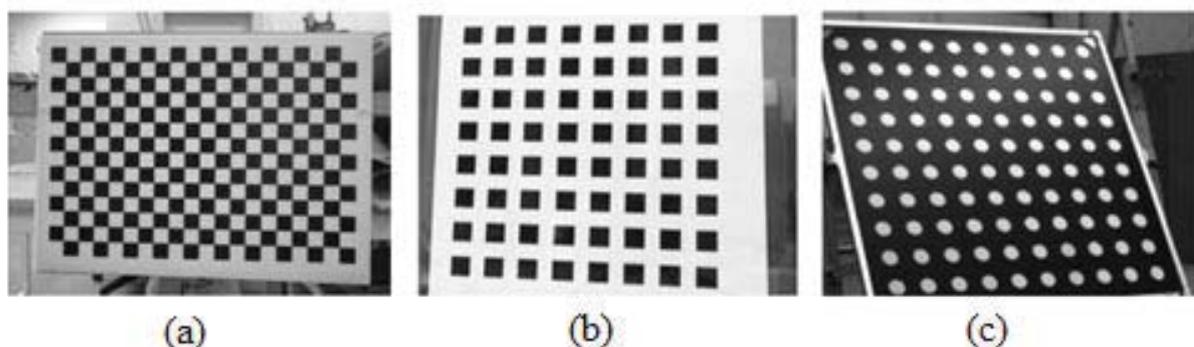
XYZ : Sistema de coordenadas global.

Segundo Xu *et al.* (2011, *apud* Pereira Junior (2014)), os métodos de calibração de câmera podem ser divididos em duas categorias: convencionais e auto-calibração:

- **Auto-calibração:** processo pelo qual não se requer um padrão de calibração específico, utilizando marcadores típicos da cena, como cantos e retas; tem como vantagem a calibração *on-line* da câmera, ou seja, pode ser feita enquanto o sistema de reconstrução tridimensional está em operação, permitindo que a câmera seja recalibrada, se necessário (ZHANG, 2000).

• **Convencionais:** são métodos caracterizados pela utilização de um padrão de calibração, de duas ou três dimensões, com precisão e características conhecidas. A aplicação dos métodos convencionais de calibração deve ser feita antes que o sistema de aquisição de imagem seja colocado em operação. Pode-se evidenciar a utilização de diferentes padrões de calibração bidimensional, os quais visam minimizar os erros de imprecisões resultantes da variação dos parâmetros intrínsecos e extrínsecos na estimação da informação tridimensional da cena capturada pela câmera. Na Figura 17 são apresentados três tipos de padrões de calibração bidimensional, sendo: (a) tipo tabuleiro de xadrez; (b) quadrados que não se interceptam; (c) marcadores circulares. (PEREIRA JUNIOR, 2014).

Figura 17 – Padrões de calibração bidimensional de câmeras digitais.



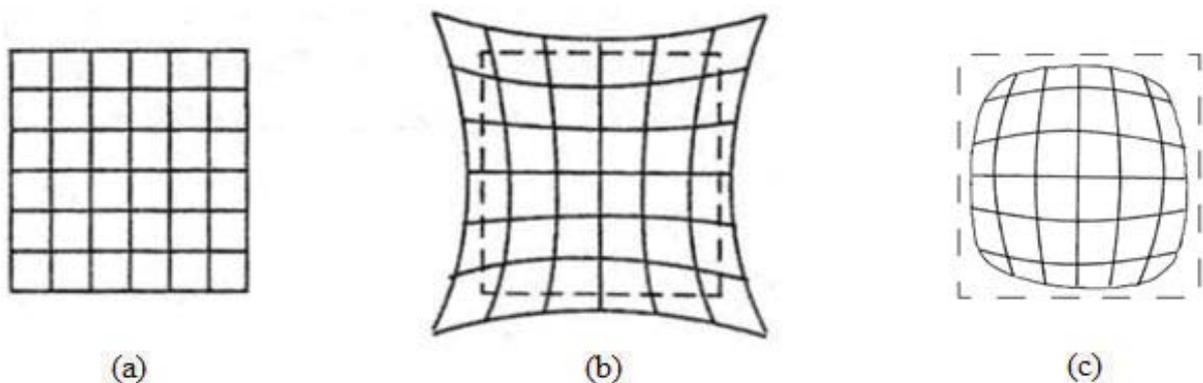
Fonte: Adaptado de Pereira Junior, 2014.

Os parâmetros estimados a partir da transformação projetiva de um padrão, como por exemplo, de um tabuleiro de xadrez – Figura 17 (a) – é o meio pelo qual se consegue mapear as coordenadas de pontos de um objeto para coordenadas da imagem, com o objetivo de se obter um conjunto de parâmetros que melhor se adapte à transformação da cena tridimensional em uma imagem 2D (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; FANG; DINHAM, 2010).

Pereira Junior (2014) ressalta que na etapa da calibração da câmera, principalmente em aplicações de sistemas de visão onde as informações de medidas extraídas da imagem requerem precisão, um fator importante a ser considerado é a distorção da lente (exemplos de distorções: distorção radial, deslocamento do ponto principal e distorção de prisma fino). O efeito da distorção gera um problema degradativo da imagem digitalizada. Segundo este autor a distorção é geralmente provocada por imperfeições na lente da câmera, como problemas provenientes da fabricação, descentragem do eixo óptico e/ou montagem. De acordo com o autor a distorção pode ser corrigida por meio da aplicação de métodos de modelagem e

estimação de coeficientes de distorção total de lente. Neste contexto, quanto às aplicações industriais de sistemas de visão, Tsai (1987) conclui que somente a distorção radial necessita ser considerada, sendo que modelos mais elaborados além de não melhorarem a resposta do sistema, podem causar instabilidade numérica. Na Figura 18 são apresentadas duas formas distorcidas de uma imagem radial em distorção (quando se considera que o centro da imagem coincide com o centro da distorção), em que (a) ilustra a imagem ideal, (b) representa a imagem distorcida com distorção do tipo almofada e em (c) é apresentada a imagem distorcida com distorção do tipo barril

Figura 18 – Imagem ideal (a), imagens distorcidas (b) e (c).



Fonte: Adaptado de Pereira Junior, 2014.

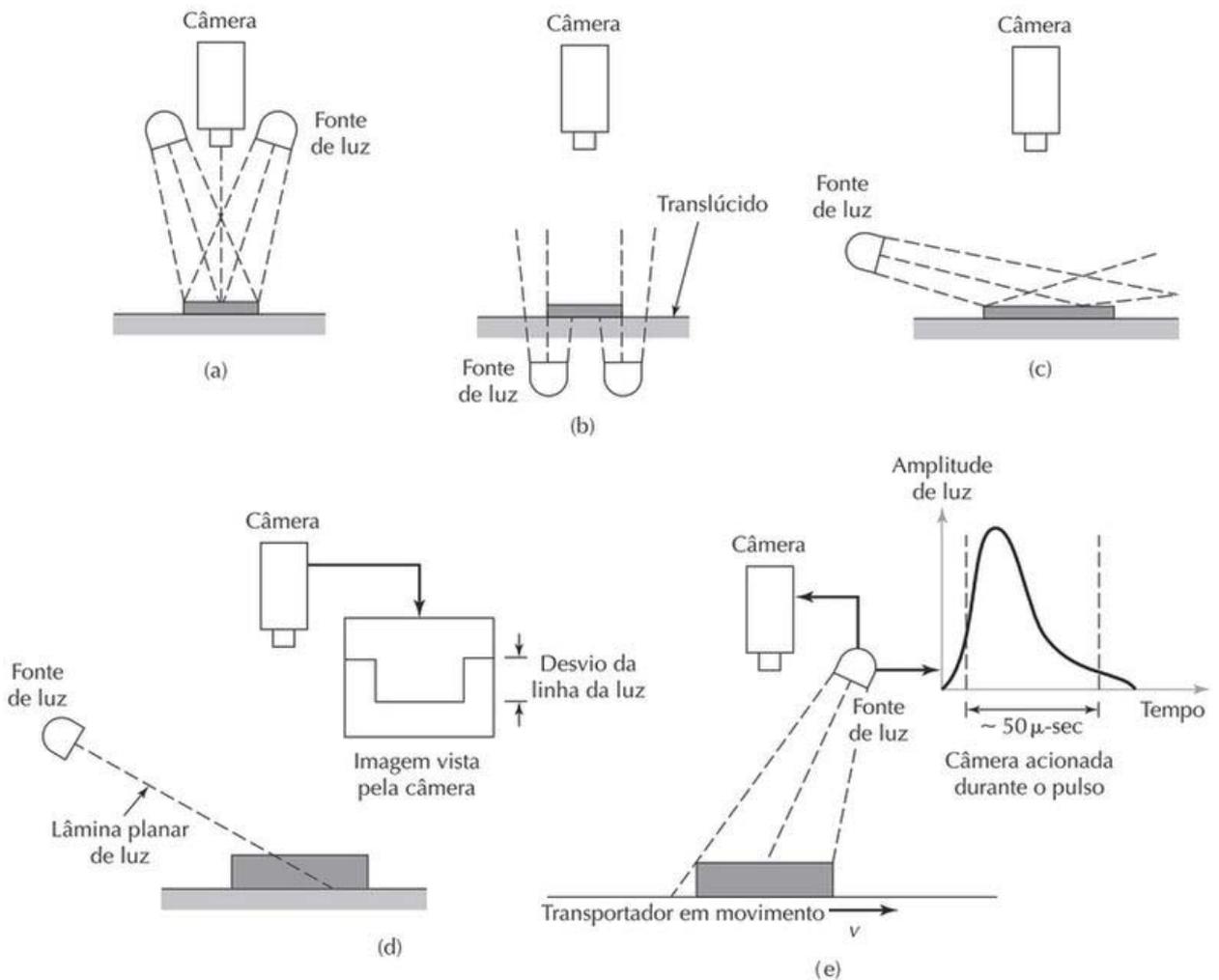
Sob o ponto de vista de Pedrini e Schwartz (2008), e também de Pereira Junior (2014) dentre os principais métodos de calibração de câmera, pode-se citar o de Tsai (1987) e de Zhang (2000), sendo este muito utilizado por considerar a distorção da lente, no qual se utiliza um padrão bidimensional, realizando-se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

2.5.2 Fator iluminação

A iluminação é um fator muito importante da visão de máquina. Uma vez que, a cena a qual se concentra o foco da câmera de captura, deve estar iluminada de forma constante. O autor ressalta que quase sempre há necessidade da instalação de uma iluminação especial para as aplicações de sistemas de visão, ao se prever que a iluminação ambiente na instalação não será suficiente para atender dada demanda ou atua como perturbação (GROOVER, 2011).

Quanto as principais técnicas de iluminação para aplicações de visão de máquina, podem-se destacar cinco tipos, sendo definidas conforme necessidade de aplicação de um sistema de visão. A Figura 19 ilustra cinco tipos de técnicas de iluminação, as quais são explanadas a seguir (GRASSI, 2005; FORESTI, 2006; GROOVER, 2011):

Figura 19 – Tipos de iluminação na visão de máquina.



Fonte: Adaptado de Groover, 2011.

a) Iluminação de frente: conhecida também como iluminação direta, a luz é disposta diretamente acima do objeto de interesse, produzindo uma luz refletida do objeto que possibilita a inspeção das características superficiais;

b) Iluminação de fundo: a fonte de luz é colocada atrás do objeto em relação ao posicionamento da câmera, produzindo assim o contorno deste objeto, contrastando de forma

intensa com o fundo iluminado. Produz imagem preto-e-branco, podendo ser utilizado em sistemas de visão binária na diferenciação de peças e controle dimensional;

c) Iluminação do lado: ou difusa, este tipo de iluminação deixa visível a existência de irregularidades superficiais em objetos planos e lisos. Sendo ideal para inspecionar as características da superfície de um objeto e identificar possíveis defeitos e falhas;

d) Iluminação estruturada: este tipo de iluminação estabelece um padrão de luz estruturada altamente concentrada direcionada contra a superfície de um objeto, posicionada em um determinado ângulo conhecido. Desta forma os distúrbios (desvios) produzidos pela iluminação indicam a presença do objeto, possibilitando a realização de uma análise das características tridimensionais de um objeto;

e) Iluminação estroboscópica: onde a cena é iluminada por um pulso de luz que pode durar de 5 a 500 microssegundos, tempo suficiente de captura da imagem pela câmera, permitindo que um objeto em movimento pareça estar estático. Sendo assim, útil para inspeção de objetos que estejam passando pela câmera de visão em um transportador industrial e entre outras aplicações de inspeção.

As técnicas de iluminação reduzem os efeitos de pouco contraste, reflexões e sombras e outros detalhes. Desta forma, a iluminação trata a cena de tal modo que a complexidade da imagem adquirida é minimizada, enquanto a informação requerida de detecção de objetos e sua extração é otimizada (GRASSI, 2005; FORESTI, 2006; GROOVER, 2011).

2.6 Digitalização da Imagem

A maior parte dos métodos de análise de imagens é executada através do processamento de imagens digitais, em que a função $f(x, y)$ é transformada para uma forma discreta. Dessa maneira, para que seja possível a representação e manipulação de uma imagem em um computador, necessita-se a definição de um modelo matemático adequado da imagem digital. O processo pelo qual se obtém uma imagem digital é chamado de digitalização, no qual estão associados dois passos, a amostragem e a quantização (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010).

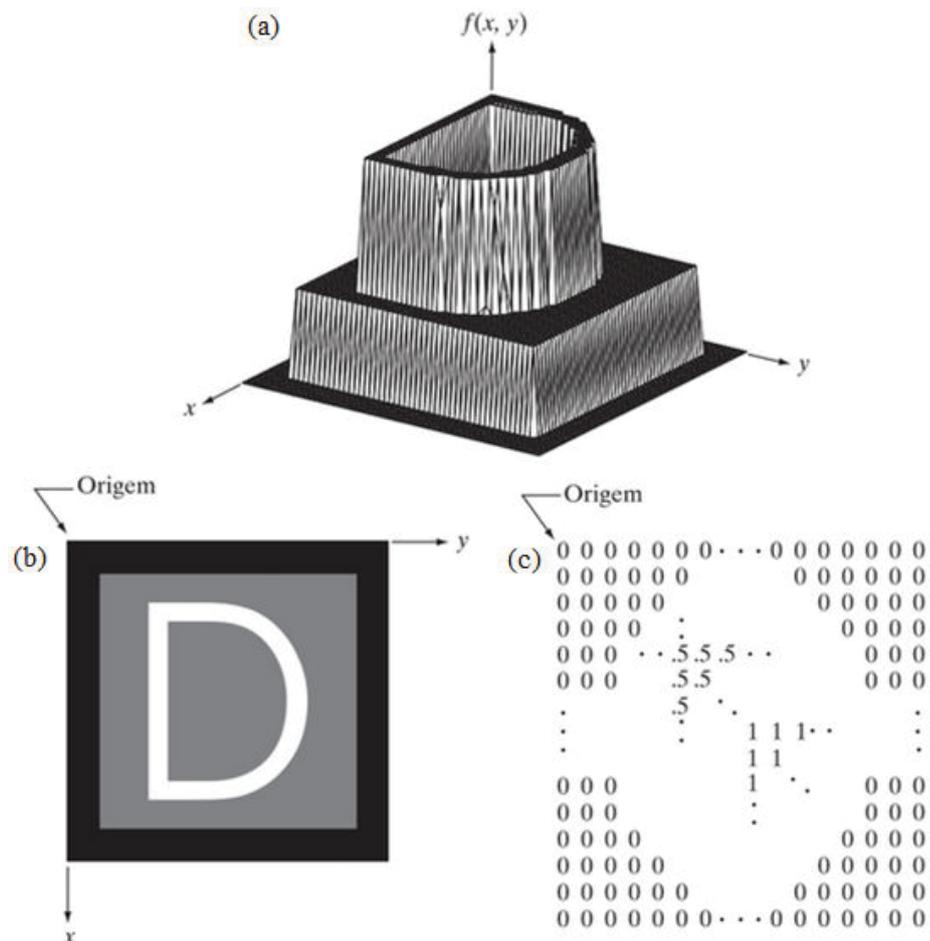
2.6.1 Modelo matemático de imagem digital monocromática

A definição de uma imagem como função discreta de intensidade luminosa, é expressa por $f(x, y)$, em que o valor de f em uma coordenada (x, y) qualquer, representa a intensidade (brilho) desse ponto. Partindo-se então do princípio que a luz é energia, e por isso $f(x, y)$ deve ser finita e diferente de zero, tem-se que (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010):

$$0 < f(x, y) < \infty \quad (4)$$

A Figura 20 mostra três formas básicas de representar $f(x, y)$. Nas quais: (a) é uma imagem representada de forma gráfica com uma superfície; (b) a imagem é representada em forma de uma matriz de intensidade visual; (c) uma matriz numérica representa a imagem (GONZALES, WOODS, 2010).

Figura 20 – Três formas básicas de representar $f(x, y)$.



Fonte: Gonzalez e Woods, 2010.

Quanto aos valores típicos de iluminação e refletância, Gonzalez e Woods (2010) explanam que no processamento de imagens digitais é necessário melhorar os limites da função $f(x, y)$, e para isso, considera-se l como a intensidade do nível de cinza de uma imagem monocromática em uma coordenada qualquer (x_0, y_0) . Desta forma:

$$l = f(x_0, y_0) \quad (5)$$

A partir da equação 5, pode-se expressar que l está na faixa:

$$l = f(L_{min} \leq l \leq L_{max}) \quad (6)$$

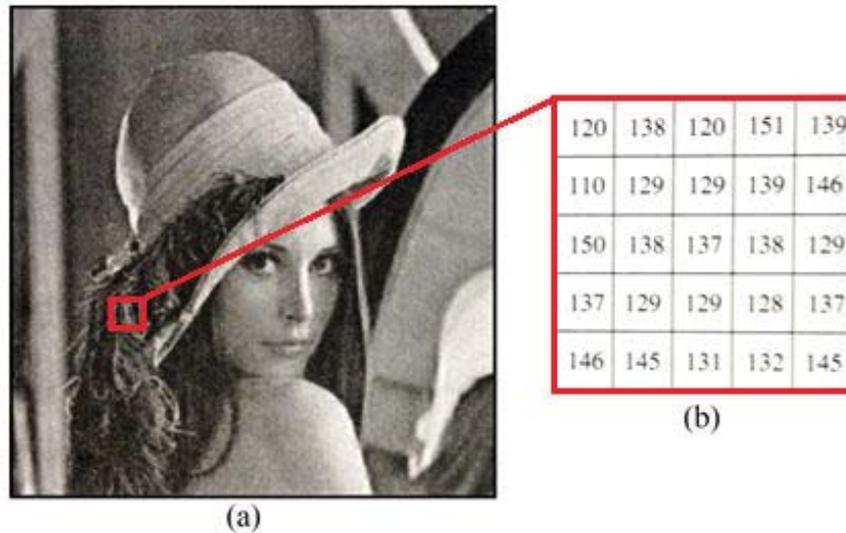
Teoricamente, restringe-se o L_{min} a um valor positivo e L_{max} para que seja finito. Desta forma, se obtém uma escala de cinza, definida pelo intervalo $[L_{min}, L_{max}]$. Simplificando, costuma-se deslocar o intervalo para $[0, L - 1]$, onde $l = 0$ é considerado preto e $l = L - 1$ é considerado branco. Sendo assim, o intervalo entre $[0, L - 1]$ será um tom de cinza, para imagens monocromáticas (GONZALEZ, WOODS, 2010).

2.6.2 Amostragem e Quantização

Segundo Gonzalez e Woods (2010), a digitalização dos valores das coordenadas (x, y) é associada à amostragem, enquanto a digitalização dos valores de amplitude é denominada de quantização dos níveis de cinza de uma imagem.

Pedrini e Schwartz (2008), explicam que a amostragem consiste em dividir a área definida de uma imagem em elementos individuais discretos – *pixels* – ao longo do eixo x e do eixo y , resultando em uma matriz $M \times N$ de amostras da imagem. Quanto à quantização, os autores explanam que esta consiste na representação do valor medido de um *pixel* aproximado por um número inteiro $l = f(L_{min} \leq l \leq L_{max})$ da equação (6), de níveis de cinza (imagem monocromática) admitidos para cada ponto da imagem. A Figura 21 mostra um exemplo de imagem monocromática representando a amostragem e quantização, onde (a) corresponde à imagem na qual foi selecionada uma região para amostragem; (b) representa os níveis de cinza correspondentes à região em destaque.

Figura 21 – Região de interesse da imagem em representação matricial 5 x 5 pixels.



Fonte: Pedrini e Schwartz, 2008.

A representação por amostragem e quantização de uma imagem contínua em uma matriz 2D, $f(x, y)$, pode ser dada por M (número de linhas) e N (número de colunas), onde cada elemento corresponde a um *pixel*, sendo que (x, y) são coordenadas discretas. Desta maneira, os valores de números inteiros (0, 1) das coordenadas (x, y) podem ser expressos pela função $f(x, y)$. Estes autores destacam que, em geral as matrizes numéricas são utilizadas no desenvolvimento e processamento de algoritmos. A equação que representa uma matriz $M \times N$ é expressa por (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010):

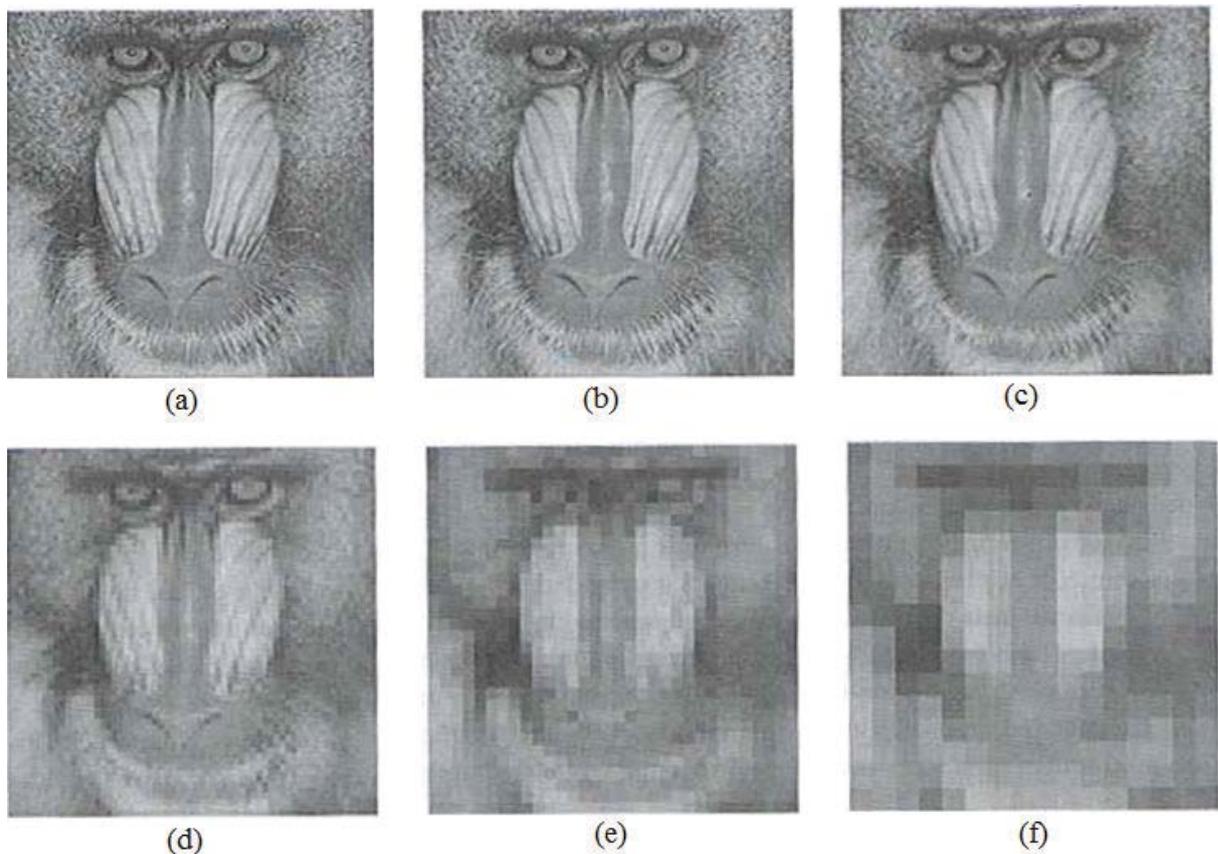
$$f(x, y) \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(0, 1) & \dots & f(0, N - 1) \\ f(1, 0) & f(1, 1) & \dots & f(1, N - 1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M - 1, 0) & f(M - 1, 1) & \dots & f(M - 1, N - 1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pedrini e Schwartz (2008) frisam que o processo de digitalização da imagem compreende os parâmetros de amostragem e quantização, objetivando tornar conhecidos a quantidade de amostras $M \times N$ e os níveis de cinza necessários para geração de uma imagem digitalizada. Os autores explanam que tais parâmetros são atribuídos à resolução espacial de uma imagem. A resolução está relacionada diretamente à densidade de *pixels* da imagem, de forma que, quanto menor for o intervalo de amostragem entre os *pixels* de uma imagem, maior será a densidade de *pixels*, resultando em uma melhor aproximação da representação da imagem original pela matriz digital – maior resolução da imagem. Em vista disso, deve-se

escolher a resolução de uma imagem que atenda aos níveis de detalhes que se deseja discriminar na imagem.

Neste contexto, as imagens de (a) – (f) da Figura 22 representam os resultados da redução da resolução espacial de uma imagem em seis resoluções diferentes, mantendo-se as mesmas dimensões, ampliando-se o tamanho do *pixel*. Desta forma, torna-se evidente a perda dos detalhes nas imagens de baixa resolução, onde: a Figura 21 (a) apresenta resolução 512 x 512 *pixels*; (b) 256 x 256 *pixels*; (c) 128 x 128 *pixels*; (d) 64 x 64 *pixels*; (e) 32 x 32 *pixels*; (f) 16 x 16 *pixels* (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

Figura 22 – Efeitos de redução da resolução espacial (em pixels).



Fonte: Pedrini e Schwartz, 2008.

2.7 Relacionamentos Básicos entre *Pixels*

É importante considerar as várias relações entre elementos f de uma imagem digitalizada, expressa por em uma matriz $f(x, y)$. Uma vez que, são os elementos constitutivos básicos das técnicas de processamento de imagens fundamentadas nas vizinhanças de *pixels* (PEDRINI, SCHWARTZ (2008); GONZALEZ, WOODS (2010)).

2.7.1 Vizinhança entre *pixels*

Pedrini e Schwartz (2008) explicam que em uma matriz bidimensional, um elemento f é caracterizado pelo *pixel* $f(x, y)$, este por sua vez relaciona-se com 2 vizinhos horizontais, 2 verticais e 4 diagonais. As coordenadas correspondentes aos *pixels* horizontais e verticais são respectivamente:

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1) \quad (8)$$

Formando assim, um grupo de *pixels* denominado de vizinhança-4 de um *pixel*. Para os quatro vizinhos diagonais, as coordenadas são:

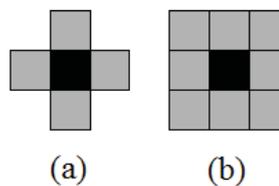
$$(x - 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x + 1, y - 1) \text{ e } (x + 1, y + 1) \quad (9)$$

Constituindo assim o que se denomina de vizinhança-8 de um *pixel*. Denotados pelo conjunto $N_d(f)$, em uma vizinhança-8 de um elemento f é atribuída à $N_8(f)$, sendo definida por:

$$N_8(f) = N_4(f) \cup N_d(f) \quad (10)$$

A Figura 23 ilustra em (a) uma vizinhança-4 de um *pixel* e em (b) uma vizinhança-8 de um *pixel* (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

Figura 23 – Tipos de vizinhança-4 e vizinhança-8 de um *pixel*.



Fonte: Adaptado de Pedrini e Schwartz, 2008.

2.7.2 Conectividade, adjacência, regiões e fronteiras

A conectividade entre *pixels* é um conceito importante para a definição de contornos de objetos e elementos constitutivos de uma mesma região em uma imagem. Para a determinação da conectividade entre dois *pixels*, deve-se verificar a forma que estão

adjacentes segundo o tipo de vizinhança adotado e se seus níveis de intensidade de cinza, cor ou textura satisfazem o critério de similaridade. Como exemplo, pode-se citar que em uma imagem binária, dois *pixels* lado a lado, podem assumir os valores 0 e 1, formando uma vizinhança-4, no entanto, somente serão considerados conectados se possuírem o mesmo valor (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

Segundo Gonzalez e Woods (2010), a discriminação do contorno interno em relação ao contorno externo da região para a determinação da fronteira de *pixels*, é utilizada no desenvolvimento de algoritmos denominados de seguidores de contorno (*border following*). Os autores enfatizam que esses algoritmos tem a tarefa de garantir que o resultado do seguimento do contorno seja um caminho fechado.

2.7.3 Operações lógicas e aritméticas

As operações lógicas e aritméticas são frequentemente utilizadas em diversas aplicações de processamentos digitais de imagens, permitindo a realização de modificações na imagem, simplificação de dados para o processamento e extração de resultados de interesse prático (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010).

Sob o ponto de vista de Solomon e Breckon (2013), as operações aritméticas ou lógicas com imagens, tratam do tipo mais básico de processamento, o qual está relacionado à transformação pontual (*pixel*), onde são mapeados os valores em *pixels* (pontos individuais) da imagem de entrada a *pixels* correspondentes na imagem de saída. Neste contexto, os autores enfatizam que as operações aritméticas básicas – adição, subtração, multiplicação e divisão – podem ser efetuadas de forma rápida e fácil em *pixels* de imagens.

As quatro operações aritméticas básicas aplicadas ao processamento digital de imagem, podem ser expressas da seguinte forma (MARQUES FILHO, VIEIRA NETO, 1999; FORESTI, 2006; PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010):

- **Adição:** usada para fazer a média de imagens para redução de ruído e também sobrepor o conteúdo de uma imagem em outra. A Figura 24 exemplifica a adição entre a imagem (a) e (b), resultando na Figura 23 (c);

$$s(x, y) = f(x, y) + g(x, y) \quad (11)$$

• **Subtração:** útil na remoção de informações estáticas de fundo. Detecção de diferenças entre duas imagens (eventualmente adquiridas de forma consecutiva) da mesma cena. Ilustrado na Figura 23 (d);

$$d(x, y) = f(x, y) - g(x, y) \quad (12)$$

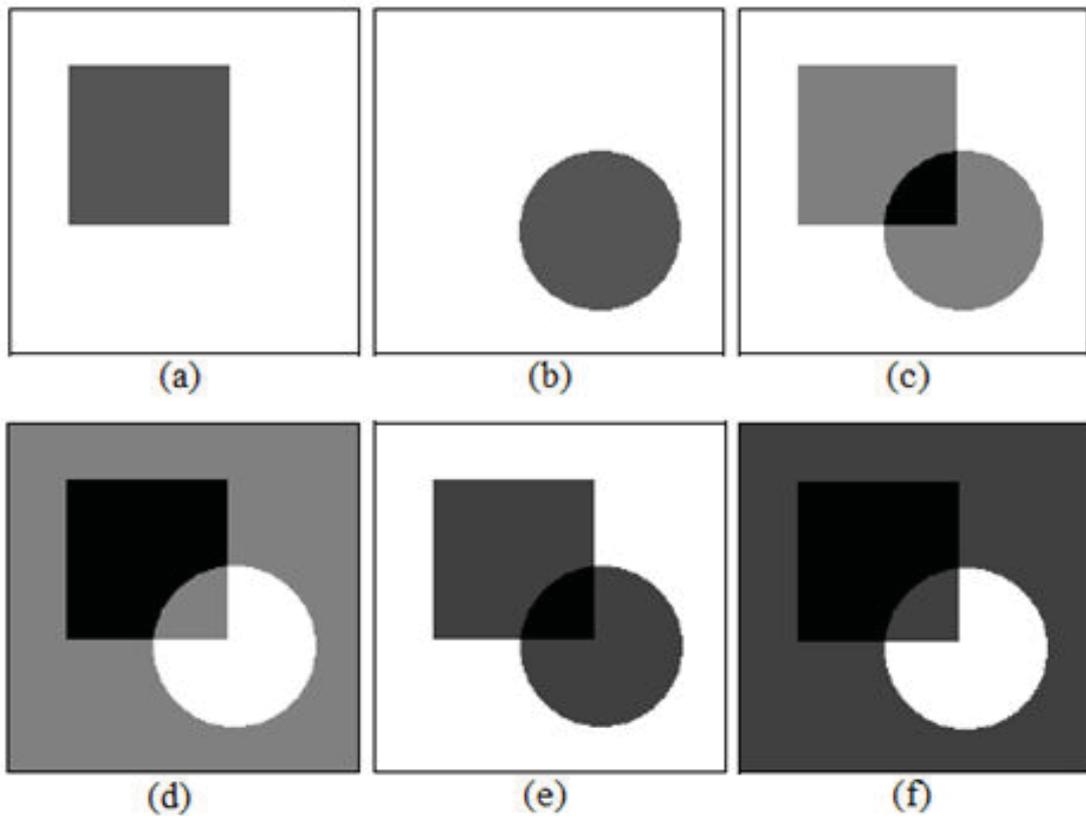
• **Multiplicação:** aplicada na correção de sombras (Calibração de brilho). Apresentado na Figura 23 (e);

$$p(x, y) = f(x, y) \times g(x, y) \quad (13)$$

• **Divisão:** também aplicada na correção de sombras, por meio da normalização do brilho. Ilustrado na Figura 23 (f);

$$v(x, y) = \frac{f(x, y)}{g(x, y)} \quad (14)$$

Figura 24 – Exemplos de operações aritméticas em imagens monocromáticas.



Fonte: Adaptado de Marques Filho, Vieira Neto, 1999.

Quanto às operações lógicas, de acordo com Pedrini e Schwartz (2008) e também a Gonzalez e Woods (2010), são utilizadas na manipulação de imagens binárias (*pixels* com valores 0 e 1) e na formulação de expressões de lógica com maior complexidade. Como por exemplo, permitindo a combinação de informações entre imagens e/ou extrair regiões de interesse. A Figura 25 representa alguns exemplos de aplicações práticas de operações lógicas. As principais operações lógicas correspondem à:

- **AND** (E): utilizada na detecção de diferenças de imagens, evidenciando regiões-alvo com uma máscara binária. Expressa por:

$$f_1(x, y) \text{ AND } f_2(x, y) \quad (15)$$

- **OR** (OU): útil para detectar objetos que movimentaram-se entre quadros. Expressa por:

$$f_1(x, y) \text{ OR } f_2(x, y) \quad (16)$$

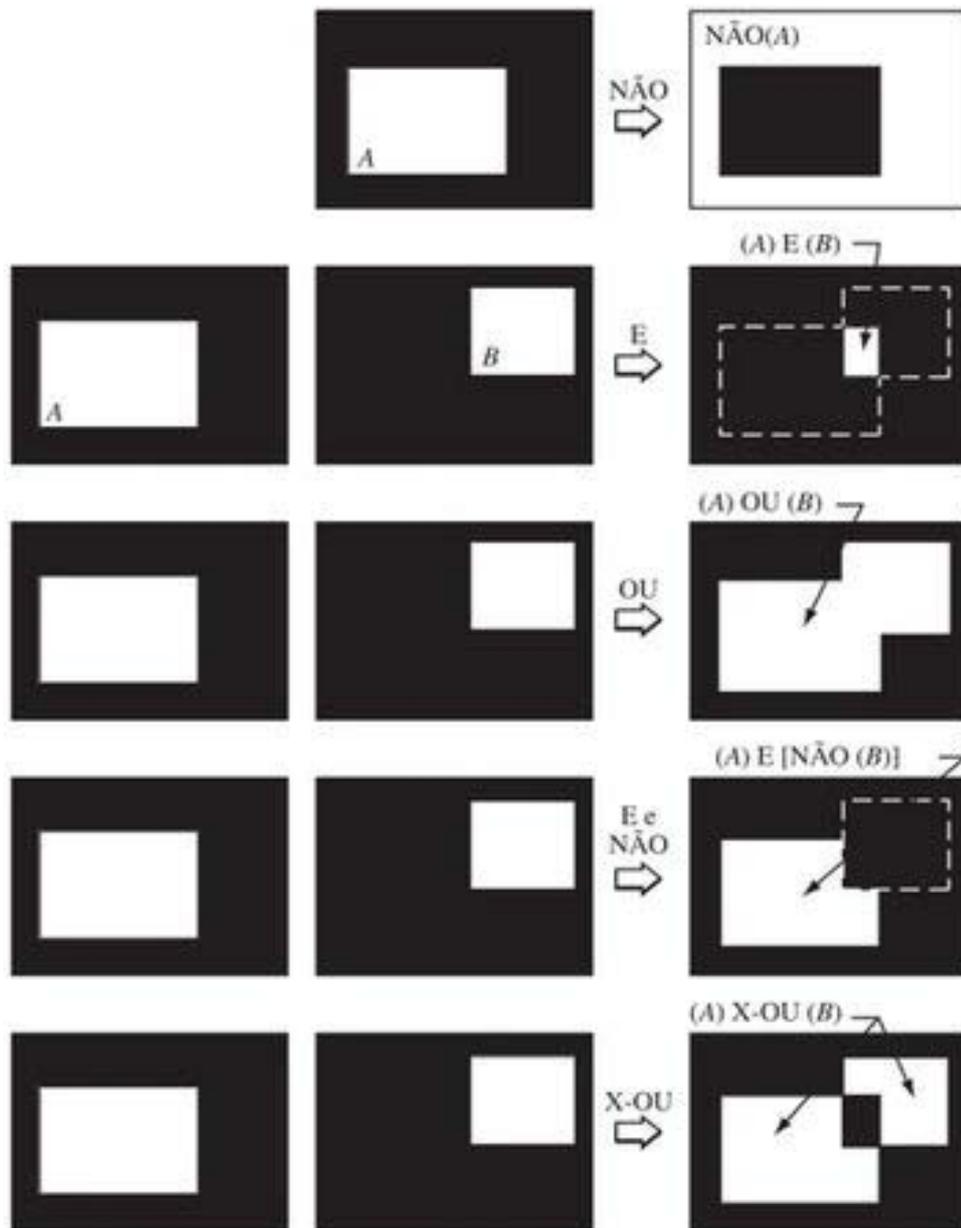
- **NOT** (NÃO): faz a inversão da representação da imagem. Expressa por:

$$\text{NOT } (f_1(x, y)) \quad (17)$$

- **XOR** (XOU): útil no processamento de imagens de valores binários (0 e 1). Expressa por:

$$f_1(x, y) \text{ XOR } f_2(x, y) \quad (18)$$

Figura 25 – Ilustração de operações lógicas envolvendo pixels.



Fonte: Gonzalez e Woods, 2010.

2.8 Pré-Processamento de Imagens

A etapa do pré-processamento de imagens tem por objetivo o aprimoramento do nível de detalhes da imagem, através de técnicas de manipulação do realce de contraste, remoção de ruído e isolamento de regiões de interesse para uma aplicação específica e obtenção de sucesso nas etapas seguintes, como por exemplo, no processo de segmentação (FORESTI, 2006; PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

2.8.1 Realce de imagens

A aplicação das técnicas de realce visam evidenciar ou aprimorar os aspectos de determinadas características de uma imagem, adequando-a para aplicações em processamentos de imagens digitais. Este processo é de fundamental importância no pré-processamento de imagens, quando há a necessidade de melhorar a qualidade de uma imagem que sofreu degradação causada pela introdução de ruído, borramento, perda de contraste, distorção devido ao dispositivo de captura ou a circunstâncias inapropriadas de iluminação da cena (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

Sob o ponto de vista de Solomon e Beckon (2013), o objetivo básico da aplicação de realce é processar a imagem de modo que possamos ver e avaliar a informação visual nela contida com maior clareza.

Com relação às principais técnicas de realce de imagens, evidenciam-se dois métodos básicos que se resumem à: domínio espacial e domínio de frequência (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; NIKU, 2013).

2.8.1.1 Domínio espacial

Os processos no domínio espacial acessam e operam sobre as informações de cada *pixel* da imagem, a qual é diretamente afetada pela operação. Este autor ressalta que, muitas das aplicações em sistemas de visão de máquinas, baseiam-se no domínio espacial, como por exemplo, detecção de bordas, morfologia, filtros e etc. (NIKU, 2013).

Gonzalez e Woods (2010), enfatizam que, o domínio espacial consiste basicamente em uma vizinhança de *pixels* associada a uma operação predefinida, realizada sobre os *pixels* da imagem inclusos na vizinhança.

Uma das operações espaciais é a operação denominada ponto a ponto. Neste caso, o realce depende somente do nível de cinza do *pixel* em questão. A função de pré-processamento ponto-a-ponto pode ser expressa por (GRASSI, 2005; FORESTI, 2006; GONZALEZ, WOODS, 2010):

$$g(x, y) = R[f(x, y)] \quad (19)$$

Onde: $f(x, y)$ é a imagem de entrada; $g(x, y)$ é a imagem processada e R é a função de transformação de níveis de cinza (função mapeamento).

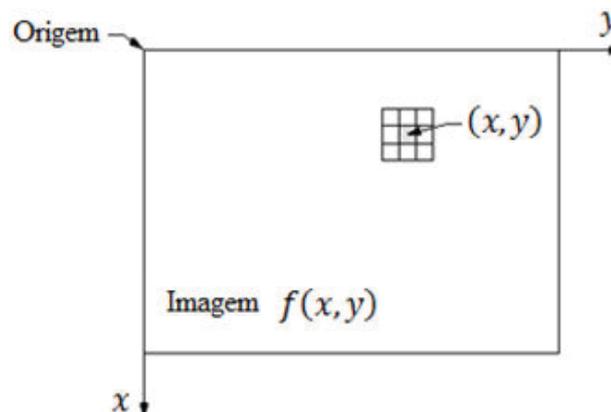
No processamento pontual a forma mais simples de R ocorre quando a vizinhança é 1×1 *pixels* e, logo, g depende apenas do valor de f em (x, y) . Podendo ser expresso como uma função de transformação T , como (GRASSI, 2005; GONZALEZ, WOODS, 2010):

$$s = T(z) \quad (20)$$

Onde: z é a intensidade de um *pixel* na imagem original e s é a intensidade mapeada do *pixel* relutante na imagem processada.

A principal técnica para definir uma vizinhança sobre (x, y) é o uso de uma região quadrada ou retangular centrada em (x, y) . Onde, o centro da região é movido por todos os *pixels* da imagem de entrada $f(x, y)$, aplicando o operador a cada posição (x, y) para produzir $g(x, y)$. Como representa a Figura 26 (GRASSI, 2005).

Figura 26 – Região de vizinhança 3×3 *pixels*.



Fonte: Adaptado de Gonzalez e Woods, 2010.

Segundo Grassi (2005) e também a Pedrini e Schwartz (2008), uma das técnicas de domínio espacial, que é utilizada com frequência no pré-processamento de imagens, refere-se à aplicação de máscaras de convolução, conhecidas também como janelas ou filtros, aplicadas diretamente sobre a imagem. Estas máscaras, segundo o autor, são dispostas de forma bidimensional, como por exemplo, 3×3 *pixels*, cujo valor do resultado de operação de filtragem serve para detectar uma determinada propriedade em uma imagem.

O processo de filtragem espacial linear é ilustrado na Figura 27, usando uma vizinhança 3×3 *pixels*. Onde, em um ponto qualquer (x, y) da imagem, o resultado de $g(x, y)$, do filtro, corresponde à soma dos produtos dos coeficientes do filtro com os *pixels* da imagem compreendidos pela filtragem (GONZALEZ e WOODS, 2010).

$$g(x, y) = w(-1, -1)f(x - 1, y - 1) + w(-1, 0)f(x - 1, y) + \dots + w(0, 0)f(x, y) + \dots + w(1, 1)f(x + 1, y + 1) \quad (21)$$

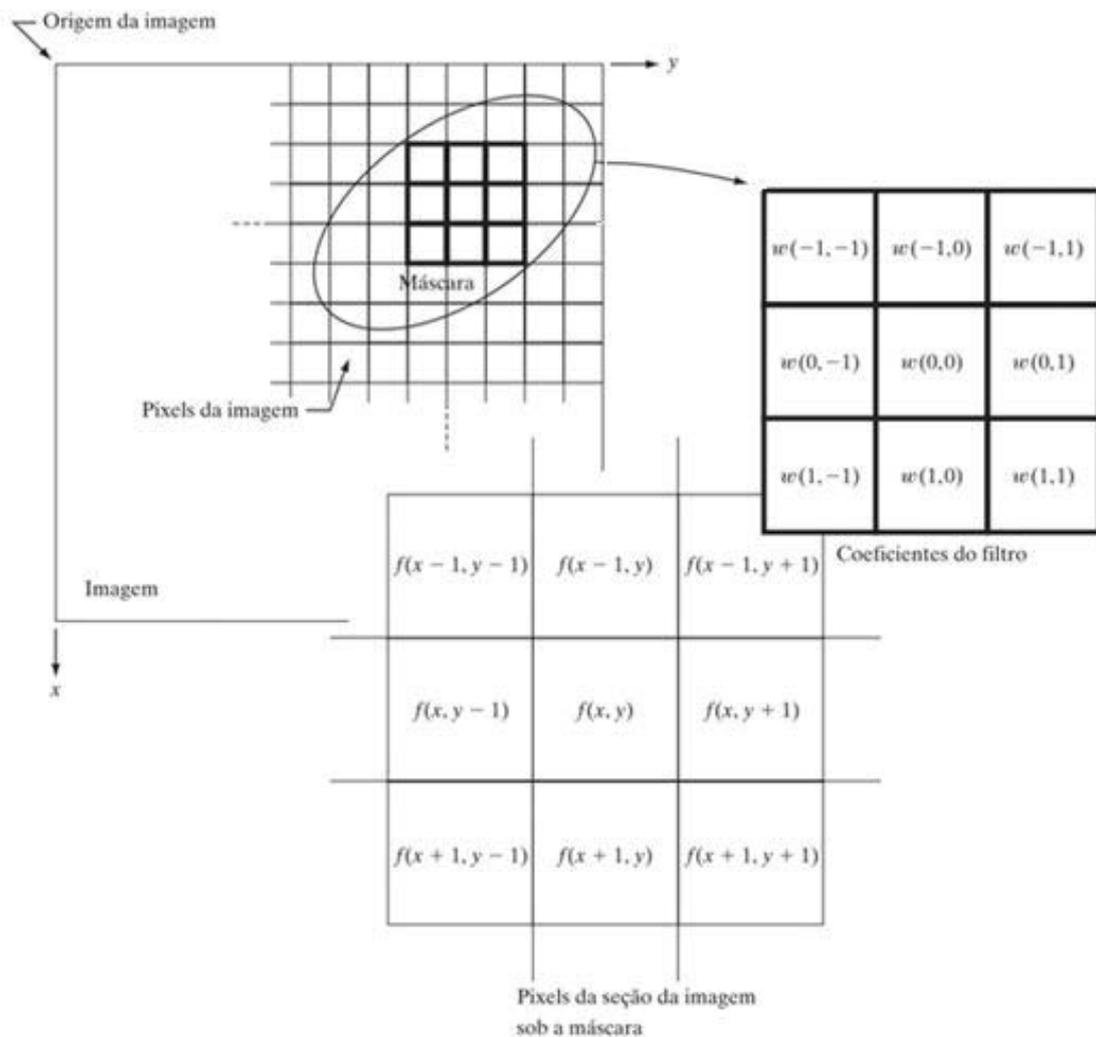
Onde: o coeficiente central do filtro, $w(0, 0)$, alinha-se como o *pixel* da posição (x, y) .

Em geral, a filtragem espacial linear de uma imagem com dimensões $M \times N$ *pixels*, com um filtro de tamanho proporcional à $m \times n$, é dada pela expressão (GONZALEZ; WOODS, 2010):

$$g(x, y) = \sum_{s=-a}^a \sum_{t=-b}^b w(s, t)f(x + s, y + t) \quad (22)$$

Onde: a e b são números inteiros positivos; x e y variam de forma que cada *pixel* w percorre todos os *pixels* f .

Figura 27 – Funcionamento da filtragem espacial linear utilizando uma máscara 3 x 3 *pixels*.



Fonte: Adaptado de Gonzalez e Woods, 2010.

2.8.1.2 Domínio da frequência

O domínio de frequência baseia-se na modificação dos *pixels* de uma imagem, geralmente por meio da aplicação da transformada de Fourier (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008). Neste contexto, Niku (2013) explica que, quando a transformada de Fourier de uma imagem é calculada, o espectro de frequência resultante pode apresentar com clareza a frequência da ocorrência de ruído em uma imagem. Desta maneira, em diversos casos o espectro da frequência pode ser usado para realizar a alteração, análise ou processamento da imagem, possibilitando a eliminação do ruído de forma seletiva através da filtragem adequada, não usando os *pixels* individuais e seus respectivos valores neste processo, diferentemente do domínio espacial.

Gonzalez e Woods (2010) ressaltam a importância da aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT, de *Fast Fourier Transform*) em algoritmos de processamento de sinais, na otimização do processamento computacional de uma série de sinais, como em monitores, digitalizadores e em inúmeras metodologias de processamento de imagens.

2.8.2 Histograma

O histograma é uma representação gráfica da frequência relativa do número total de *pixels* de uma imagem em cada nível de cinza. Niku (2013) explica que os dados de um histograma podem ser usados em diversos processos, incluindo: a limiarização, na determinação de um ponto de corte, auxiliando a conversão de uma imagem em forma binária; na identificação de níveis predominantes de cinza em uma imagem digitalizada, com a finalidade de determinar o nível ruidoso de cinza, buscando a neutralização ou remoção deste ruído; na separação de um objeto do fundo da imagem capturada (para isto as cores ou valores de cinza devem estar discriminados); e entre outros.

Através da visualização do histograma de uma imagem, pode-se obter a indicação qualitativa referente ao nível de contraste e brilho. Este autor explica também que, “o histograma não tem nenhuma ligação com o posicionamento dos objetos na imagem”. Como por exemplo, descreve que, duas imagens com tamanhos iguais – com mesmo número de *pixels* – de um objeto claro em um fundo escuro, geram o mesmo histograma para este objeto

em diferentes posições, no entanto, garante-se que o número de *pixels* claros e escuros nas duas imagens são os mesmos (FORESTI, 2006).

Segundo Gonzalez e Woods (2010), o processamento do histograma de uma imagem digital com níveis de cinza no intervalo $[0, L - 1]$ é uma função discreta, do tipo:

$$h(r_k) = n_k \quad (23)$$

Onde: r_k é o k -ésimo valor de nível de cinza, n_k é o número de *pixels* com esse nível de cinza.

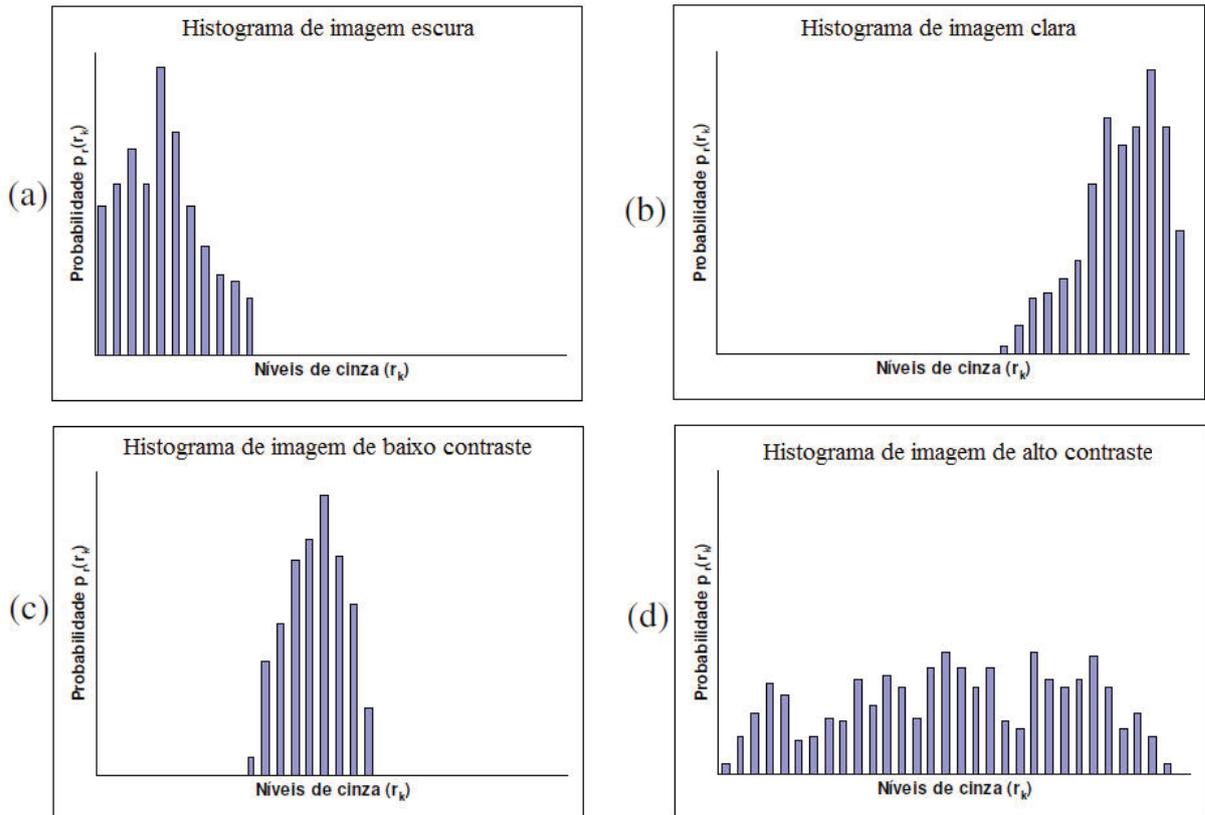
Usualmente, conforme Gonzalez e Woods (2010) faz-se a normalização do histograma dividindo-se cada um desses componentes pelo número total de *pixels* constituintes da imagem, dado pelo produto MN (linha, coluna). Sendo assim, a normalização de um histograma para $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$, é expressa por:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{MN} \quad (24)$$

Onde: $p(r_k)$ representa uma estimativa da probabilidade de ocorrência do nível de cinza r_k de uma imagem. “Um gráfico dessa função para todos os valores de k fornece uma descrição global da aparência de uma imagem” (GRASSI, 2005).

O processamento de histogramas para transformações de níveis de cinza de uma dada imagem são ilustrados na Figura 28 apresentando quatro características básicas: (a) imagem escura, (b) imagem clara, (c) imagem de baixo contraste e (d) imagem de alto contraste. De maneira que, no eixo horizontal r_k , do histograma corresponde ao valor de intensidade da imagem e no eixo vertical, representam-se os valores da função 23 ou da função 24, caso se trate de valores normalizados (FORESTI, 2006; GONZALEZ, WOODS, 2010).

Figura 28 – Quatro tipos básicos de imagens e seus histogramas correspondentes.



Fonte: Foresti, 2006.

Segundo Gonzalez e Woods (2010), assim como Foresti (2006), a equalização de histograma permite a reconfiguração dos valores de tons de cinza de uma imagem, a fim de se obter um histograma uniforme. A função discreta de transformação para equalizar um histograma é dada por:

$$S_K = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_K(r_K) = \frac{(L - 1)}{MN} \sum_{j=0}^k n_k \quad (25)$$

Onde: MN é o número total de *pixels* da imagem; n_k é o número de *pixels* com intensidade r_k ; $0 \leq r_k \leq 1$; $k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$; L é o número de níveis de cinza possíveis da imagem.

Foresti (2006) comenta que o histograma também é aplicado às imagens coloridas. De maneira que, a imagem é decomposta em seus componentes R, G e B, gerando um histograma para cada componente (plano 2D).

2.9 Segmentação

A segmentação é a etapa do processamento de imagens que consiste na tarefa de dividir uma imagem em regiões ou em objetos de interesse, auxiliando o processo de interpretação e análise de imagens. Em geral, o processo de segmentação é autônomo. O processo de segmentar um número de objetos, que possivelmente apresentam dimensões, formas e posicionamentos diferentes, é uma tarefa que depende do desenvolvimento de algoritmos que extraiam de forma precisa as características dos objetos, especificamente em imagens ruidosas. Neste contexto, pode-se dizer que quanto maior for a precisão da segmentação, maior serão as possibilidades de garantir o sucesso na solução de problemas onde há necessidade de identificar objetos individualmente (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010).

Grande parte dos algoritmos de segmentação baseiam-se nas propriedades fundamentais de valores de níveis de cinza (intensidade), que visam a 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).

2.9.1 Limiarização

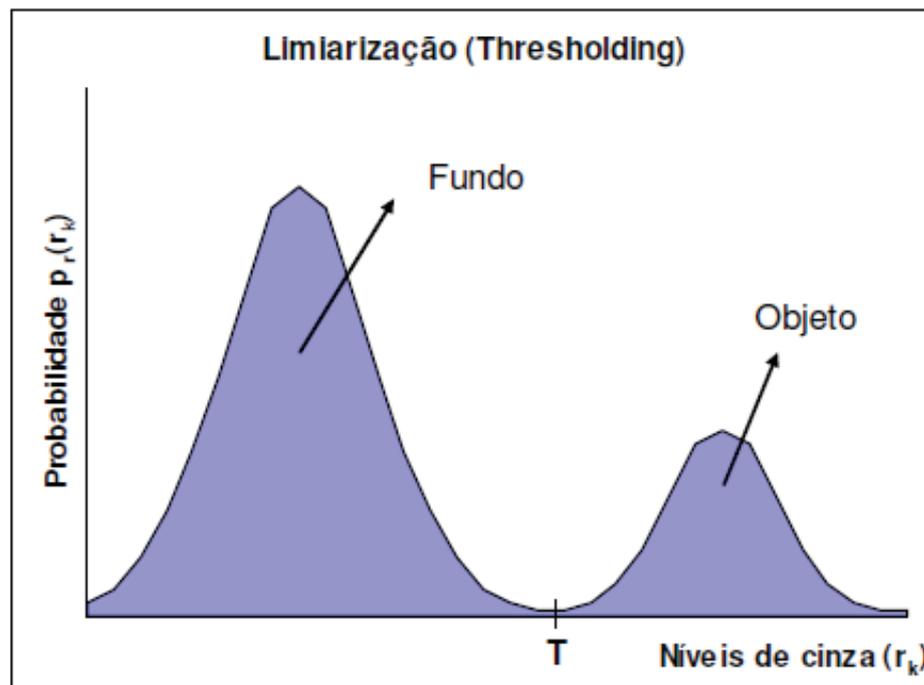
A limiarização consiste no processo de categorização dos *pixels* de uma imagem através da determinação de um ou vários limiares. Selecionando um determinado nível de cinza como limite, por meio da análise do histograma obtido da imagem, e assim, dividindo diretamente a imagem em níveis (porções) com base nos valores de intensidade e/ou as propriedades desses valores. A limiarização é uma das principais técnicas aplicadas em sistemas de visão de máquina na detecção de objetos, devido ao fato de dispor de propriedades intuitivas, simplicidade de implementação e alta capacidade de processamento (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; GONZALEZ, WOODS, 2010).

Para a fundamentação da limiarização de intensidade, os autores Gonzalez e Woods (2010) supõem a condição de um histograma de níveis de cinza, representado na Figura 29, correspondente a uma imagem, $f(x, y)$, formada por objetos claros sobre um fundo escuro, de

maneira que os *pixels* do objeto e do fundo tenham valores de níveis de cinza (intensidade) agrupados em dois modos. A forma óbvia de se extrair os objetos do fundo é por meio da seleção de um limiar T , que divide estes dois grupos (modos). Sendo assim, qualquer ponto (x, y) na imagem em que $f(x, y) > T$ é denominado de ponto objeto; se for o oposto, o ponto é chamado de fundo. Uma imagem limiarizada $g(x, y)$ pode ser definida por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } f(x, y) > T \\ 0 & \text{se } f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (26)$$

Figura 29 – Histograma de intensidade dividido por um único limiar T .



Fonte: Foresti, 2006.

Com base na imagem limiarizada $g(x, y)$ do histograma da Figura 29, pode-se denotar o valor 1 aos *pixels* (ou qualquer outro nível de cinza conveniente) que referem-se ao objeto, enquanto que os *pixels* com valor 0 denotado, correspondem respectivamente ao fundo. À vista disso, o resultado obtido pela limiarização é a binarização de uma imagem, com dois valores de intensidade, 1 (preto) ou 0 (branco) (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008).

A Figura 30 exemplifica a 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”, podendo-se tratar apenas com o objeto (GRASSI, 2005).

Figura 30 – Processo de limiarização.



Fonte: Grassi, 2005.

Pedrini e Schwartz (2008) enfatizam a importância de selecionar corretamente o valor de limiar, explicando que esta tarefa influencia diretamente na obtenção de bons resultados no processo de segmentação baseada na limiarização.

Segundo Pedrini e Schwartz (2008) e à Gonzalez e Woods (2010), as técnicas de segmentação de imagens baseadas em limiarização de seleção de um único limiar ou múltiplos limiares, dividem-se, dentre outras, em:

- **Limiarização global:** quando T é uma constante aplicável para segmentar uma imagem inteira;
- **Limiarização variável:** quando o valor de T varia ao longo da imagem;
- **Limiarização local ou regional:** geralmente utilizada para denotar a limiarização variável, quando 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:** se T for dependente das coordenadas espaciais de (x, y) .

2.9.1.1 Método de Otsu

Gonzalez e Woods (2010) assim como Solomon e Breckon (2013) descrevem este método proposto por Otsu em 1979, como sendo um dos meios pelos quais calcula-se automaticamente um valor de limiar que minimize a variância estatística (σ^2) entre dois grupos de *pixels*, como por exemplo, a interclasse dos *pixels* preto e branco resultante da aplicação de limiarização, separando-se então a região de intensidade do fundo da imagem da região correspondente ao objeto. No entanto, Gonzalez e Woods (2010) comentam que para

aplicar o método de Otsu, faz-se necessária a normalização do histograma obtido da imagem, através da aplicação da equação (27). Sendo assim, para um determinado limiar T , têm-se dois grupos de pixels, o grupo C_0 , formado pelos valores $\{0, 1, 2, \dots, T - 1\}$ e o grupo C_1 , constituído pelos valores $\{T, T + 1, \dots, L - 1\}$. Usando a equação (27) obtém-se a variância de σ_B^2 .

$$\sigma_B^2 = W_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + w_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (27)$$

em que:

$$w_0 = \sum_{k=0}^{T-1} p_r(r_k) \quad (28)$$

$$w_1 = \sum_{k=T}^{L-1} p_r(r_k) \quad (29)$$

$$\mu_0 = \sum_{k=0}^{T-1} k \frac{p_r(r_k)}{w_0} \quad (30)$$

$$\mu_1 = \sum_{k=T}^{L-1} k \frac{p_r(r_k)}{w_1} \quad (31)$$

$$\mu_T = \sum_{k=0}^{L-1} k p_r(r_k) \quad (32)$$

Onde: σ_B^2 é a variância, w_0 é a probabilidade do grupo C_0 , w_1 é a probabilidade do grupo C_1 , μ_0 é a média do grupo C_0 , μ_1 é a média do grupo C_1 , k corresponde ao nível de cinza e μ_T corresponde à média total do histograma. Desta forma, ao aplicar-se a equação (27) para todos os possíveis limiares, o que resultar no maior valor para σ_B^2 será o limiar determinante T . (GONZALEZ, WOODS, 2010; FORESTI, 2006).

2.10 Processamento Morfológico de Imagens

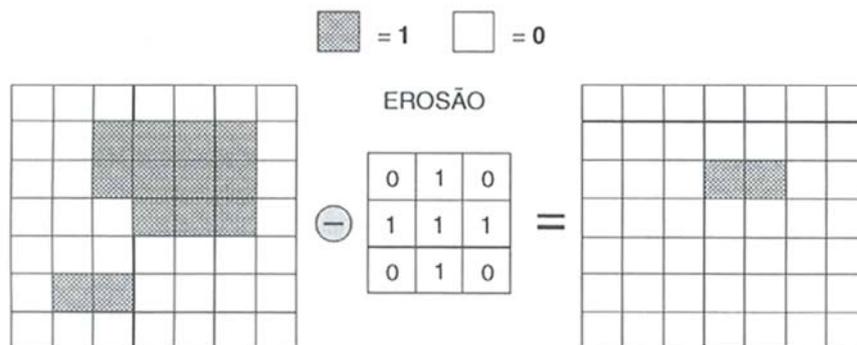
Conforme Solomon e Breckon (2013) a palavra morfologia significa o estudo de forma ou estrutura. Segundo aos autores, a utilização da morfologia matemática em processamento de imagens é ideal para extrair e identificar descritores de imagens, baseando-se nas características de formas ou contornos da imagem. As operações morfológicas podem ser aplicadas em diversos tipos de imagens, em destaque no processamento de imagens binárias. Na qual, têm-se como principais operadores morfológicos a dilatação e erosão.

Foresti (2006), assim como Gonzalez e Woods (2010) salientam que o mapeamento da morfologia binária é realizado por meio das operações matemáticas elementares sobre conjuntos, associados aos operadores de erosão e dilatação, representando assim os objetos encontrados em uma imagem. Grassi (2005) por sua vez, ressalta que estas operações morfológicas são executadas em uma imagem para auxiliar a análise assim como reduzir as informações desnecessárias que possam estar contidas na imagem.

2.10.1 Erosão

A erosão pode ser efetuada posicionando-se o *pixel* central (valor 1) do elemento estrutural sucessivamente em cada *pixel* de primeiro plano. Feito isto, um *pixel* de primeiro plano permanece de primeiro plano somente se os 1 no elemento estrutural ficarem contidos totalmente no primeiro plano da imagem. Caso isto não ocorra, – se quaisquer dos pixels vizinhos forem de segundo plano, valor 0 – o *pixel* do primeiro plano é transformado em *pixel* do segundo plano. A Figura 31 ilustra o método de erosão com elemento estrutural em forma de cruz (SOLOMON, BRECKON, 2013).

Figura 31 – Operação morfológica de erosão em imagem binária.



Fonte: Solomon e Breckon, 2013.

Gonzalez e Woods (2010) assim como Solomon e Breckon (2013), explicam que a erosão de uma imagem A pelo elemento B , sejam A e B conjuntos no espaço Z^2 , pode ser denotada por $A \ominus B$, sendo definida por:

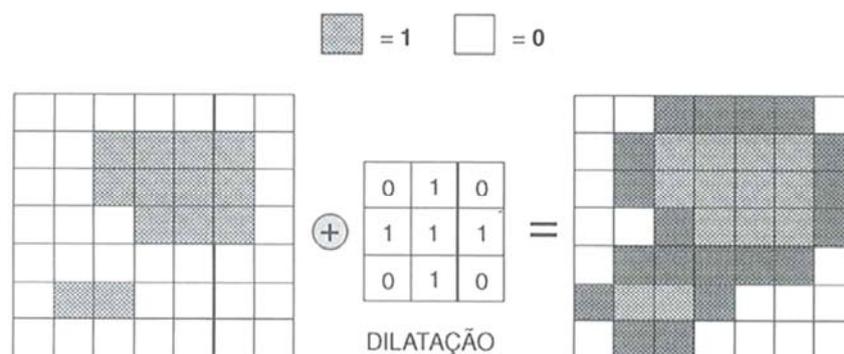
$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (33)$$

Onde: a erosão de A por B resulta no conjunto de pontos z tais que B , transladado de z , está em A . Desta forma, o conjunto A representa o conjunto de *pixels* da imagem e o conjunto B , representa o elemento estruturante (FORESTI, 2006; GONZALEZ, WOODS, 2010).

2.10.2 Dilatação

A operação morfológica de dilatação, segundo Solomon e Breckon (2013) é efetuada em uma imagem binária, posicionando-se o *pixel* central do elemento estrutural sucessivamente em cada *pixel* de segundo plano de uma imagem. Em que, um *pixel* de segundo plano mantém-se de segundo plano apenas se os 1 no elemento estrutural ficarem totalmente contidos no segundo plano da imagem. Quando não acontecer isto, o *pixel* de segundo plano é transformado em *pixel* de primeiro plano. A Figura 32 ilustra o método de dilatação com elemento estrutural em forma de cruz.

Figura 32 – Operação morfológica de dilatação em imagem binária.



Fonte: Solomon e Breckon, 2013.

Gonzalez e Woods (2010) comenta que, ao contrário da operação de erosão que afina ou diminui um contorno de uma imagem, a dilatação engrossa ou aumenta os contornos de um objeto em uma imagem binária. De acordo com os autores, a operação morfológica de

dilatação de uma imagem, na qual, sejam A e B conjuntos no espaço Z^2 e \emptyset , pode ser denotada por $A \oplus B$, sendo definida como:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (34)$$

Segundo a Foresti (2006) como também a Gonzalez e Woods (2010) o processo de dilatação baseia-se na obtenção da reflexão de B em relação a sua origem, seguido da translação dessa reflexão por z . A dilatação de A por B é, então, o conjunto de todos os deslocamentos z tais que \hat{B} e A sobreponham-se em pelo menos um elemento diferente de 0. Essa interpretação permite que a Equação (34) seja reescrita como:

$$A \oplus B = \{z | [(\hat{B})_z \cap A] \subseteq A\} \quad (35)$$

Onde: o conjunto de A representa o conjunto de *pixels* da imagem e o conjunto de B , o elemento estruturante (FORESTI, 2006).

2.10.3 Abertura e fechamento morfológicos

As operações morfológicas de abertura e fechamento em imagens binárias são de grande relevância em análise de imagens. Onde a abertura de A por B , é denotada por (PEDRINI, SCHWARTZ, 2008; SOLOMON, BRECKON, 2013):

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (36)$$

O resultado geral da abertura é a suavização do contorno de uma imagem, quebrando estreitas regiões adjacentes em um objeto, por meio da remoção de pequenos objetos isolado do segundo plano e o posicionamento destes no primeiro plano. Sendo assim, a operação morfológica de abertura nada mais é que a erosão seguida de dilatação como o mesmo elemento estrutural (FORESTI, 2006; SOLOMON, BRECKON, 2013).

Quanto ao fechamento, Pedrini e Schwartz (2008) e também Solomon e Breckon (2013) explicam que esta operação morfológica tende a eliminar pequenos buracos do primeiro plano de uma imagem e posteriormente, reposicionar pequenas regiões do segundo

plano no primeiro plano. Ou seja, trata-se da operação morfológica de dilatação seguida de erosão com o mesmo elemento estrutural. O fechamento de A por B , é denotado por:

$$A \circ B = (A \oplus B) \ominus B \quad (37)$$

Onde: “pode ser interpretado geometricamente como a união de todas as translações de B que estão contidas em A ” (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

2.10.4 Afinamento

Segundo Pedrini e Schwartz (2008) assim como Solomon e Breckon (2013), o afinamento de uma imagem A por um elemento estrutural B , relaciona-se a uma transformada acerto-ou-erro, sendo denotado pela expressão:

$$afinamento(A, B) = A \cap \overline{A \otimes B} \quad (38)$$

Onde: $A \otimes B$ é a transformação acerto-ou-erro de A com B . Sendo explicado por Solomon e Breckon (2013) como o cálculo pelo qual a origem do elemento estruturante é sucessivamente deslocada para cada *pixel* na imagem, e comparada a imagem obtida originalmente. Caso os pixels de primeiro e segundo plano no elemento estrutural coincidirem diretamente com os *pixels* da imagem, o pixel na imagem sob a origem do elemento estrutural é transformado em pixel de segundo plano. Se a coincidência não ocorrer, o pixel não é alterado. Os autores ressaltam que a operação de afinamento é fundamental para aplicação prática de algoritmos para o cálculo de esqueletização de uma imagem.

2.10.5 Esqueletização

A esqueletização de um objeto em uma imagem binária é a representação em forma estrutural básica do objeto reduzida a espessura de um pixel. Esta operação morfológica utiliza um algoritmo de afinamento para obtenção do eixo médio de uma região (MAT, do inglês *Medial Axis Transformation*), proposto por Blum (1967). O MAT de uma região tem como definição uma analogia “prado-fogo”: onde um objeto é incendiado e o fogo se propaga uniformemente para o interior do contorno, chegando a um ponto onde todas as frentes de fogo se encontram, apagando umas às outras, formando assim o esqueleto do objeto. Pode-se

dizer então, que este algoritmo de afinamento elimina iterativamente os pontos da fronteira de uma região, seguindo restrições como: (a) não remoção dos pontos extremos; (b) não quebrar a conectividade e (c) não acarretar uma erosão excessiva da região (GONZALEZ, WOODS, 2010; SOLOMON, BRECKON, 2013).

2.10.6 Extração de contornos

Conforme Solomon e Breckon (2013) pode-se determinar um contorno (fronteira ou perímetro) de um objeto erodindo-o através da aplicação de um elemento estrutural apropriado com pequena proporção ϵ , na sequência, subtrair o resultado da imagem original.

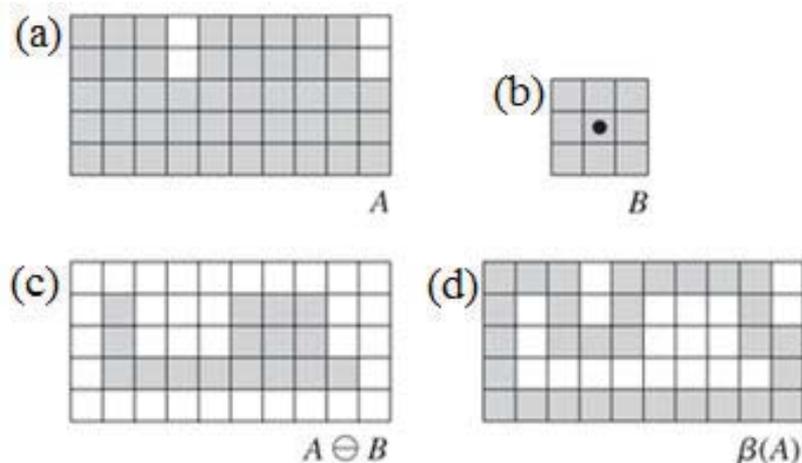
A extração do contorno de um objeto em uma imagem binária, de acordo com Gonzalez e Woods (2010) pode ser obtida pela erosão de A pelo elemento estruturante B específico, seguida pela diferença de conjuntos entre A e sua erosão, de forma que, seja $\beta(A)$ a fronteira de um conjunto de A . Sendo assim definida como:

$$\beta(A) = A - (A \ominus B) \quad (39)$$

Onde: $\beta(A)$ = fronteira do conjunto A ; A = conjunto de *pixels* e B = elemento estruturante (FORESTI, 2006, P.26).

A operação morfológica de extração de fronteira é ilustrada na Figura 33, na qual: (a) apresenta uma imagem de um objeto binário simples; (b) um elemento estruturante B ; (c) A erodido por B e (d) o resultado $\beta(A)$ obtido pela aplicação da equação (39).

Figura 33 – Operação morfológica de extração de fronteira de um objeto em imagem binária.



Fonte: Gonzalez e Woods, 2010.

2.11 Geração de Trajetórias

A geração de trajetórias no espaço cartesiano é realizada geralmente sobre uma superfície. Desta são extraídas e identificadas as informações de posicionamento ao longo de uma trajetória definida, por meio de uma interpolação numérica (HENRIQUES, 2005).

De acordo com Craig (2012) e Niku (2013), os movimentos cartesianos em linha reta entre pontos e, a combinação de múltiplos destinos com pontos de passagem são as trajetórias mais comumente aplicadas nas indústrias. Os autores salientam que para planejar e gerar trajetórias cartesianas em linha reta, as posições e as orientações iniciais devem ser calculadas e divididas em pequenos segmentos.

No caso da soldagem robotizada, a definição de uma trajetória de soldagem em um plano 2D pode ser realizada através da modelagem matemática da superfície, possibilitando desta forma o fornecimento de uma descrição sequencial de pontos de coordenadas globais de passagem. Esses pontos correspondentes à forma geométrica do caminho da soldagem, ou seja, são obtidos pontos intermediários e/ou os pontos de início e fim do caminho, para que seja possível levantar parâmetros de polinômios de 3ª e 5ª ordem, com a finalidade de gerar a trajetória com parâmetros controlados de movimentação, posicionamento e orientação espacial do robô que a executará. Deve-se também, determinar os parâmetros temporais de movimentos do robô (lapso de tempo entre os pontos) ou associar tempo de aceleração (aceleração máxima e/ou velocidade de cruzeiro). (HENRIQUES, 2005; JUNEK FILHO, 2008; SICILLIANO et al., 2009; CRAIG, 2012).

Neste contexto Craig (2012) evidencia o estudo da cinemática dos manipuladores robóticos, que se baseia nas propriedades do movimento em relação ao tempo, tratando da relação dos movimentos do robô quanto ao posicionamento, velocidade e aceleração, sem considerar as forças que o causam.

Quanto à aplicação da cinemática em um processo de soldagem robotizado, Junek Filho (2008) explana que:

Para conhecer-se a posição/orientação da ferramenta de solda, deve-se definir o valor das variáveis de junta. Para se obter uma descrição do movimento do robô (posição e orientação variando no tempo) é preciso saber descrever a posição e orientação dos seus segmentos. Para isso, atrela-se um sistema de coordenadas a cada segmento. Assim, o problema da descrição da posição e orientação relativa dos segmentos do robô se transforma em um problema de descrição da posição e orientação relativa dos sistemas de coordenadas, que é solucionado com a construção de matrizes chamadas *transformações homogêneas*, que contém a

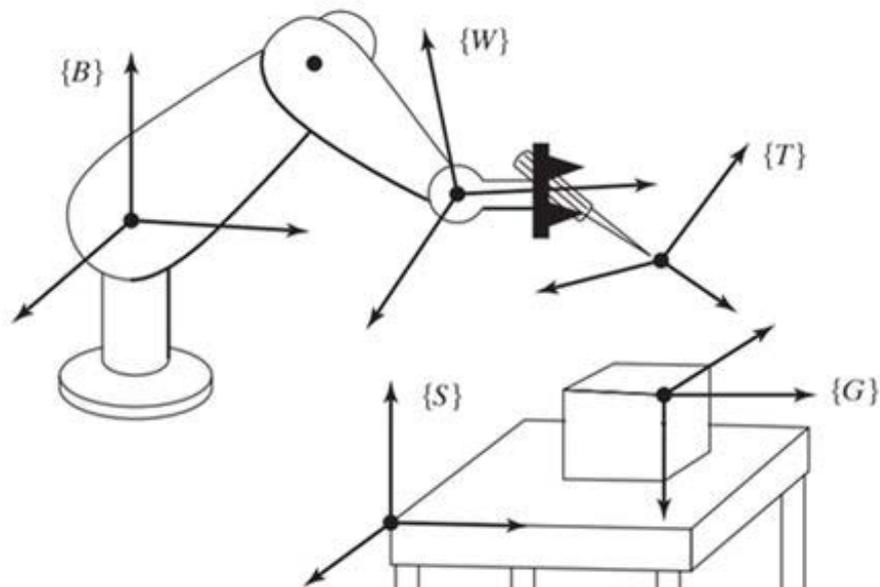
informação da posição e orientação relativa entre dois sistemas de coordenadas (JUNEK FILHO, 2008).

A solução para determinação dos ângulos das juntas de um robô necessários para o posicionamento e orientação da ferramenta (*tool frame*), $\{T\}$, em relação ao sistema da estação de trabalho (*station frame*), $\{S\}$, para execução de uma trajetória, pode ser dividida em duas etapas (CRAIG, 2012):

- a) Executar as transformações para determinar o sistema de referenciamento do punho (*wrist frame*), $\{W\}$, com relação ao sistema da base (*base frame*), $\{B\}$;
- b) Aplicar cálculos cinemáticos para determinar os ângulos das juntas.

A aptidão de calcular os ângulos das juntas é o fator elementar de diversos sistemas de controle robóticos, onde as CPU's realizam estes cálculos ordinariamente inúmeras vezes por segundo, decidindo a forma exata do percurso para o efetuador chegar até a posição desejada. A Figura 34 representa as localizações específicas de cinco sistemas de referências padrão associados com um robô e seu espaço de trabalho. A interação destes sistemas de referenciamento padrão mencionados, possibilitam o posicionamento e orientação dos ângulos de juntas do robô, em relação à movimentação e trajetória de $\{T\}$ até $\{G\}$ – sistema de referência meta (*goal frame*) –, que descreve a localização aonde o robô deverá conduzir a ferramenta (CRAIG, 2012).

Figura 34 – Localização dos sistemas de referência padrões.



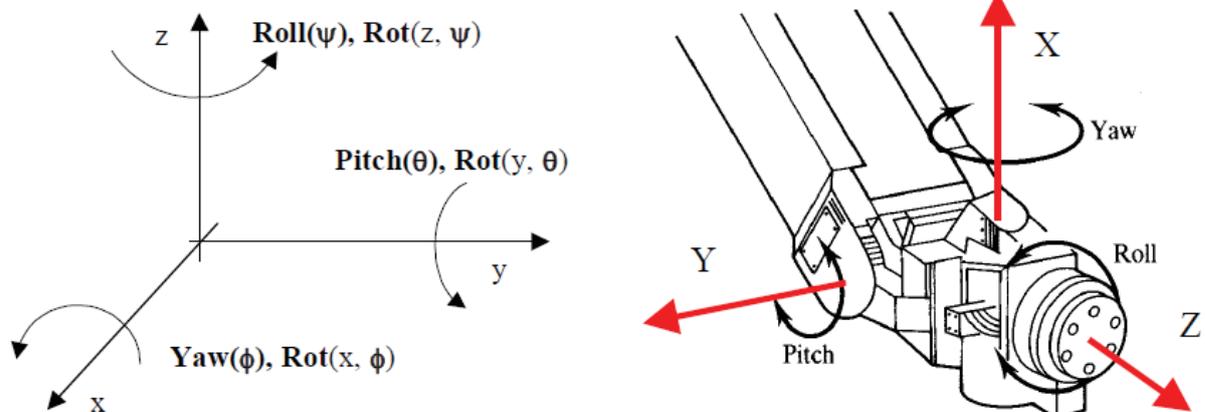
Fonte: Craig, 2012.

2.11.1 Orientação do punho

A forma de expressar a orientação do sistema de referência do punho $\{W\}$ com relação ao sistema de referência da base $\{B\}$ de um robô articulado, pode ser expresso pelas rotações em torno de três eixos (X, Y, Z) – ilustrado na Figura 35 –, denotando-se desta forma um variado número de combinações possíveis. Esse número é acrescido pelo fato de cada rotação em torno de um dado eixo poder ser efetuada em relação ao referencial original ou a um novo referencial criado para a meta da ferramenta (efetuador). Os ângulos de rotação em torno de cada um dos três eixos chamam-se usualmente ângulos de Euler e o seu significado depende da combinação de rotações aplicadas. O número de combinações distintas é de 12, sendo descrita a seguir a combinação de ângulos RPY (SANTOS, 2004; SICILLIANO et al., 2009; CRAIG, 2012):

- *Roll-Pitch-Yaw* (RPY): é a combinação de ângulos de rotação, em relação a um referencial fixo, segundo os eixos x, y e z por esta ordem. Esta sequência é frequentemente conhecida pelos termos ingleses *Roll-Pitch-Yaw*.

Figura 35 – Rotações RPY e correspondência usual num punho de robô.



Fonte: Santos, 2004.

2.11.2 Modelo cinemático do robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ

A descrição do modelo cinemático do robô RV-2AJ utilizado neste trabalho, pode ser expresso pela posição e orientação de seu efetuador, $\{W\}$, em relação a um sistema de coordenadas fixo à base, $\{B\}$, denotado pela função (40), vetorial f , que revela um vetor \vec{x} (espaço cartesiano) em função do vetor $\vec{\theta}$ (coordenadas angulares). A Figura 36 ilustra o

modelo cinemático do robô RV-2AJ o qual é constituído por 5 GDL (MITSUBISHI, 2002; ROSÁRIO, 2005; CRAIG, 2012).

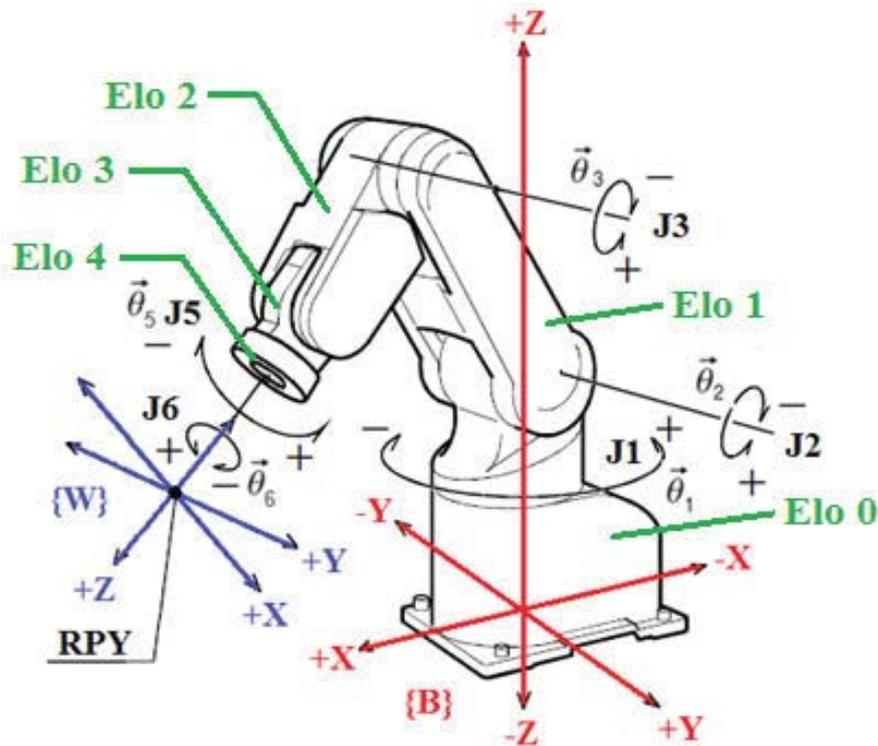
$$\vec{x} = f(\vec{\theta}) \quad (40)$$

Onde:

$\vec{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n) =$ vetor das posições angulares das juntas;

$\vec{x} = (p_x, p_y, p_z, \psi, \theta, \phi) =$ vetor de posição (os três primeiros termos denotam a posição cartesiana, e os três últimos, a orientação do efetuador).

Figura 36 – Modelo cinemático do robô RV-2AJ com 5 GDL.



Fonte: Adaptado de Mitsubishi, 2002.

Sendo: J1, J2, J3, J5 e J6 correspondentes às localizações das juntas de articulação, onde J4 não existe neste modelo de robô com 5 GDL, sendo especificado desta forma no manual técnico do fabricante Mitsubishi (2002). A definição dos vetores RPY (ψ, θ, ϕ) de orientação do punho do RV-2AJ são atribuídos respectivamente à $Rot(z, \psi) = A$, $Rot(y, \theta) = B$ e $Rot(x, \phi) = C$, em que o eixo $C = 0$ por não possuir rotação, devido a não existência da J4.

2.11.3 Representação de Denavit-Hartenberg

Quanto à questão cinemática de transformação do espaço das juntas para o espaço cartesiano e vice-versa, para que um robô como o RV-2AJ realize os movimentos de execução de uma trajetória. Uma solução analítica é dada através da aplicação de Denavit-Hartenberg (D-H) que permite descrever a representação da posição e orientação do efetuador do robô (AYOB et al., 2014).

Neste contexto, Craig (2012) explana que a convenção da notação de D-H descreve cinematicamente um robô através da atribuição dos valores de quatro parâmetros para cada elo, dos quais dois valores descrevem o elo em si (comprimento do elo e o ângulo de torção) e os outros dois valores descrevem a conexão do elo com um vizinho (distância entre elos e o ângulo da junta). A simbologia usual associada aos parâmetros de D-H é representada na tabela 2.

Tabela 2 – Simbologia dos parâmetros de Denavit-Hartenberg

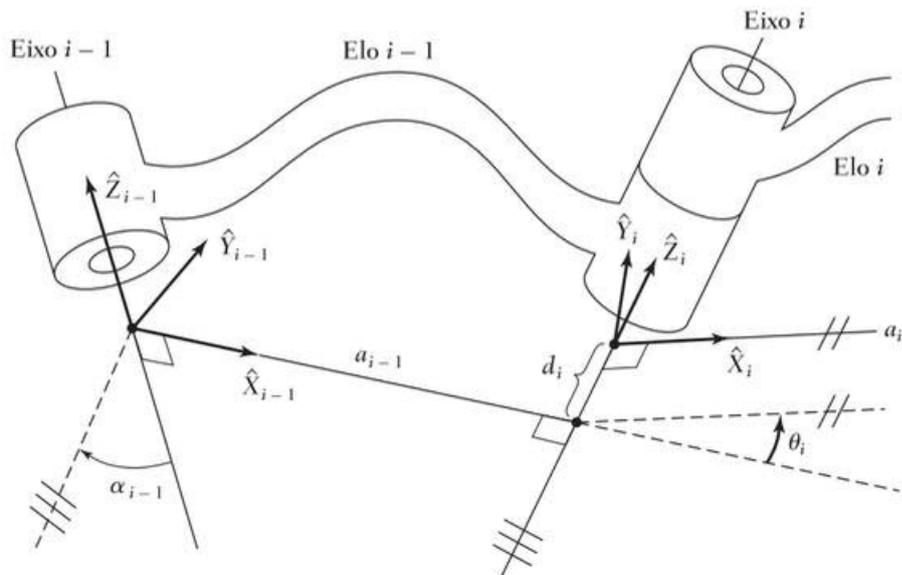
Parâmetros	Simbologia	Junta de rotação
Comprimento do elo	a	Constante
Ângulo de torção	α	Constante
Distância entre elos	d	Constante
Ângulo da junta	θ	Variável

Fonte: Adaptado de AYOB et al., 2014.

A fim de descrever por D-H, a posição relativa de cada elo em relação aos seus vizinhos, deve-se definir o sistema de referência fixado a cada um dos elos existentes no robô. Os sistemas de referência dos elos, como ilustrado na Figura 37, são nomeados por número de acordo com o elo ao qual estão fixados; isto é, o sistema de referência $\{i\}$ está rigidamente fixado ao elo i , que por sua vez, têm um eixo de junta em comum com o elo vizinho, chamado de eixo i . Um dos parâmetros de interconexão está associado com a distância ao longo desse eixo, de um elo para o próximo, sendo denominado de distância entre elos, d_i . O segundo parâmetro descreve a quantidade de rotação em torno desse eixo i , sendo chamado de ângulo de junta θ_i . À vista disso, para cada um dos eixos, precisa-se atribuir ordenadamente um sistema cartesiano $\hat{X}_i \hat{Y}_i \hat{Z}_i$ para determinar a posição e orientação entre os elos. Para identificar os parâmetros D-H exigidos, as seguintes definições podem ser aplicadas (CRAIG, 2012; AYOB et al., 2014):

- a_i = a distância de \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medida ao longo de \hat{X}_i ;
 α_i = o ângulo de \hat{Z}_i a \hat{Z}_{i+1} medido ao longo de \hat{X}_i ;
 d_i = a distância de \hat{X}_{i-1} a \hat{X}_i medida ao longo de \hat{Z}_i ; e
 θ_i = o ângulo de \hat{X}_{i-1} a \hat{X}_i medido ao longo de \hat{Z}_i .

Figura 37 – Sistema de referência de elos fixados através da representação de D-H.



Fonte: Craig, 2012.

Šljivo, Čabaravdić (2013) e Ayob et al. (2014) apresentam a análise cinemática do robô RV-2AJ de acordo com a aplicação da convenção de D-H, a qual pode ser verificada na Tabela 3. Uma vez que todas as juntas são rotativas, o único parâmetro variável é o ângulo θ_i .

Tabela 3 – Parâmetros de D-H do robô RV-2AJ.

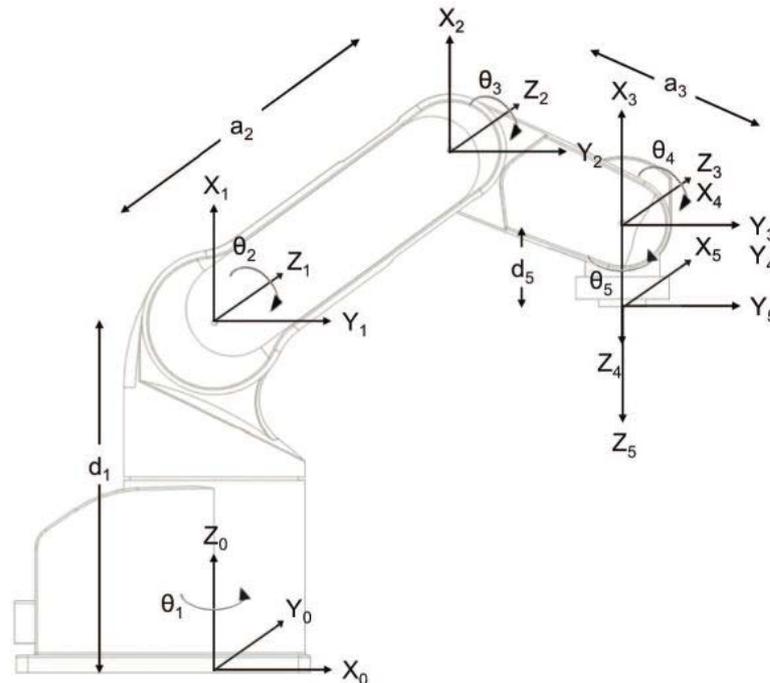
$i(\text{junta})$	$a_i(\text{milímetros})$	$\alpha_i(^{\circ})$	$d_i(\text{milímetros})$	$\theta_i(^{\circ})$
1	0	-90	300	0
2	250	0	0	-90
3	160	0	0	90
4	0	-90	0	-90
5	0	0	0	0

Fonte: Adaptado de Šljivo, Čabaravdić (2013) e AYOB et al., 2014.

A Figura 38 ilustra o modelo cinemático do robô RV-2AJ construído com a atribuição dos parâmetros identificados do sistema de referência a partir da convenção de D-H. As

dimensões referentes aos elos e a distância entre as juntas do robô RV-2AJ podem ser verificadas no Anexo I.

Figura 38 – Parâmetros de D-H atribuídos ao RV-2AJ.



Fonte: AYOB et al., 2014.

Em geral, as matrizes de transformação do robô a partir do sistema de referência \hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1} para o sistema de referência \hat{X}_i \hat{Y}_i \hat{Z}_i será uma função dos quatro parâmetros dos elos. Para qualquer tipo de robô, esta transformação é uma função de apenas uma variável, sendo os outros três parâmetros estabelecidos pelo projeto mecânico. Uma vez que o sistema de referência foi-lhe atribuído e os parâmetros do robô foram obtidos para cada elo, a matriz de transformação homogênea pode ser realizada através da seguinte sequência de rotações e translações (CRAIG, 2012; ŠLJIVO, ČABARAVDIĆ, 2013; AYOB et al., 2014):

- Rotacionar \hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1} sobre o eixo \hat{Z}_{i-1} por um ângulo θ_i . Após esta rotação, o atual eixo \hat{X}_{i-1} vai estar paralelo ao eixo \hat{X}_i ;
- Translacionar o sistema de referência \hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1} ao longo do eixo \hat{Z}_{i-1} por unidades d_i de modo que o atual eixo \hat{X}_{i-1} seja alinhado com o eixo \hat{X}_i ;
- Translacionar o sistema de referência \hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1} ao longo do eixo \hat{X}_i por unidades a_i tal que o atual eixo \hat{X}_{i-1} irá coincidir com o eixo \hat{X}_i ;

• Rotacionar o sistema de referência $\hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1}$ em torno do eixo \hat{X}_i por um ângulo α_i . Depois disso, o sistema de referência $\hat{X}_{i-1} \hat{Y}_{i-1} \hat{Z}_{i-1}$ coincide com o sistema de referência dos eixos $\hat{X}_i \hat{Y}_i \hat{Z}_i$.

As matrizes de transformação homogêneas para as quatro rotações e translações podem ser obtidas da seguinte forma:

$$H(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\text{Trans}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\text{Trans}(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

$$H(a_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{cosa}_i & -\text{sena}_i & 0 \\ 0 & \text{sena}_i & \text{cosa}_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (44)$$

De modo a obter a matriz de transformação D-H, a seguinte equação é aplicada:

$$\begin{aligned} H_{i-1}^i &= H(\theta_i)\text{Trans}(d_i)\text{Trans}(a_i)H(a_i) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{cosa}_i\text{sen}\theta_i & \text{sena}_i\text{sen}\theta_i & a_i\cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \text{cosa}_i\cos\theta_i & -\text{sena}_i\cos\theta_i & a_i\text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sena}_i & \text{cosa}_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (45)$$

Uma vez que os parâmetros D-H para o robô RV-2AJ já estão identificados na Tabela 3. A transformação de matrizes para cada junta com base no ultimo elo, referente ao efetuador, pode ser obtida como sendo o produto da aplicação da equação (45), dado por:

$$H_0^5 = H_0^1 \times H_1^2 \times H_2^3 \times H_3^4 \times H_4^5 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Onde: H rotação de um ponto em torno de um eixo; T translação de um ponto usando deslocamento para uma nova posição no sistema de coordenadas; n , s e a são os vetores

específicos que definem a orientação do efetuador; p é o vetor que descreve a posição do efetuador com relação ao sistema da base (*base frame*), $\{B\}$ do robô;

2.12 Interfaces de 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.

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 à softwares, possibilitou 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.

2.12.1 Comunicação serial

Um comitê de padronização denominado como EIA (*Electronic Industries Association*), 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 (SILVA, 2008).

Conforme Silva (2008), 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 nestas 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.

Segundo Melo (2006) 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.

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 ajustada 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. A Tabela 4 lista os parâmetros de configuração que podem ser feitos no padrão RS232 (SILVA, 2008).

Tabela 4 – Configurações da comunicação serial

Configurações	Ajustes
Tamanho do dado	5, 6, 7, 8 e 9 <i>bits</i>
Número de <i>stop-bits</i>	1, 1.5 e 2 <i>bits</i>
Paridade	Par, Impar, Marca, Espaço e Nenhum
Velocidade de Transmissão	1200, 2400, 4800, 9600, ..., 115200 <i>bps</i>
Porta de comunicação	COM1, COM2, ..., COMx

Fonte: Silva, 2008.

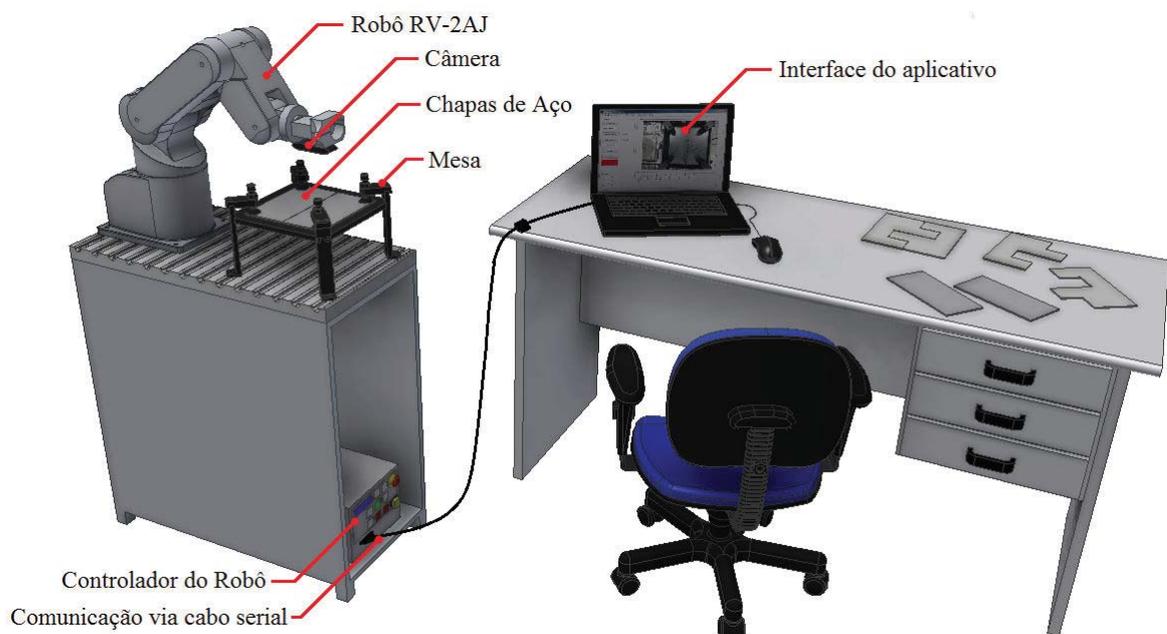
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando tornar objetiva a forma de execução deste projeto, subdividiu-se este capítulo em três itens. O primeiro item apresenta os materiais, equipamentos e *softwares* utilizados no desenvolvimento do sistema de visão de máquina, proposto neste trabalho. No segundo item, são realizados os métodos qualitativos e experimentais em laboratório, para a determinação do processo de aquisição e processamento da imagem da junta a ser soldada e, especificação da interface de comunicação entre o computador e controlador do robô RV-2AJ, para o envio da trajetória e execução. Por último, no terceiro item, apresenta-se o aplicativo do sistema de visão de máquina desenvolvido nesta pesquisa, descrevendo-se as funções para sua utilização, as quais tornam automática a tarefa de programação da trajetória de um manipulador robótico, na execução da soldagem de chapas de aço através do processo GMAW.

3.1 Materiais, Equipamentos e *Softwares*

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 soldagem da Universidade de Passo Fundo – UPF. Através da Figura 39 pode ser visualizada a bancada de testes do sistema de visão para reconhecimento da junta de solda e geração de trajetória para o robô.

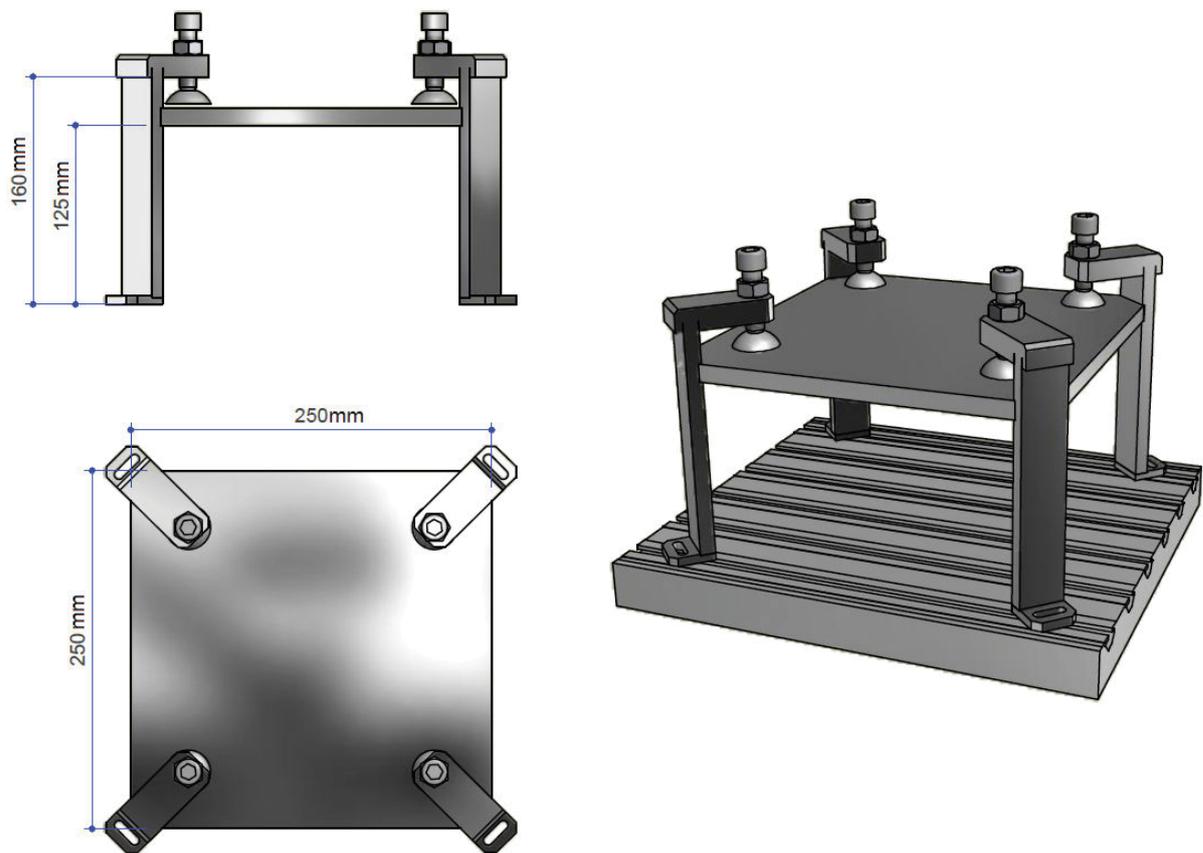
Figura 39 – Bancada de testes.



a) Chapas de aço: visando os testes para validação do sistema de visão de máquina, na determinação da trajetória linear de uma junta a ser soldada, foi arbitrado a utilização de chapas de aço SAE1010 com dimensões de 100 X 200 X 3,175mm (largura X comprimento X espessura).

b) Mesa: foi projetada e fabricada uma mesa (Figura 40), para tornar possível o posicionamento e fixação das chapas de aço, de modo que se caracterizasse uma junta a ser soldada, auxiliando assim, o processo de aquisição de imagem. A mesma foi montada junto à bancada do robô.

Figura 40 – Mesa de fixação das chapas de aço, para aquisição de imagens.



c) Robô: o robô utilizado para os testes de geração de trajetória, através do processamento de imagens de uma junta a ser soldada, foi o MELFA RV-2AJ, marca Mitsubishi. Este caracteriza-se por ser um robô antropomorfo constituído por 5 GDL com juntas rotacionais, o que o permite atingir um mesmo ponto de várias maneiras, desviando de obstáculos presentes em sua área de trabalho, viabilizando assim, muitas aplicações, como por exemplo, a execução de trajetórias em processos de soldagem. Sua linguagem de

programação é MELFA BASIC IV. As especificações técnicas do referido robô, como dimensões, área de trabalho e etc., podem ser verificadas no Anexo I.

d) Computador: o computador utilizado neste trabalho possui as seguintes configurações, processador Intel® Core™ i7 3ª geração 2.1 GHz com 8 GB de memória RAM, placa de vídeo AMD Radeon HD 7730M e Sistema Operacional *Windows 7 Professional*.

e) Câmera: para a realização da captura da imagem da junta a ser soldada, optou-se pela utilização de uma *webcam*, devido esta atender às solicitações dos testes experimentais em laboratório, necessários para o desenvolvimento do sistema de visão de máquina proposto neste trabalho, além de ser comercialmente acessível em relação ao custo benefício e dispensar a necessidade da utilização de uma placa de captura de imagens. A *webcam* adquirida para esta finalidade de aplicação foi a da marca Logitech, modelo C920 (Figura 41), com conexão USB. Esta foi fixada junto ao efetuador do robô MELFA RV-2AJ. Uma maior especificação técnica desta *webcam* pode ser verificada no Anexo II.

Figura 41 – *Webcam* Logitech, modelo C920.



Fonte: Logitech, 2014.

f) Iluminação: nesta aplicação, a cena de captura da imagem recebe iluminação artificial constante das luminárias instaladas no ambiente do laboratório de robótica, não aplicando-se uma iluminação especial direcionada à área de trabalho.

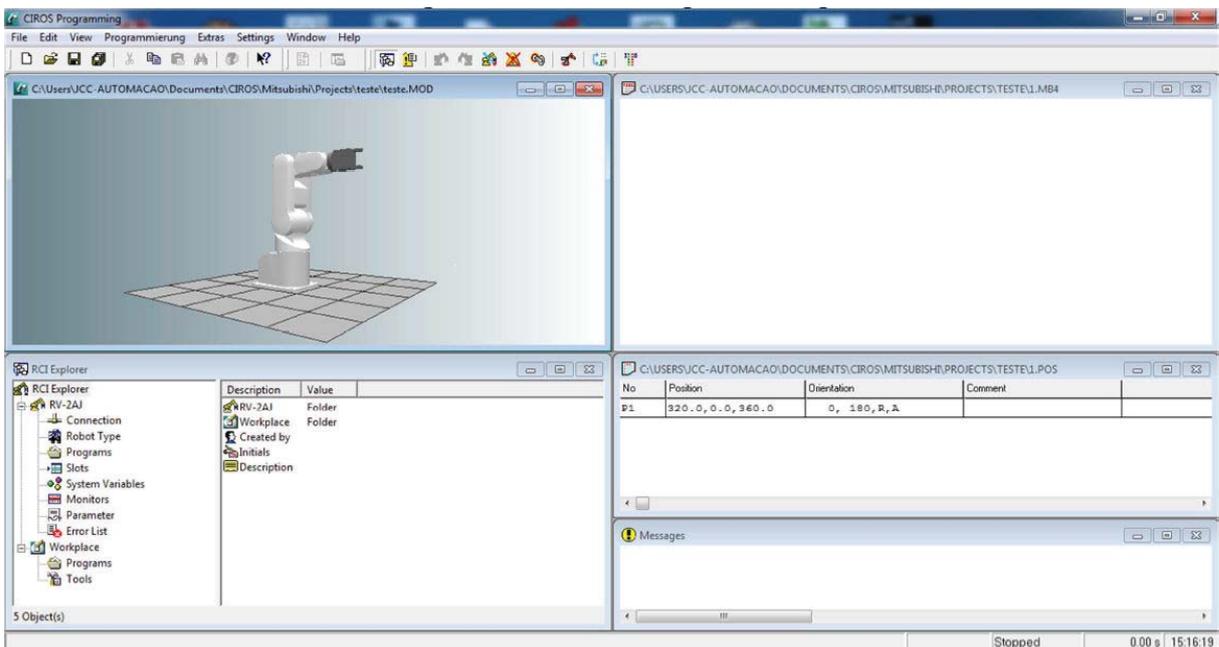
g) Comunicação entre o computador e o robô: para estabelecer a comunicação entre computador e o controlador do robô, foram utilizados, um cabo compatível com periféricos conversor USB “A” macho para 1 saída serial RS232 DB9 macho, marca Comm5, com velocidade de até 115kbps conectado ao computador e, outro cabo com 1 entrada serial RS232 DB9 fêmea para 1 saída serial RS232 DB25 conectada ao controlador do robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ. Permitindo assim, o envio da trajetória da junta a ser soldada ao controlador do robô.

h) *Software*: para o desenvolvimento do aplicativo de processamento de imagens foi utilizado um *software* matemático, onde buscou-se as aplicações relacionadas às funções de

processamento e aquisição de imagens. Permitindo desta forma a execução de operações de segmentação de imagens, realce, redução de ruído, transformações geométricas, criação de histogramas ou contornos para manipular regiões de interesse de uma imagem.

Para o controle da execução da trajetória do robô, utilizou-se o *software Ciros Programming* (interface ilustrada na Figura 42) do controlador do robô RV-2AJ, desenvolvido pelo fabricante Mitsubishi.

Figura 42 – Interface do *Ciros Programming*.



Fonte: Mitsubishi, 2014.

3.2 Desenvolvimento do Sistema de Visão

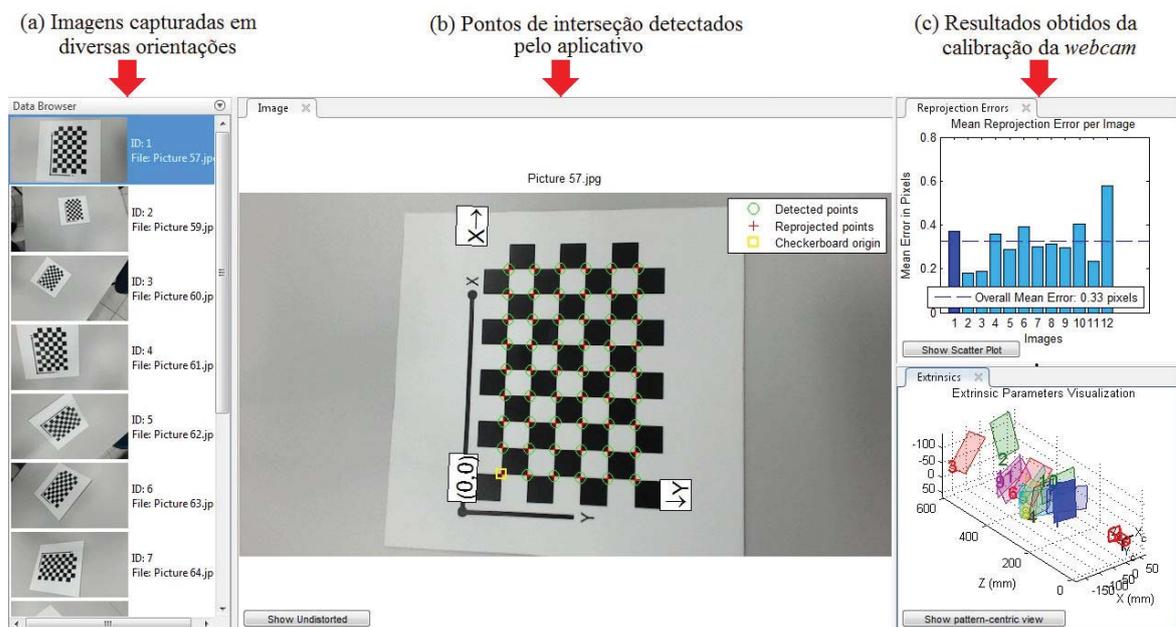
Para a execução do desenvolvimento do sistema de visão de máquina proposto neste trabalho, aplicaram-se métodos experimentais em laboratório e qualitativos, seguindo etapas pré-determinadas na fundamentação teórica, tendo como objetivos a calibração da câmera para aquisição das imagens estáticas da junta a ser soldada, a especificação da cor para identificação da área de fundo, procedimentos de processamento de imagens para geração da trajetória da solda e estabelecimento de comunicação entre o aplicativo de visão de máquina e o controlador do robô MELFA RV-2AJ para o envio da trajetória obtida e sua execução.

3.2.1 Calibração da câmera

O procedimento de calibração da câmera tem a função de remover da imagem capturada, os efeitos das distorções inerentes à forma construtiva da lente, através da estimativa de parâmetros intrínsecos (associados à óptica) e extrínsecos (relacionados com a posição e orientação da imagem fornecida pela câmera). Este processo é de fundamental importância, pois, atribui ao sistema de visão uma maior precisão na obtenção das coordenadas planares, neste caso, as coordenadas (x, y) da junta a ser soldada.

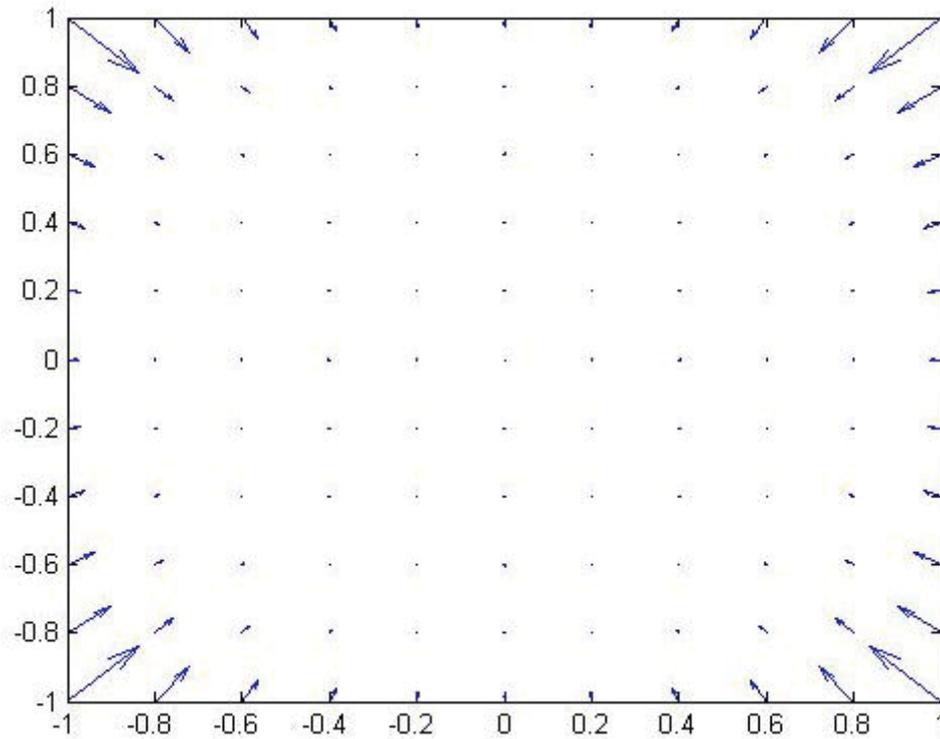
A calibração da *webcam* (Logitech C920) utilizada neste trabalho, foi realizada com o auxílio de um aplicativo com finalidade de determinação dos parâmetros da câmera. Para este procedimento, utilizou-se um tabuleiro padrão, do tipo xadrez, constituído de 10 X 7 quadrados. Desta forma, partiu-se para o processo da captura de 10 imagens, com diferentes orientações da câmera em relação ao tabuleiro padrão (Figura 43 (a)), a seguir fez-se necessária a inserção da medida do comprimento (em milímetros) da aresta correspondente a um dos quadrados do tabuleiro, que neste caso é equivalente à 15,2mm, obtendo-se então, a proporção entre a dimensão real do tabuleiro e as imagens capturadas deste. Após isto, o aplicativo realiza o processamento dos dados e das imagens do tabuleiro padrão (Figura 43 (b)), gerando os parâmetros da câmera (Figura 43 (c)), onde se evidencia um erro médio de reprojeção correspondente a 0,33 *pixels*, referente à acurácia da *webcam*. A Figura 43 ilustra o processo de calibração da *webcam* (Logitech C920).

Figura 43 – Processo de calibração da *webcam* Logitech C920.



Os resultados obtidos da calibração da *webcam* em relação aos coeficientes de distorção, corresponderam à radial (0.1106, -0.1997). A distorção radial da imagem fornecida pela câmera, pode ser observada na Figura 44, apresentando uma maior distorção nas bordas da imagem em direção ao centro.

Figura 44 – Representação da distorção da imagem fornecida pela *webcam* Logitech C920 .



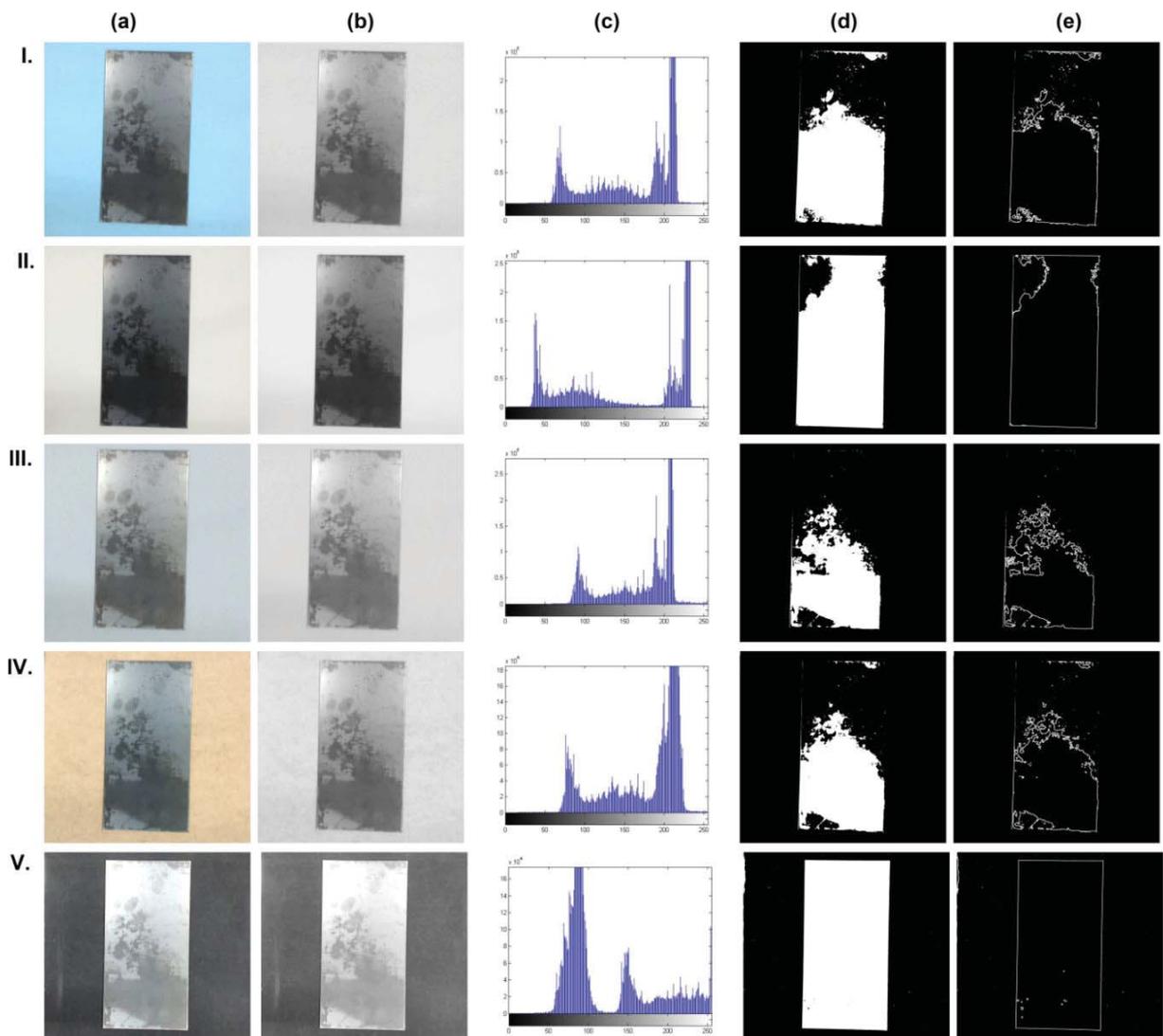
3.2.2 Especificação do fundo

A identificação de um objeto, através do processamento de imagens, pode ser realizada de acordo com seu nível de cinza, podendo ser considerado claro ou escuro, dependendo se este reproduz maior ou menor intensidade de cinza em relação à área de fundo da imagem capturada.

Com o objetivo de obter o melhor desempenho do processamento de imagens pelo aplicativo do sistema de visão computacional, proposto neste trabalho, buscou-se então, definir a cor da área de fundo que melhor se adequaria a lógica de reconhecimento do contorno da chapa de aço, para posterior identificação da junta a ser soldada. À vista disso, foram executados capturas de imagens da chapa de aço com a *webcam* C920, utilizando-se a iluminação artificial do ambiente do laboratório de robótica, alternando a cor

aplicada à área de fundo, conforme representa a coluna (a) da Figura 45, onde foram utilizadas as cores (I) Azul, (II) Branco, (III) Cinza, (IV) Pardo e (V) Preto. Na sequência, as imagens capturas foram convertidas em escala de cinza (coluna (b) da Figura 45) e obtido os respectivos histogramas (coluna (c) da Figura 45). Após, aplicou-se a limiarização pelo *método de Otsu* para conversão das imagens monocromáticas em binárias (coluna (d) da Figura 45), onde para as imagens com o fundo claro (Figura 45 – I, II, III e IV) necessitou o complemento destas imagens, ou seja, o preto passa a ser branco e o branco passa a ser preto. Obtida a imagem binária, aplicou-se a operação morfológica extração de contorno, desta forma possibilitou a obtenção das imagens do contorno da chapa de aço, as quais são representadas na coluna (e) da Figura 45.

Figura 45 – Testes para especificação da cor para área de fundo.



Com o teste de especificação do fundo realizado, constatou-se através da verificação das imagens obtidas – representadas na coluna (a) da Figura 45 –, que devido à posição da iluminação artificial em relação à cena de captura da imagem, a chapa de aço teve sua sombra projetada na área de fundo. No caso das cores claras de fundo, dos testes I a IV mostrados na Figura 45, após ser realizada a conversão da imagem RGB em escala de cinza (coluna (b) da Figura 45), a presença da sombra em torno do contorno da chapa de aço causou um efeito de escurecimento dos *pixels* de fundo, deixando-os com níveis de cinza próximos aos tons do objeto, fazendo com que estes *pixels* fossem interpretados incorretamente pela operação morfológica de imagem, acarretando em erro no reconhecimento do contorno real da chapa. Já quando o fundo é escuro, como no caso da aplicação da cor preta do teste V (ilustrado na Figura 45), a sombra da chapa de aço projetada na área de fundo não afeta o processamento de imagem para obtenção do contorno, devido ao fato de que ambos, sombra e fundo, são tons de cinza escuros de *pixels* e os níveis de cinza claros constituem a região do objeto.

Através da análise dos histogramas das imagens da coluna (c) da Figura 45, gerados a partir dos testes das cores de fundos (I) azul, (II) branco, (III) cinza e (IV) pardo, não permitem uma distinção clara de um limiar para a separação do objeto da área do fundo, resultando na baixa eficiência do processamento de imagem para obtenção do contorno da chapa de aço, ficando evidentes as falhas decorrentes destes testes ao se observar as imagens ilustradas coluna (e) da Figura 45. No entanto, no histograma obtido da captura da imagem com aplicação da cor preta na área de fundo (teste V, coluna (c) da Figura 45), verifica-se uma faixa intermediária de limiar próxima ao valor 0, separando o histograma em duas regiões, deixando evidente a separação entre fundo e objeto, o que proporcionou o sucesso da operação morfológica na obtenção do contorno da chapa de aço, como pode ser observado na imagem resultante do teste V, na coluna (e) da Figura 45.

Comparando-se os resultados obtidos de aplicação das cores de fundos testadas, pode-se determinar a utilização da cor preta na área de fundo para a aplicação na aquisição de imagens deste trabalho, devido apresentar melhor eficiência na obtenção do contorno da chapa de aço.

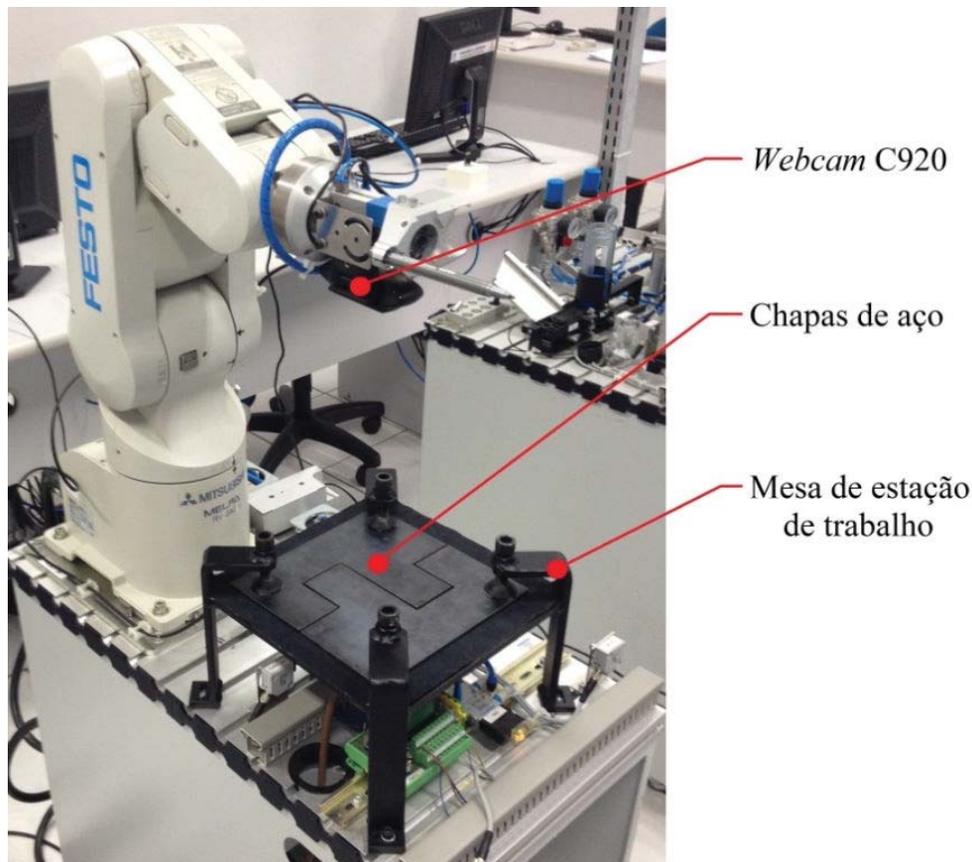
3.2.3 Aquisição da imagem da junta

Para a realização dos testes de aquisição da imagem da junta a ser soldada pelo processo MIG/MAG robotizado, foi implementada ao efetuador do robô RV-2AJ, a *webcam*

Logitech C920 (anteriormente calibrada). Além da *webcam*, também foi utilizada uma mesa projetada especificamente para o posicionamento e fixação das chapas de aço, constituindo assim uma estação de área de trabalho. Desta maneira, possibilitou-se a realização do posicionamento da *webcam* pelo robô, para o enquadramento da cena de captura da imagem contendo o objeto e o fundo. Também é importante salientar que, com o sucesso obtido no teste realizado na especificação da cor para área de fundo, aplicou-se o fundo preto a mesa projetada.

A Figura 46 mostra a bancada de testes, onde pode ser verificada a posição da mesa de estação de trabalho em relação ao robô e o local em que foi fixada a *webcam* no efetuador.

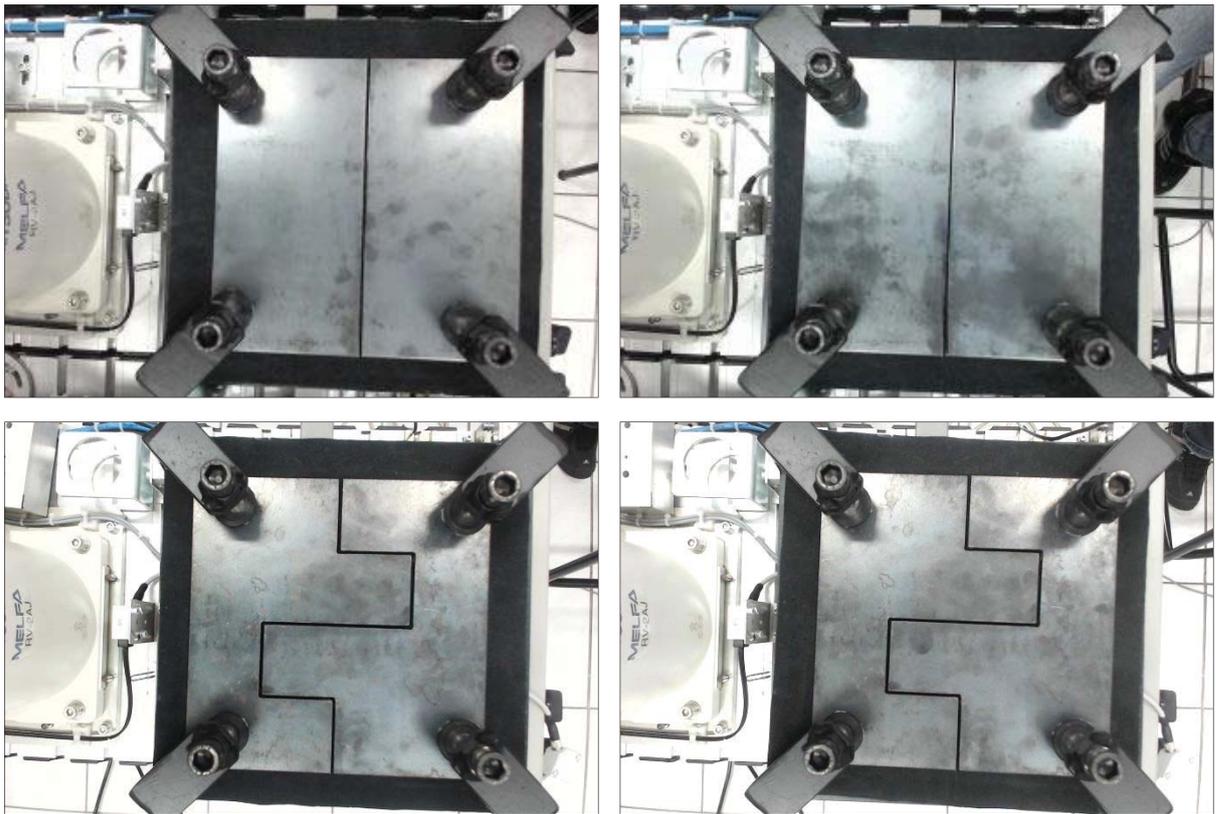
Figura 46 – Sistema de aquisição de imagem da junta para soldagem.



Quanto à necessidade de iluminação constante da cena para captura da imagem, utilizou-se somente a iluminação artificial proveniente das lâmpadas do ambiente do laboratório, o qual é bastante claro. Esta proposta não implica na mudança estrutural da iluminação do ambiente.

Na Figura 47 apresentam-se quatro imagens que foram capturadas pela *webcam* Logitech C920, durante os testes de aquisição de imagem da junta a ser soldada, onde manteve-se a mesma orientação da *webcam* em relação ao enquadramento da cena da mesa de estação de trabalho, a partir da determinação do posicionamento do robô, atribuindo-se os seguintes valores à seus eixos de coordenadas: $x = 232mm$, $y = 0mm$, $z = 480mm$, $A = 90$, $B = 90$ e $C = 0$. À vista disto, pode-se verificar na Figura 47 que as imagens obtidas nos testes de aquisição, correspondem na imagem original à RGB 24bits, nas quais priorizou-se a utilização da maior resolução possível, $2304 \times 1536 \text{ pixels}$, a ser trabalhada com a *webcam*, sendo satisfatórias para utilização, devido ao fato de evidenciar com o máximo de detalhes a imagem da junta, auxiliando desta forma a próxima etapa que trata do processamento de imagens para extrair as informações da trajetória efetiva que o robô deverá executar para soldar as chapas de aço,

Figura 47 – Teste de aquisição de imagens da junta a ser soldada.



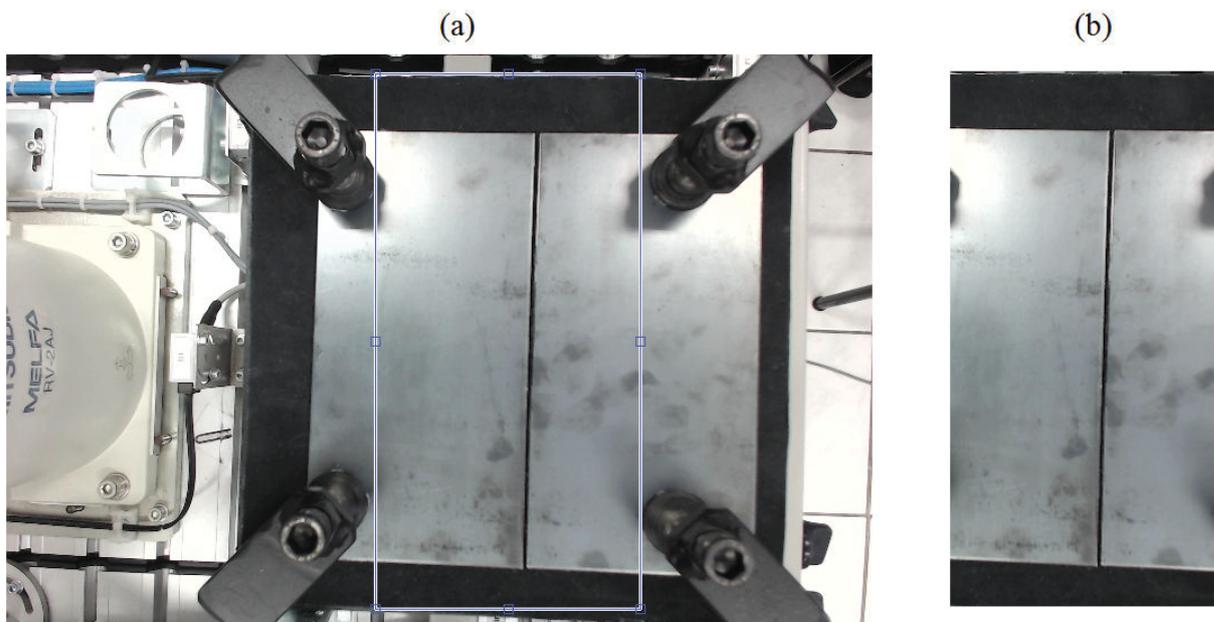
3.2.4 Processamento de imagem da junta

Com a etapa de aquisição de imagens estabelecida, partiu-se para o desenvolvimento do processamento de imagem do sistema de visão de máquina proposto neste trabalho. Para tal, definiram-se dois métodos, onde se pode optar pelo modo automático ou então pelo modo semiautomático, os quais são descritos a seguir:

a) Modo automático: neste modo o processamento de imagem tem a função de detectar automaticamente a linha correspondente ao comprimento e posição da junta para soldagem das chapas de aço, com base nas informações extraídas da imagem capturada pelo sistema de visão. Porém, sua utilização é somente indicada quando a junta possuir o formato de um segmento de reta, como ilustrado na Figura 48 (a).

O processo tem início com a delimitação da região de interesse, na qual se encontra contida a junta para soldagem, desta maneira, obtém-se um corte da imagem, mantendo-se as informações referentes à posição do corte em relação às coordenadas da imagem original. Eliminando assim, qualquer outro objeto indesejado para o processamento da imagem, como por exemplo, os fixadores das chapas de aço da mesa de trabalho. A Figura 48 representa este processo, onde em (a) é delimitada a região de interesse sobre a imagem original capturada e em (b) mostra a imagem após o corte.

Figura 48 – Delimitação da região de interesse.



Obtida a imagem da região de interesse (Figura 48 b), na próxima etapa é feita a conversão da imagem colorida RGB 24bits em escalas de cinza, utilizando-se a equação (1) e a ponderação padronizada para o sistema NTSC, sendo expresso por:

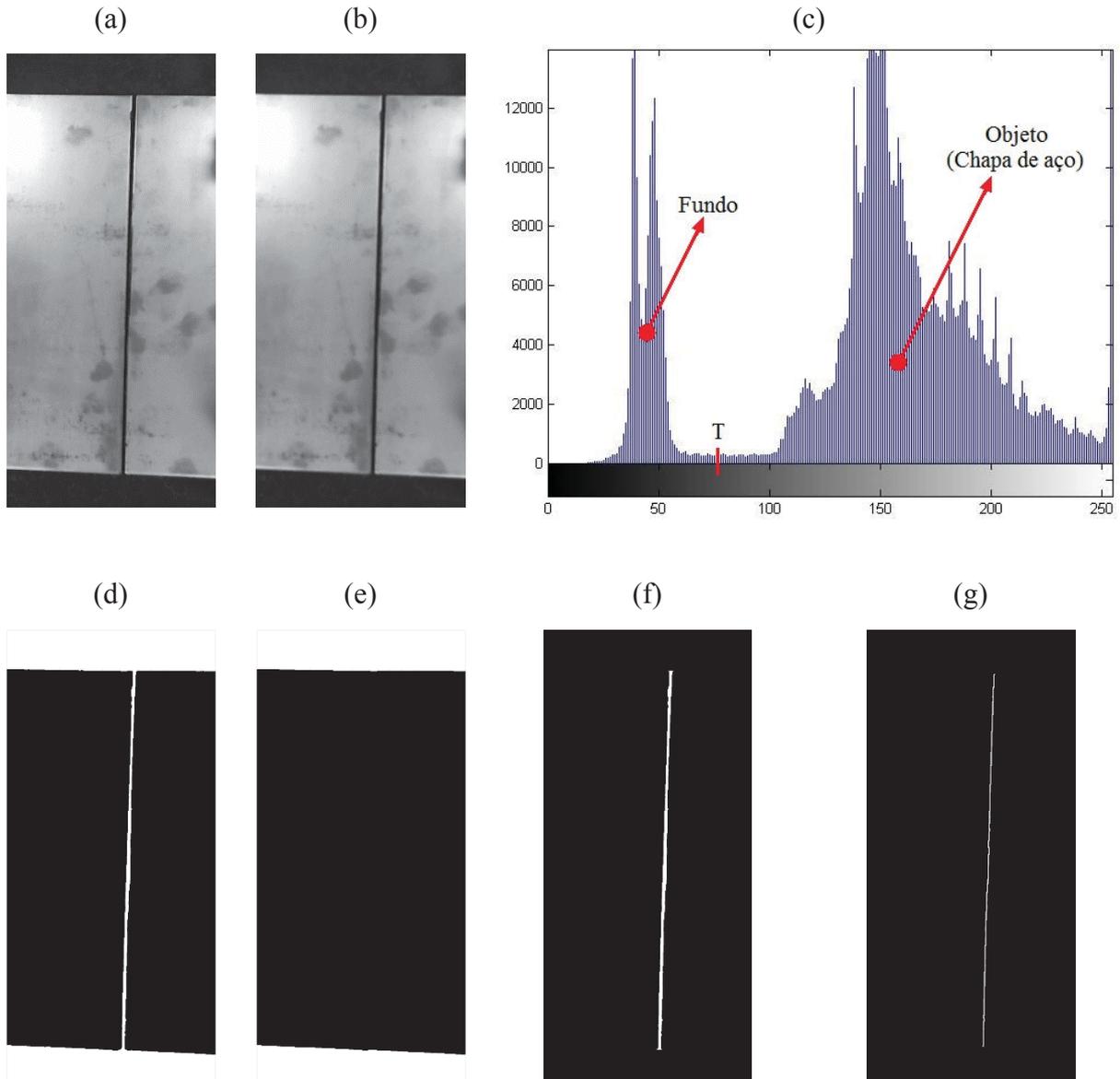
$$I_{escala\ de\ cinza}(n, m) = 0,2989(n, m, r) + 0,5870(n, m, g) + 0,1140(n, m, b) \quad (1)$$

A Figura 49 (a) ilustra a imagem RGB 24bits obtida da conversão em escalas de cinza. A seguir é realizado o pré-processamento aplicando-se a filtragem espacial na imagem em escala de cinza, utilizando-se a média em uma vizinhança 8×8 pixels, definida desta forma, por ser satisfatória na minimização de ruídos na imagem, não distorcendo as formas das chapas da imagem filtrada. A Figura 49 (b) mostra a imagem resultante após a filtragem espacial, da qual obtém-se o histograma, sendo ilustrado na Figura 49 (c). Então, através da aplicação do limiar global pelo método de Otsu, expresso pela equação (27), determina-se automaticamente o valor do limiar T que separa o fundo do objeto. O resultado obtido é a binarização da imagem, com dois valores de intensidade, correspondentes a 1 (branco) para o fundo e 0 (preto) para o objeto, representada na Figura 49 (d).

A partir da obtenção da imagem binária, partiu-se para a etapa do processamento morfológico da imagem, com o intuito de extrair somente a junta a ser soldada, para isso foi necessário primeiramente a aplicação do operador de abertura, no qual foi utilizado um elemento estruturante B de 20×20 pixels, determinado com esta dimensão para que fosse suficiente “eliminar” a junta da imagem, resultando na imagem ilustrada da Figura 49 (e). O próximo processo a ser realizado é a operação de subtração, onde foi subtraído da imagem resultante da limiarização (Figura 49 d) a imagem obtida do processo morfológico de abertura (Figura 49 e), desta forma, gera-se a imagem ilustrada na Figura 49 (f) apresentando somente a junta.

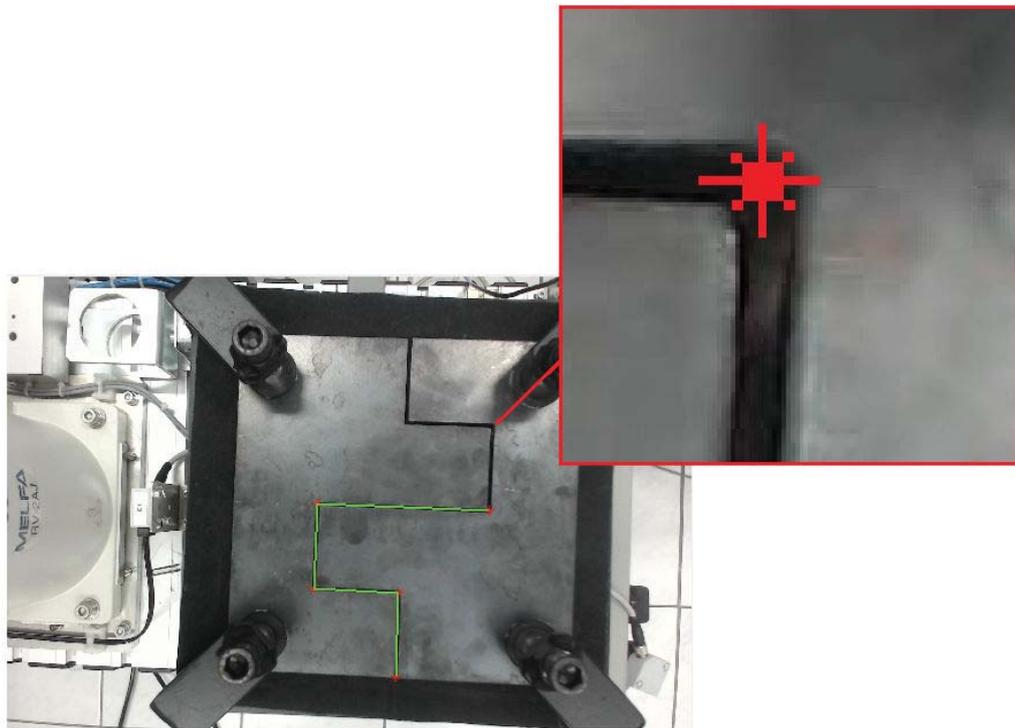
Utilizando a imagem resultante da subtração (Figura 49 f), efetua-se a operação morfológica de esqueletização, permitindo assim a obtenção dos pixels que formam a linha central corresponde à junta a ser soldada, sendo representada na imagem (g) da Figura 49.

Figura 49 – Modo automático do processamento de imagens da junta a ser soldada.



b) Modo semiautomático: este método é indicado quando a geometria da junta é composta por um ou mais de um segmento de reta, permitindo que o usuário realize manualmente a indicação sequencial dos pontos sobre a imagem da junta capturada pelo sistema de visão, traçando-se desta forma os segmentos de retas que constituirão o caminho para a geração de trajetória a ser executada pelo robô. A Figura 50 representa o procedimento de execução do modo semiautomático.

Figura 50 – Modo semiautomático do processamento de imagem da junta a ser soldada.



O desenvolvimento do modo semiautomático para o sistema de visão proposto neste trabalho possibilitou a obtenção de uma gama maior de tipos de trajetórias retilíneas para soldagem robotizada, além da que é obtida pelo modo automático.

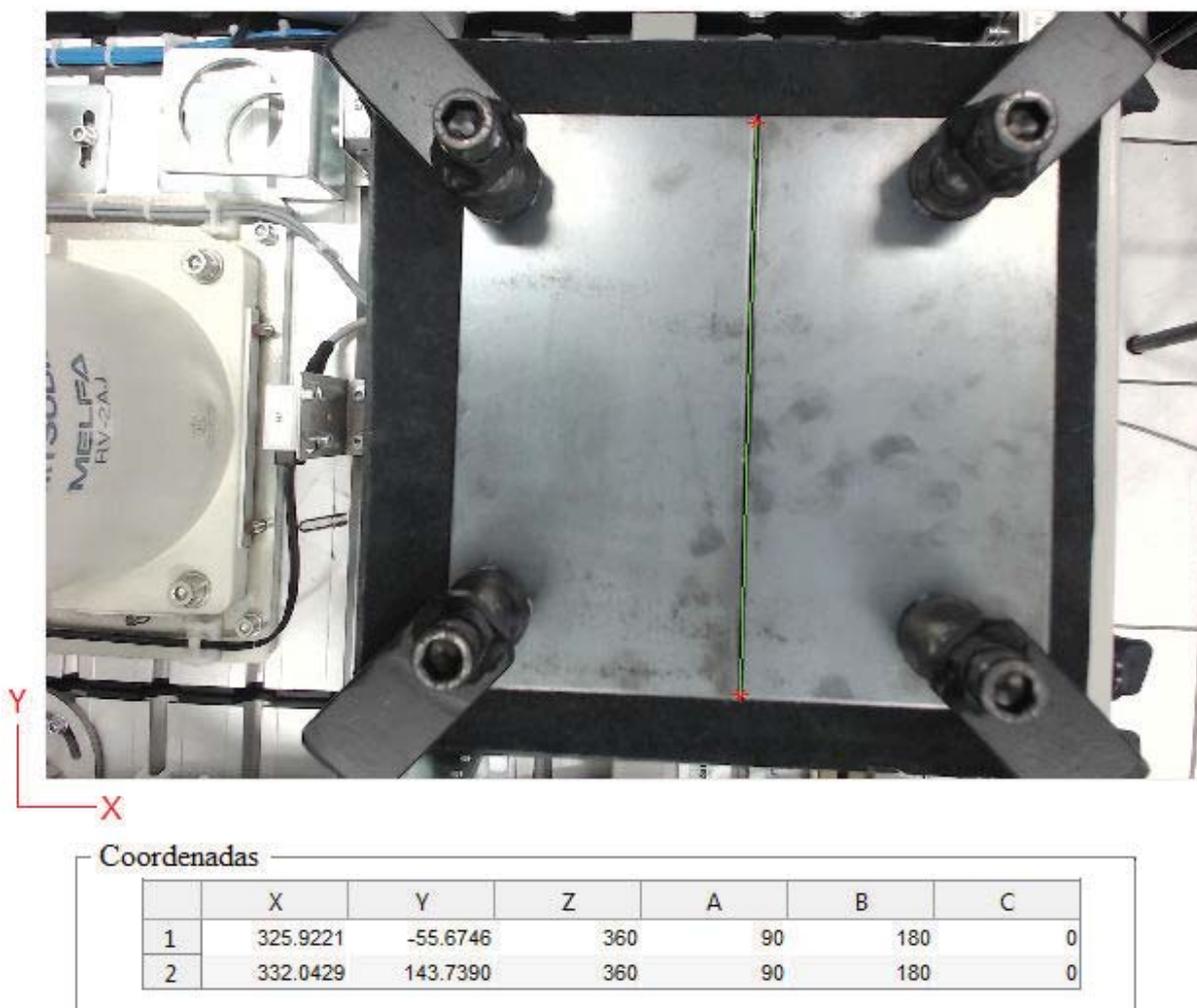
3.2.5 Geração das coordenadas de pontos para trajetória

A partir do reconhecimento da junta a ser soldada, utilizando-se o modo automático ou o semiautomático de processamento de imagem, possibilitou-se a obtenção das coordenadas dos *pixels* correspondentes ao início e fim de cada segmento de reta em relação à junta. A posição destes *pixels* é então transformada em pontos de coordenadas globais (X, Y), através da aplicação da matriz de coordenadas homogêneas, representada pela equação (3).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ W \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} fs_x & ftan\theta & x_c & 0 \\ 0 & fs_y & y_c & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_K \underbrace{\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{RT} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

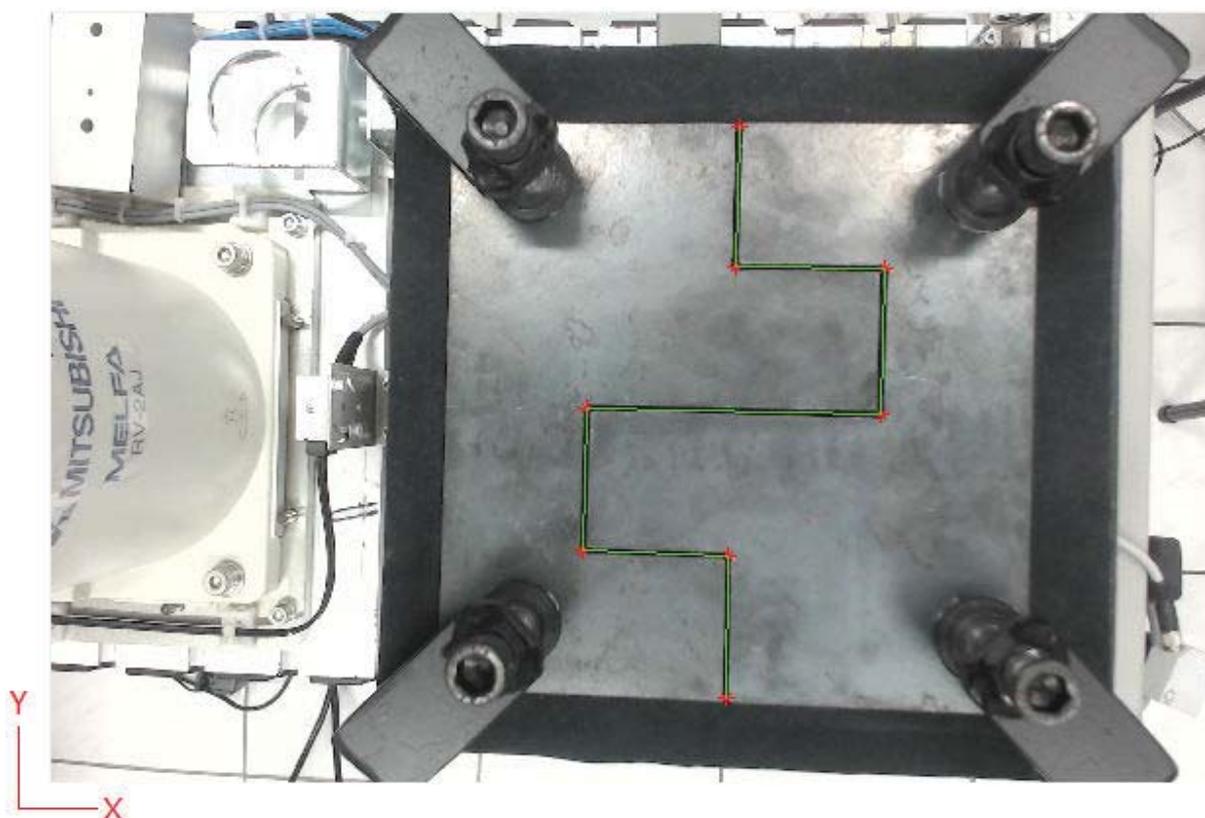
A Figura 51 ilustra as coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos inicial e final, obtidos pelo modo automático de processamento de imagem para geração da trajetória retilínea da respectiva junta capturada pelo sistema de visão, onde os eixos Z, A, B e C são previamente atribuídos pelo usuário, para posicionamento e orientação da ferramenta.

Figura 51 – Coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos obtidos pelo modo automático de detecção da junta.



A Figura 52 representa as coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos de cada segmento de reta que correspondem ao caminho para geração da trajetória, os quais foram indicados através do modo semiautomático de processamento de imagem do sistema de visão, onde também há necessidade de que o usuário atribua previamente os valores de coordenadas dos eixos Z, A, B e C para posicionamento e orientação da ferramenta.

Figura 52 – Coordenadas cartesianas (X, Y) dos pontos obtidos pelo modo semiautomático de detecção da junta.



Coordenadas

	X	Y	Z	A	B	C
1	320.1101	-55.7208	360	90	180	0
2	320.1329	-8.1218	360	90	180	0
3	270.6392	-5.8795	360	90	180	0
4	272.5621	43.6514	360	90	180	0
5	372.5959	42.6582	360	90	180	0
6	373.4519	92.5860	360	90	180	0
7	323.5726	94.0450	360	90	180	0
8	324.2858	142.5121	360	90	180	0

É importante ressaltar que, para o planejamento da velocidade apropriada em um processo de soldagem, devem ser consideradas as variáveis que afetam as condições da fusão da poça de soldagem. Esses aspectos não foram abordados nesse trabalho. Sendo conferida a velocidade de cruzeiro do robô RV-2AJ para execução da trajetória correspondente ao conjunto de pontos das coordenadas globais obtidos pelo processamento de imagem referente à forma geométrica do caminho da junta a ser soldada.

3.2.6 Interface de comunicação

Após o processamento da imagem da junta a ser soldada e da obtenção das coordenadas globais, faz-se necessário o envio da trajetória resultante ao controlador do robô, para que este a execute.

Para estabelecer a comunicação entre o computador e o controlador do robô, optou-se pela comunicação física ponto a ponto, através da porta serial RS232 de entrada da unidade controladora do robô MELFA RV-2AJ, necessitando-se também de um conversor USB para porta serial RS232, devido ao fato do computador utilizado não possuir conexão via porta serial RS232.

Nesta aplicação, as configurações de comunicação entre o computador e o controlador do robô RV-2AJ, são especificadas na Tabela 5:

Tabela 5 – Especificação da comunicação serial RS232.

Configurações	Ajustes
Tamanho do dado	8 bits
Número de <i>stop-bits</i>	2 bits
Paridade	Nenhum
Velocidade de Transmissão (bps)	9600 bps
Porta de comunicação	COMx (depende do computador conectado)

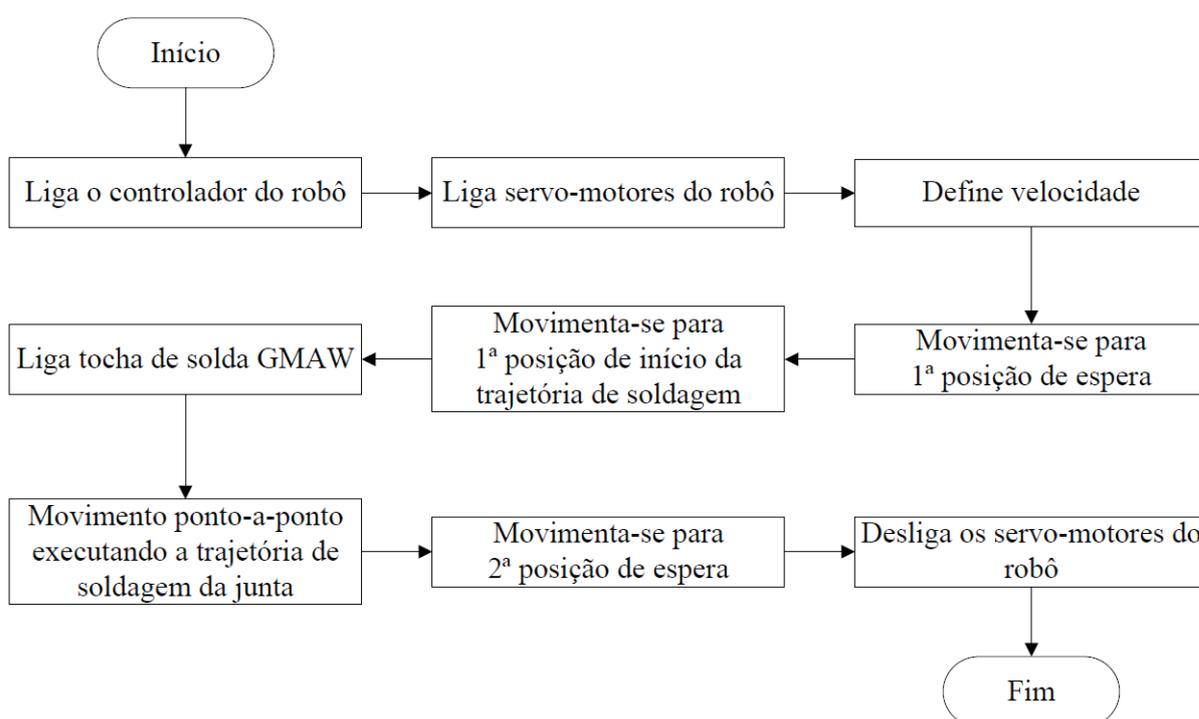
O desenvolvimento do método de comunicação do aplicativo para controlar o robô, possibilitou a execução da trajetória da junta para soldagem, onde foi utilizado como base o *software* original do controlador do robô RV-2AJ, *Ciros Programming*. Através de uma análise deste, foi possível reconhecer os comandos para operação do robô, verificando-se também a necessidade de que os valores obtidos pelo processamento de imagem, referente às coordenadas da trajetória da junta ser soldada, fossem dispostos entre os dados de informações de funções de operação do RV-2AJ, tendo como última informação do envio de dados o terminador CR (*Carriage return*), este, corresponde a um caractere de terminação do código ASCII – Decimal 13, o qual indica o término da informação, Enter - CR. A Tabela 6, apresenta a lista de comandos identificados e seus significados.

Tabela 6 – Comandos e Funções de operação do robô RV-2AJ.

Comandos	Funções
CNTLON	Liga controlador do robô
SRVON	Liga os servo-motores do robô
SRVOFF	Desliga os servo-motores do robô
RSTALRM	Elimina erros
EXECJOVRD	Seleciona velocidade para movimentação
EXECPCOSIROP	Envia novas coordenadas
EXECMVS PCOSIROP	Executa movimento linear
STATE	Solicita situação do robô (em movimento/parado)

A Figura 53 ilustra o fluxograma da interface de comunicação do aplicativo do sistema de visão desenvolvida para envio e controle do RV-2AJ na execução da trajetória de soldagem da junta.

Figura 53 – Fluxograma do funcionamento da interface de comunicação entre aplicativo e o robô.



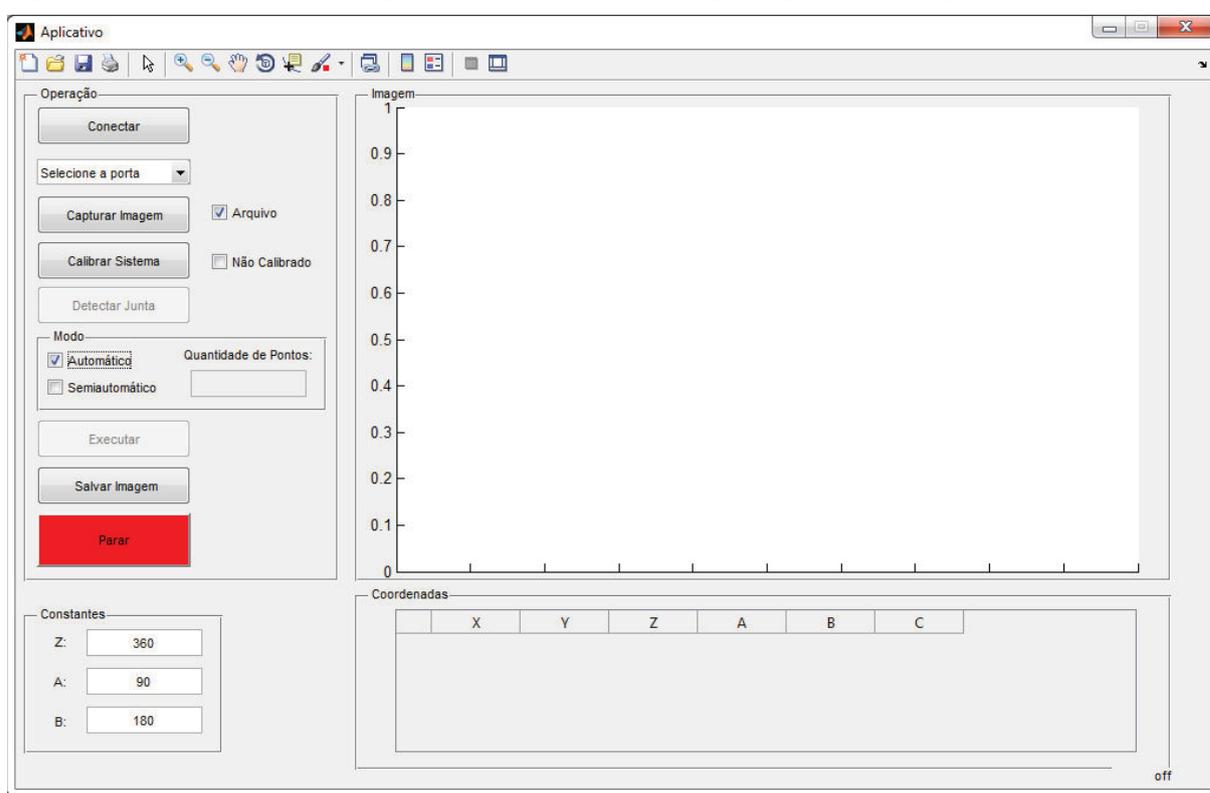
3.3 Aplicativo

O aplicativo desenvolvido neste trabalho tem por objetivo tornar automática a tarefa de controlar um robô para execução da trajetória linear de uma junta de chapas de aço a serem

soldadas, por meio da captura e processamento de imagem. Desta forma, eliminando a necessidade de programação manual do robô, por parte de um operador humano (sujeita a erros), conferindo ao processo uma maior autonomia, além de dispensar a mão de obra especializada, escassa no mercado de trabalho.

A interface do aplicativo foi desenvolvida presando-se por um design intuitivo e de fácil utilização pelo usuário. Este aplicativo reúne funções inerentes de um sistema de visão computacional, destinado a um processo de soldagem robotizada, no qual são executadas as tarefas desde a aquisição e processamento da imagem, à geração automática ou semiautomática da trajetória linear no espaço cartesiano e controle do robô que a executará. A Figura 54 ilustra a interface do aplicativo.

Figura 54 – Interface do aplicativo para o sistema de visão de máquina aplicado a soldagem robotizada.

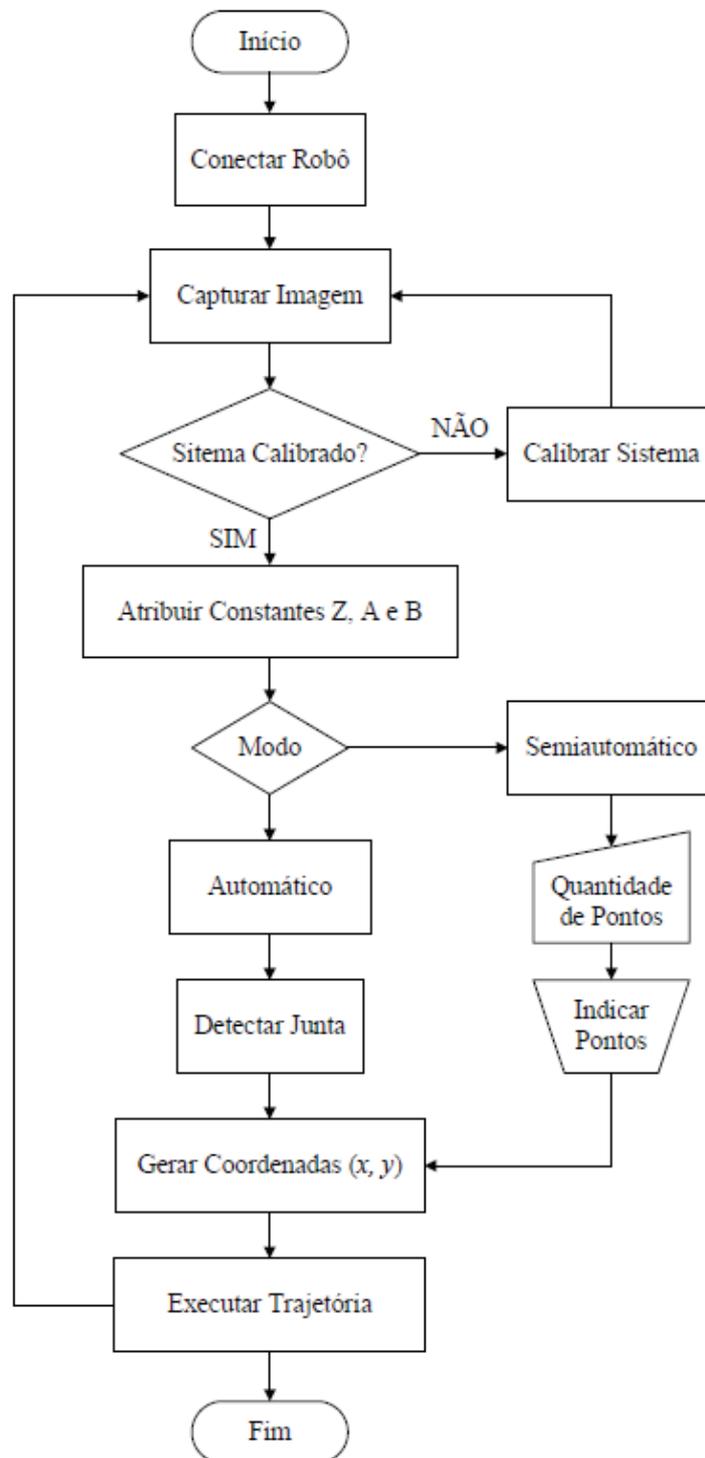


Para uma melhor compreensão, é realizada uma explicação sobre a utilização deste aplicativo desenvolvido, apresentando-se a interface gráfica e suas funções inerentes à captura da imagem, procedimentos de calibração do sistema, atribuição de parâmetros específicos de coordenadas dos eixos (Z, A, B), detecção da junta pelo modo automático ou semiautomático, demonstrativo na tela dos resultados obtidos e execução da trajetória pelo robô.

3.3.1 Descrição e utilização do aplicativo

A rotina para utilização do aplicativo é representada através do fluxograma da Figura 55.

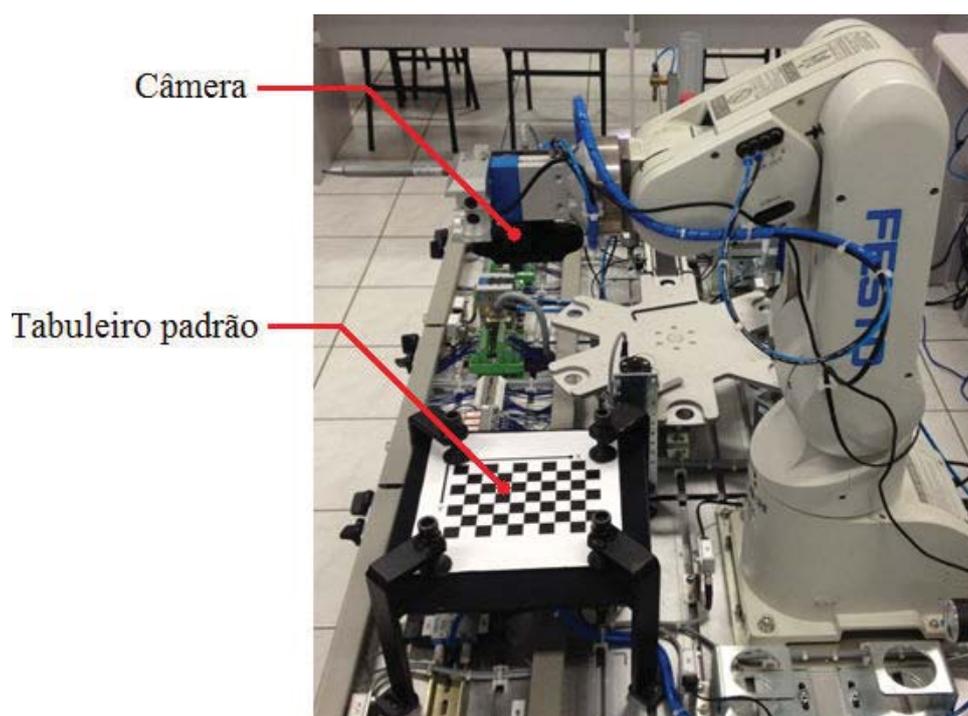
Figura 55 – Fluxograma das rotinas principais do aplicativo.



Ao executar o aplicativo, o primeiro passo que o usuário deverá proceder é selecionar a porta de comunicação do computador, a qual está conectado o robô MELFA RV-2AJ, como por exemplo, porta COM11. O aplicativo auxilia esse procedimento, disponibilizando somente as portas ativas. Após a escolha da porta de comunicação, deve-se clicar no botão “Conectar”. Caso ocorra algum erro neste processo, usuário será informado através de uma mensagem. Logo, o botão continuará no estado “Conectar”, sendo obtido sucesso na conexão, o botão altera-se para o estado de “Desconectar”, como pode ser observado na Figura 57.

Com o controlador do robô conectado ao aplicativo, a próxima etapa que deve ser efetuada é “Capturar Imagem”, onde o robô se deslocará para uma posição pré-determinada nos testes de aquisição de imagem, na qual a câmera (*webcam* Logitech C920) enquadra a mesa de trabalho. Neste primeiro momento faz-se necessário que, por uma única vez, seja capturada a imagem do tabuleiro padrão, fixado na mesa de trabalho e alinhado ao sistema de coordenadas espaciais do robô. A Figura 56 ilustra esta etapa.

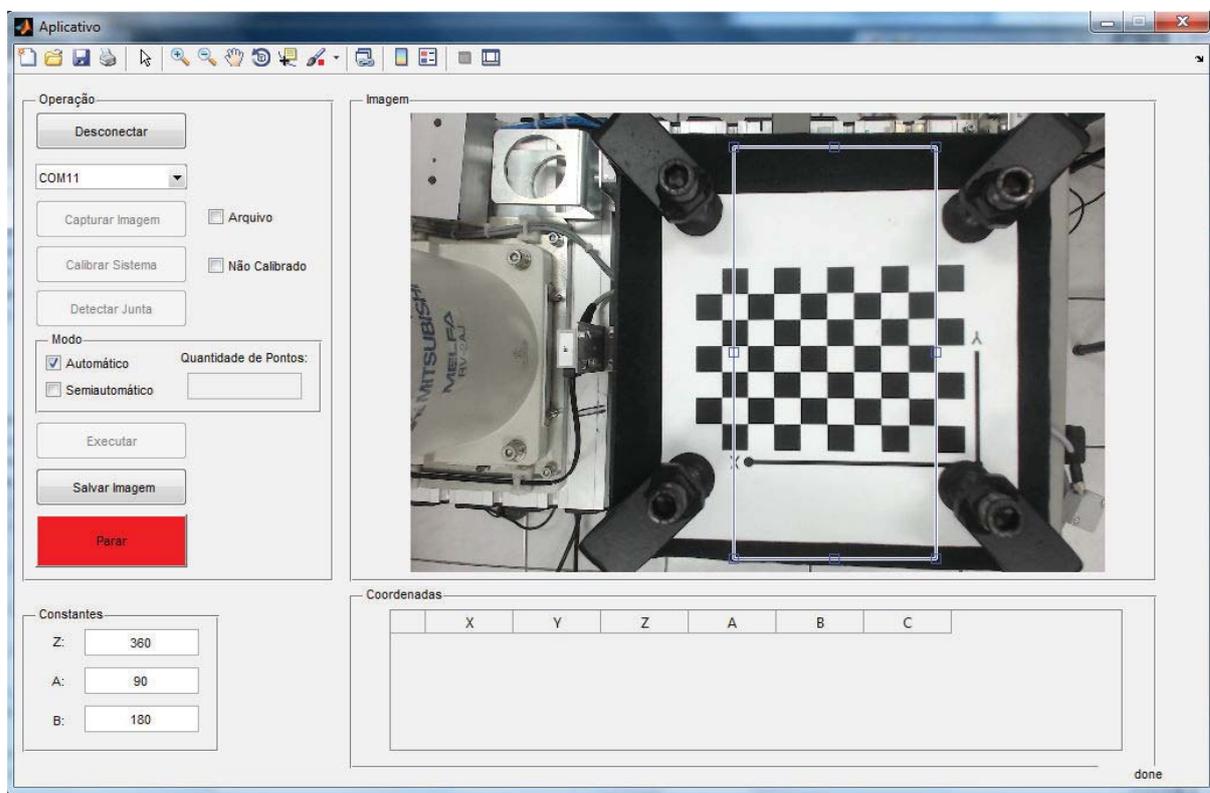
Figura 56 – Procedimento inicial para calibração do sistema.



Obtida a imagem do tabuleiro padrão, o usuário deve clicar em “Calibrar Sistema”, que o direcionará a uma janela para seleção do arquivo contendo os parâmetros da câmera (obtidos através da calibração da câmera). Importado o arquivo, o aplicativo irá executar o processamento para obtenção das referências das coordenadas reais da mesa em relação à

imagem. Logo após, o usuário deverá delimitar a área de interesse correspondente à região útil de trabalho da mesa, ilustrado pela Figura 57. Então, o sistema de visão se encontrará calibrado.

Figura 57 – Seleção da área de interesse.

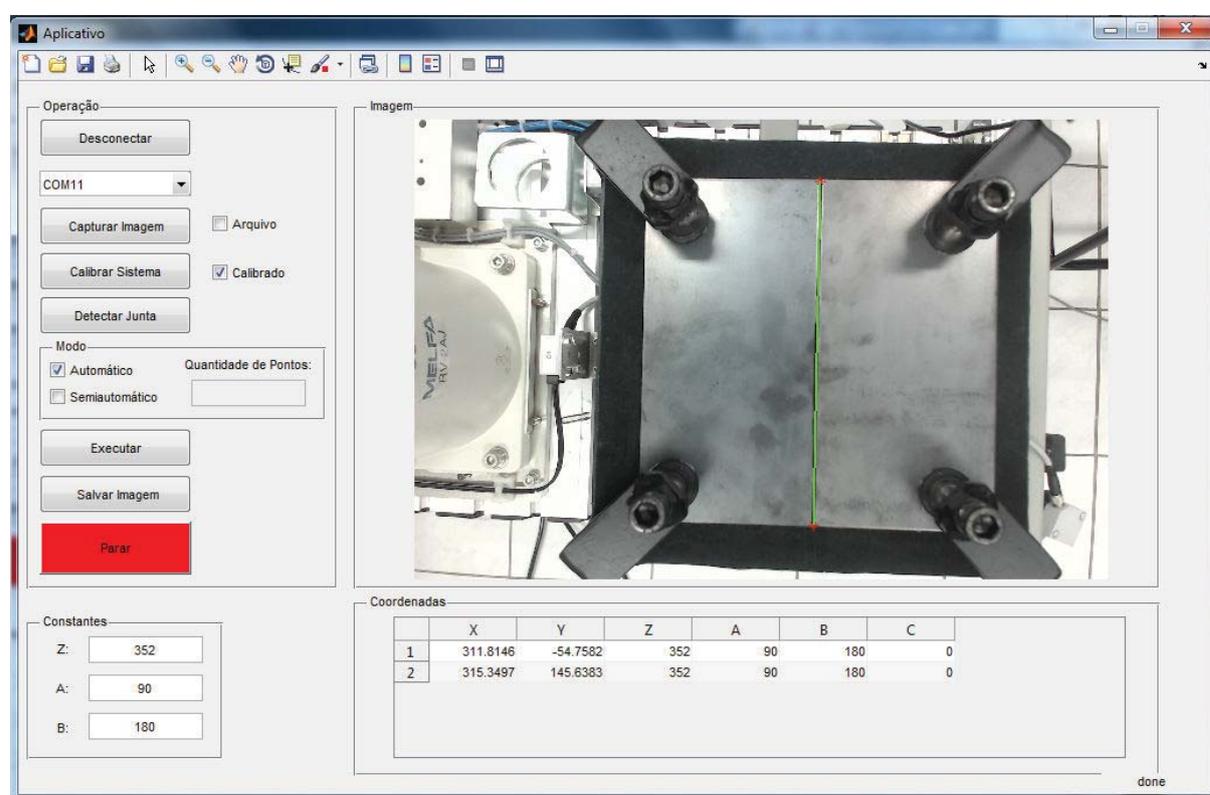


Com sistema de visão calibrado, o passo seguinte é retirar o tabuleiro padrão da mesa e, posicionar duas chapas de aço SAE1010 com dimensões 100 X 200 X 3.175mm, configurando uma junta a ser soldada. Feito isto, o usuário deverá clicar em “Capturar Imagem” para que o sistema faça a aquisição de uma nova imagem da junta a ser soldada. Esta pode ser visualizada na tela do aplicativo. Sendo satisfatória a imagem capturada, o usuário tem a tarefa de atribuir os valores das constantes referentes ao eixo Z , o qual corresponde à altura do efetuador, em relação ao sistema de referência da base do robô com o sistema de referência mesa de trabalho e; às constantes de A e B que são equivalentes às orientações em ângulos do efetuador (neste caso foram definidas $A = 90$ e $B = 180$).

Atribuído as constantes de Z , A e B , o usuário deverá optar por selecionar o modo automático ou semiautomático da próxima operação, que é a de “Detectar Junta”, onde:

- **Modo automático:** função pela qual, o aplicativo executa o processamento da imagem capturada das chapas de aço, extraindo os valores correspondentes aos pontos das coordenadas globais (X, Y) e exibindo-os em uma tabela na interface. Esta tabela das coordenadas, também contempla os valores dos eixos Z, A, B e C . Formando assim o caminho para a trajetória e orientação do efetuador no espaço cartesiano. Onde C , neste caso, tem valor 0 atribuído devido ao robô utilizado para os testes de validação do sistema, não permitir movimentação neste eixo de rotação. A Figura 58 representa o resultado obtido do processo de “Detectar Junta” no modo automático.

Figura 58 – Detecção de junta pelo aplicativo no modo automático.

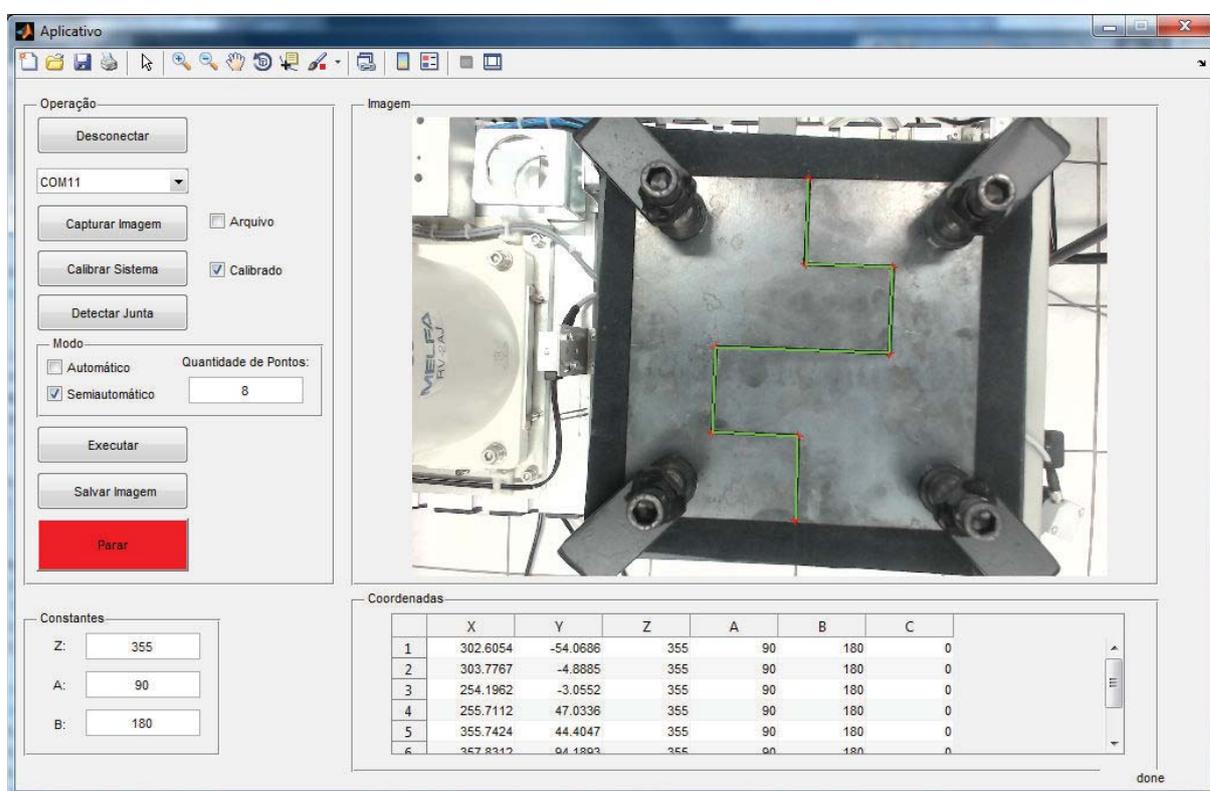


Nesta etapa, o usuário além poder visualizar na tela do aplicativo a trajetória que o robô executará, também tem a possibilidade de realizar a verificação dos valores das coordenadas globais (X, Y), obtidas pela detecção da junta através do processamento de imagem.

- **Modo semiautomático:** quando optado por efetuar a especificação semiautomática dos pontos das coordenadas na imagem capturada da junta, o usuário deve determinar no campo “Quantidade de pontos”, quantos pontos serão necessários para que seja possível traçar

manualmente o caminho sobre a imagem da junta. Processo pelo qual a imagem da região da junta é ampliada instantaneamente pelo aplicativo, auxiliando o usuário na indicação do ponto com maior precisão, de modo que, estabeleça-se a trajetória para o robô, em função desta especificação. Assim como no modo automático de “Detectar Junta”, o modo semiautomático também propicia a obtenção dos valores das coordenadas no plano cartesiano, correspondentes aos valores dos eixos (X,Y) , podendo também ser verificadas pelo usuário na tabela de coordenadas do aplicativo. A Figura 59 representa o modo semiautomático para “Detectar Junta”, por meio da aquisição da imagem das chapas a serem soldadas.

Figura 59 – Detecção de junta pelo aplicativo no modo semiautomático.



Para concluir o processo do aplicativo de sistema de visão computacional para soldagem robotizada, o usuário terá a tarefa de clicar no botão “Executar”, que culminará no envio da trajetória da junta a ser soldada ao controlador do robô que a executará.

Havendo a necessidade de efetuar mais processos de geração de trajetórias para outras uniões por soldagem robotizada, o usuário poderá partir da etapa de captura de imagem das chapas de aço, não havendo a necessidade de uma nova calibração do sistema. No entanto, se o aplicativo for reiniciado ou houver necessidade, uma nova operação de calibração do sistema deverá ser feita.

Outras duas funções do aplicativo são:

- “Salvar Imagem”: permite que a imagem capturada e a imagem processada pelo aplicativo, sejam armazenadas na forma digital – no formato “JPEG” – em um dispositivo compatível de memória. Desta maneira, pode ser criado um histórico de operações executadas, possibilitando futuramente, a realização de consultas a estes arquivos. Estes podem ser acessados por meio da seleção da opção “Arquivo” do aplicativo.

- “Parar”: assim como o próprio termo induz, é o meio pelo qual, uma operação em execução pelo robô, pode ser interrompida a qualquer momento, tendo como principal função, a parada de emergência.

4 VALIDAÇÃO E RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos através dos testes de validação experimental em laboratório, quanto à implementação e aplicação do sistema de visão de máquina proposto neste trabalho. Tornando possível desta maneira, a avaliação do desempenho segundo a sua funcionalidade, praticidade, eficiência e aplicabilidade.

4.1 Validação Experimental do Sistema de Visão

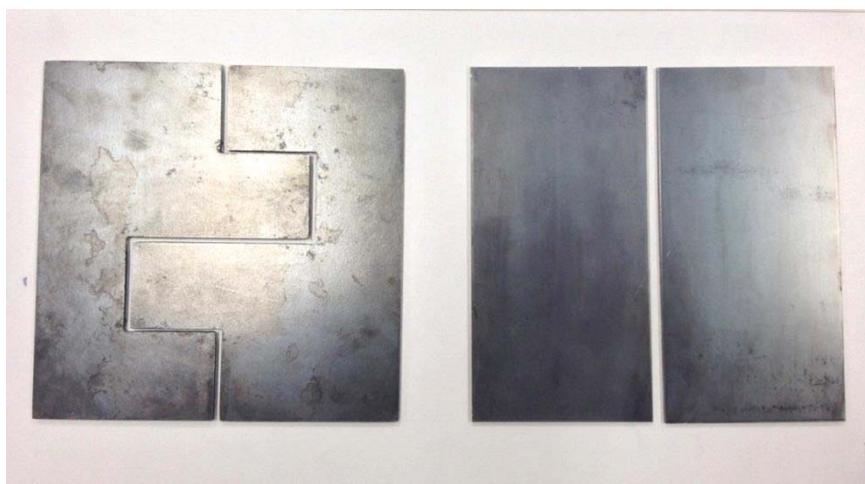
A validação do sistema de visão de máquina foi realizada por meio de testes experimentais em uma bancada montada no laboratório de robótica, utilizando-se o aplicativo desenvolvido, integrado a *webcam* Logitech C920 (calibrada) e ao robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ, onde as imagens da junta das chapas de aço foram capturadas estaticamente, testando-se na sequencia os seguintes parâmetros:

- Capacidade do sistema de visão processar a imagem digitalizada da união das chapas de aço por meio da utilização do modo automático e semiautomático do aplicativo, para obtenção dos pontos das coordenadas globais (X,Y) de juntas retilíneas e geração da respectiva trajetória;

- Envio da trajetória à unidade controladora para que seja executada pelo robô;

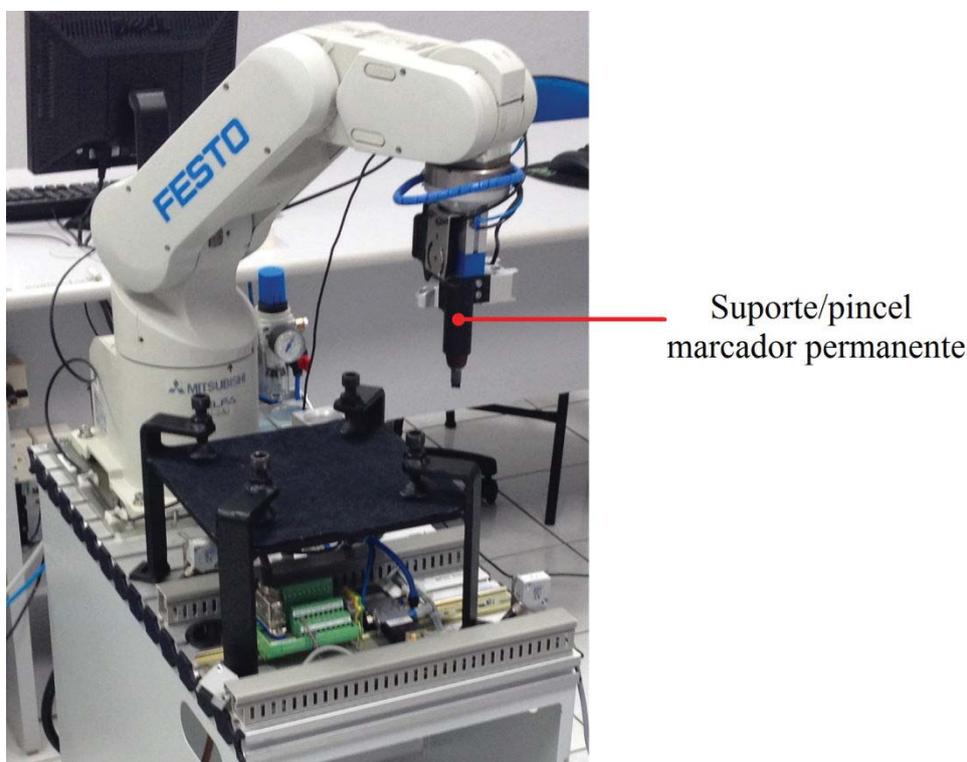
As chapas de aço utilizadas nos testes de aquisição da imagem pelo sistema de visão podem ser visualizadas na Figura 60. Através do posicionamento e fixação destas na mesa da bancada de testes, configurou-se a junta a ser soldada.

Figura 60 – Chapas de aço utilizadas nos testes.



Para tornar possível o registro visual da trajetória executada pelo robô durante os testes, foi fixado no efetuador do RV-2AJ, um suporte para um pincel marcador permanente, o qual é mostrado na Figura 61.

Figura 61 – Bancada de testes com suporte para pincel marcador permanente.

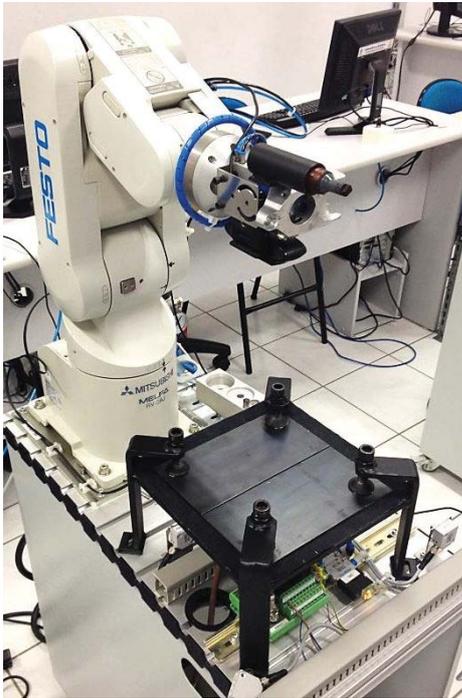


Cabe ressaltar que, em um primeiro momento, antecedendo o uso do aplicativo do sistema de visão para “Capturar Imagem” e “Detectar Junta”, há necessidade de realizar a etapa de calibração do sistema, utilizando-se os parâmetros obtidos da calibração da câmera e a definição da região de interesse. Tais procedimentos estão descritos no capítulo 3.3.

Com o sistema de visão calibrado, partiu-se para a execução dos testes correspondentes à aplicação do modo automático de detecção da junta, representado na Figura 62 e; do modo semiautomático, representado na Figura 63. Para cada teste realizado, as chapas de aço foram inicialmente posicionadas e fixadas sobre a mesa da bancada de testes, como ilustram a Figura 62 (a) e a Figura 63 (a), nas quais também pode ser observado que o robô já se encontra posicionado para a aquisição da imagem. Então, seguiu-se para a função do aplicativo de “Capturar Imagem”, onde a partir desta etapa, explanam-se os resultados obtidos pelos modos testados:

Figura 62 – Resultados obtidos dos testes de validação experimental do sistema de visão pelo modo automático.

(a)



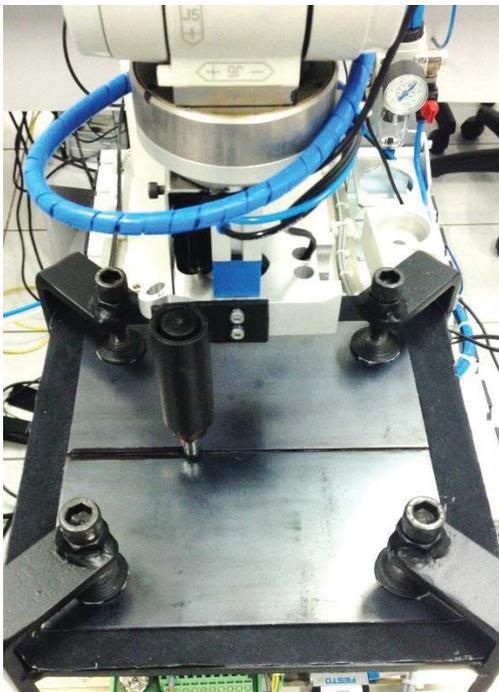
(b)

Imagem

Coordenadas

	X	Y	Z	A	B	C	
1	271.2052	-74.4553	312	90	180		0
2	275.0897	124.4409	312	90	180		0

(c)



(d)

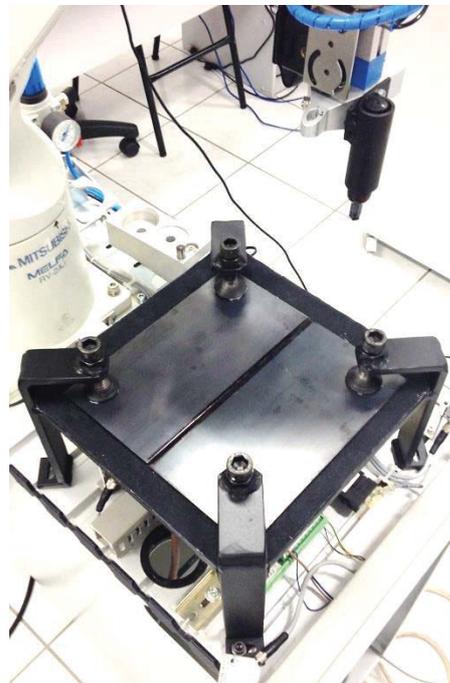
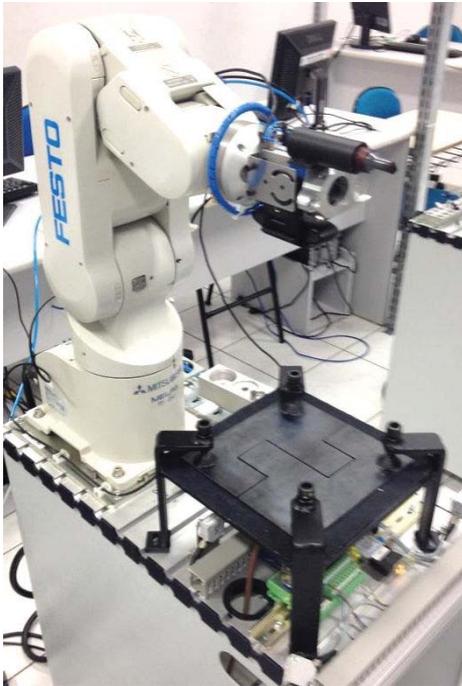


Figura 63 – Resultados obtidos dos testes de validação experimental do sistema de visão pelo modo semiautomático.

(a)



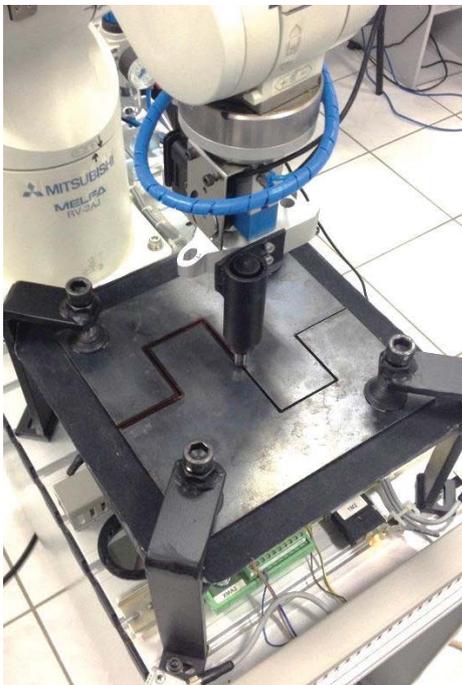
(b)

Imagem

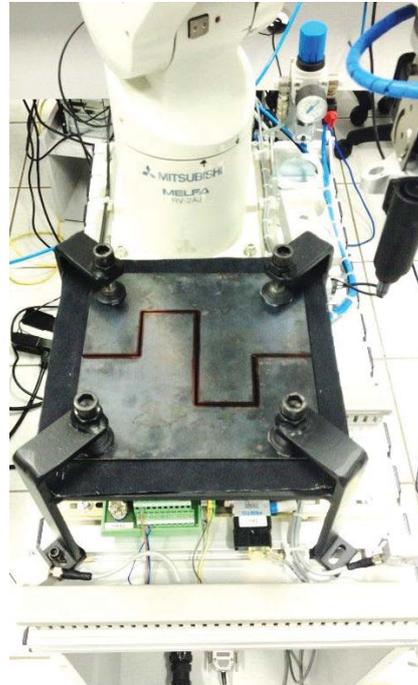
Coordenadas

	X	Y	Z	A	B	C
1	262.5389	-72.1238	312	90	180	0
2	263.8105	-21.6767	312	90	180	0
3	213.3790	-20.9549	312	90	180	0
4	215.2316	29.5416	312	90	180	0
5	315.6413	27.4642	312	90	180	0
6	317.4947	77.3732	312	90	180	0

(c)



(d)



– A imagem da Figura 62 (b) representa as coordenadas globais dos pontos inicial e final obtidos pelo modo automático do processamento de imagem para reconhecimento da junta a ser soldada, mostrando também na tela, a imagem da projeção da trajetória gerada para verificação prévia pelo usuário. Após esta etapa o usuário tem a tarefa de clicar no botão do aplicativo da função “Executar”, enviando assim a trajetória obtida pelo sistema de visão para a unidade controladora do robô, o qual a realizará. Na Figura 62 (c) pode ser visto o momento em que o RV-2AJ está executando a trajetória obtida pelo modo automático do sistema de visão e, na Figura 62 (d) pode-se contemplar a trajetória concluída com sucesso. Como o modo automático limita-se a obtenção dos pontos inicial e final, é indicado somente para junta do tipo retilínea de um único segmento de reta.

– O teste da aplicação do modo semiautomático para obtenção das coordenadas globais correspondentes aos dos pontos da junta das chapas de aço a serem soldadas, é apresentado na Figura 63 (b), possibilitando também que o usuário efetue uma prévia verificação da trajetória, a qual estando satisfatória é confirmada sua execução, podendo ser visualizada em andamento na Figura 63 (c) e posteriormente concluída com êxito pelo RV-2AJ na Figura 63 (d). Porém, foi constatado um determinado grau de dificuldade de utilização do modo semiautomático quanto à necessidade e precisão da indicação manual dos pontos sobre a imagem capturada da junta, o que pode causar inconvenientes na geração exata da trajetória.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sistema de Visão de Máquina desenvolvido neste trabalho atende ao objetivo proposto de processamento de imagens para geração de pontos de trajetória visando sua aplicação num processo robotizado de soldagem MIG/MAG de chapas de aço, com juntas retilíneas de topo. À vista disso, com base nos objetivos específicos elencados para seu desenvolvimento e os resultados obtidos nos testes de validação experimental em laboratório, pode-se considerar as seguintes avaliações:

– A etapa de aquisição de imagem da junta das chapas de aço por meio da utilização da *webcam* se demonstrou eficiente, sendo fundamental o procedimento de calibração, pelo qual obtiveram-se os parâmetros da câmera em relação ao plano de captura, através da determinação do tamanho dos *pixels* da imagem em milímetros e da estimativa do conjunto de coeficientes de correção da distorção da lente, atribuindo desta forma, uma maior precisão ao sistema de visão, além da vantagem de dispensar a necessidade da utilização de uma placa de aquisição de imagens, justificando assim, dentre outros fatores a viabilidade da utilização da *webcam*. Outro teste importante associado a esta etapa, foi a especificação da cor a ser aplicada ao fundo da cena de captura, sendo decisivo para o sucesso da etapa seguinte, que trata do processamento da imagem na extração dos contornos da chapa de aço, onde a cor preta desempenhou o melhor resultado durante os testes, sendo escolhida para utilização e aplicação à mesa da estação de trabalho.

– Os testes em laboratório para a validação do sistema de visão, evidenciaram que o aplicativo desenvolvido apresenta uma interface intuitiva e de fácil utilização, desempenhando de forma altamente satisfatória as tarefas de processamento da imagem para geração automática e semiautomática das coordenadas dos pontos correspondentes a trajetória retilínea da junta das chapas de aço a serem soldadas e, o envio desta à unidade controladora do robô para execução. Embora o aplicativo esteja customizado para o robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ, este pode ser aplicado em outros equipamentos, apenas reescrevendo-se a linguagem correspondente e estabelecendo-se a interface de comunicação, porém, isto pode ser um fator dificultador para sua implementação, devido a grande variedade de fabricantes de robôs, onde cada um utiliza sua própria linguagem de programação. Entretanto, o aplicativo é compatível com o ambiente *Windows*, o que permite rodar em qualquer computador que possua instalado este sistema operacional.

– Tendo em vista a avaliação realizada, conclui-se que a aplicação do sistema de visão de máquina culminou na geração dos pontos da trajetória a ser executada por um robô. Isto foi possível, graças ao sucesso obtido pelo processamento das imagens capturadas das juntas das chapas de aço, das quais foram extraídas as informações das coordenadas globais dos pontos correspondentes à geometria do caminho para soldagem.

– Acerca dos resultados alcançados, o potencial de aplicação deste sistema de visão integrado a uma célula de soldagem robotizada, pode propiciar a flexibilização do processo quanto à necessidade da realização de união de chapas cujas juntas variam de dimensão, posicionamento e orientação, viabilizando assim a implementação de robôs em processos de soldagem onde há necessidade de execução de tarefas não repetitivas. Nesse sentido, também pode proporcionar a otimização do tempo despendido anteriormente à tarefa de programação manual dos movimentos do robô por um operador humano (sujeita a erros), além de dispensar a necessidade de contratação de mão de obra especializada. Em relação às melhorias provenientes da implementação deste sistema, ainda podem ser elencadas: a atribuição de maior confiabilidade e autonomia ao processo e, conseqüente incremento da produção.

– No entanto, para a implementação deste sistema de visão de máquina em uma célula robotizada de soldagem MIG/MAG industrial, faz-se necessário a realização de algumas alterações que o tornem mais robusto, exigindo a execução de testes com a utilização de robôs industriais que executem efetivamente a soldagem a partir da trajetória gerada pelo processamento de imagem, com a finalidade de se obter o real desempenho da integração do sistema em um ambiente fabril.

Visando otimizações em trabalhos futuros desta área de pesquisa, sugere-se:

- Implementar um sistema de auto-calibração;
- Tornar robusto o sistema de visão de máquina desenvolvido neste trabalho para sua implementação em um ambiente industrial;
- Implementar mais uma câmera, consistindo em um sistema de visão estéreo, o que possibilitará o processamento da imagem e reconhecimento para soldagem de perfis estruturais e para soldagem de outros tipos de uniões de chapas de aço;
- Implementar o uso de trajetórias circulares, elípticas e parabólicas sobre os pontos;
- Implementar um sistema de visão para inspeção da qualidade da soldagem resultante deste processo de visão de máquina.

REFERÊNCIAS

- AYOB, M. A.; ZAKARIA, W. N. W.; JALANI, J.; **Forward Kinematics Analysis of a 5-Axis RV-2AJ Robot Manipulator**. Electrical Power, Electronics, Communications, Controls, and Informatics Seminar (EECCIS), 2014.
- ALVES, V. J.: **Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.
- ASM, Handbook.: **Welding Fundamentals and Processes**. Volume 06A, USA, Novembro, 2011.
- AWS A2.4 (2012).: **American Welding Society Welding Symbol Chart**. American Welding Society. Florida, US, 2012.
- AWS A3.0 (2010).: **Standard welding terms and definition**. 12th ed. American Welding Society. Florida, US, 2010.
- BARBOSA, A. F.; SCHIAPPACASSA, A.: **Adaptação USB para módulo de aquisição de dados**. Nota técnica 004/11. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2011.
- BRANDI, S. D.: Processo MIG/MAG. In: BRANDI, S. D.; WAINER E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004.
- CHEN, S.; MA, H.; WEI, S.; SHENG, Z.; LIN, T.: **Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding**. Springer-Verlag London Limited, Outubro, 2009.
- CRAIG, J. J.: **Robótica**. 3ª ed., São Paulo: Pearson, 2012.
- FANG, G.; DINHAM, M.: **Low Cost Simultaneous Calibration of a Stereo Vision System and a Welding Robot**. International Conference on Robotics and Biomimetics. Dezembro 14-18, 2010, Tianjin, China.
- FANG, G.; DINHAM, M.: **Weld Seam Detection using Computer Vision for Robotic Arc Welding**. 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Agosto 20-24, 2012, Seul, Coreia.
- FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q.; FAGUNDES, H. C.; PEREIRA, F. L.: **Qualificação do Procedimento de Soldagem de Tubulações Utilizando Robô Orbital**. XXXIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, Caxias do Sul, RS, Agosto de 2007.
- FERNANDES, E.: **Montagem Experimental Para Caracterização de Câmeras Digitais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

FORESTI, R. L.: **Sistema de Visão Robótica Para Reconhecimento de Contornos de Componentes na Aplicação de Processos Industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2006.

FORTES, C.: **Soldagem MIG / MAG**. ESAB, Janeiro, 2005

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

GRASSI, M. V.: **Desenvolvimento e Aplicação de um Sistema de Visão Para Robô Industrial de Manipulação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2005.

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

HENRIQUES, R. V. B.: **Desenvolvimento de uma Metodologia para Planejamento de Trajetórias em Soldagem Robotizada**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2005.

HUSSIN, M. S. F.; DAUT, A. S. J.: **Robotics Application in Arc Welding Robotics - A Review on Current**. Int. J. of Mechanical Computational and Manufacturing Research, Vol. 2. No. 1, 2013.

IFR, International Federation of Robotics: **Service Robots Statistics 2014**. Disponível em: <<http://www.ifr.org/service-robots/statistics>>. Acesso em: 20/09/2014.

JUNEGHANI, B.; NURUKI, J.: **Keeping welding costs from spiraling out of control**. Automation and Robotics, Article, The Fabricator®, Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/author/barry-juneghani>>. Acesso em: 13/07/2015.

JUNEK FILHO, P. C.: **Otimização de Trajetórias de Robôs de Soldagem Aplicados a Células de Manufatura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2008.

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.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q.: **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. E. ed., Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MELO, J. A. T.: **Projeto e Montagem de Equipamento para Controle de Sistema de Análise Não Destrutiva Usando Radiação Nuclear**. Dissertação. Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). São Paulo/SP, 2006.

MERRIFIELD, T.: **Guidelines for Implementing Robotic Arc Welding**. AWS Welding Journal, pp. 34- 37, Abril de 2005.

MITSUBISHI. Industrial Robot: **RV-1A/2AJ Series Instruction Manual Robot Arm Setup & Maintenance**. Manual de especificações técnicas, 2002.

MOREIRA, H. S.: **Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2008.

MOUSSA, S.: **Robótica Industrial**. 1ª ed., São Paulo: Editora do Autor, 2011.

NIKU, S. B.: **Introdução à Robótica – Análise, controle, aplicações**. 2ª ed. São Paulo: LTC, 2013.

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

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W.R.: **Análise de imagens digitais**. 1ª ed. São Paulo: Thonsom, 2008.

PEREIRA JUNIOR, O.: **Método Local de Correção da Distorção da Lente Aplicado a Visão Estereoscópica**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, (UFSC), Florianópolis, 2014.

RIA, Robotic Industries Association: **The North American Robotics Market: First Quarter 2014 Update**. Disponível em: <<http://www.robotics.org>>. Acesso em: 20/09/2014.

RIVIN, E. I.: **Mechanical Desing of Robots**, McGraw Hill Book Company, New York, 1988.

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

ROSÁRIO, J. M.: **Princípios de Mecatrônica**. 1ª ed., São Paulo: Prentice Hall, 2005.

SANTOS, F. M. F.: **Robótica Industrial**. Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Aveiro (UA), Portugal, 2004.

SICILIANO B., SCIAVICCO L., VILLANI L., ORIOLO G.: **Robotics, Modeling, Planning and Control**. 1ª ed.: Springer, 2009.

SILVA, A. L. V.: **Arquitetura Compacta para Projeto de Robôs Móveis Visando Aplicações Multipropósitos**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em

Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos/SP, 2008.

SILVEIRA, J. G.; OLIVEIRA, R. S.: **Sistema de Aquisição de Dados via USB usando Interface Genérica de Áudio**. Artigo. Departamento de Automação e Sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis/SC, 2008.

ŠLJIVO, D.; ČABARAVIDIĆ, M.: **Simulation of a 5-axis RV-2AJ Robot**, 17th International Research/Expert Conference, Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Istanbul, Turkey, 10-11 Setembro, 2013.

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

SOUZA, J.; CARDOZA, J.: **Sensores de Imagem Digitais CCD E CMOS**. Artigo. VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, 2012.

TSAI, R.: **A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses**. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, n. 4, p. 323–344, Agosto, 1987.

TUNG, P. C.: **An Image-Guided Mobile Robotic Welding System for SMAW Repair Processes**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, p. 1223-1233, May, 2004.

USB ORGANIZATION. **USB Implementers Forum**. Disponível em: <<http://www.usb.org>>. Acesso em: 23/12/2014.

VILLAFUERTE, J.: **Advances in Robotic welding Technology**”, AWS Welding Journal, pp. 28- 33, Janeiro, 2005.

ZHANG, Z.: **A flexible new technique for camera calibration**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 22, n. 11, p. 1330 – 1334, Novembro, 2000.

Referencial Complementar

CHEN, H.; LEI, F.; XING, G.; LIU, W.; SUN, H.: **Visual Servo Control system for Narrow Butt Seam**. School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 2013.

CHEN, S. B.; CHEN, X. Z.; QIU, T.; LI, J.Q.: **Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing**. Journal of Intelligent and Robotics Systems, 43: 77-97, 2005.

KIDDEE, P.; FANG, Z.; TAN, M.: **Visual Recognition of the Initial and End Points of Lap Joint for Welding Robots**. International Conference on Information and Automation, Hailar, China, Julho, 2014

MALAMAS, E.; PETRAKIS, E.; ZERVASKIS, M.; PETIT, L.; Legatt, Jean-Didier, **Industrial Vision: Systems, Tools and Techniques, Image and Vision Computing**, London, v.21,n.2, p.171-188, 2003.

MATHWORKS, 2014. Disponível em:

<http://www.mathworks.com/help/matlab/creating_guis/what-is-a-gui.html>. Acesso em: 21/12/2014.

MICALLEF, K.; FANG, G.; DINHAM, M.; **Automatic Seam detection and pathplanning in robotics welding**. Robotics welding, Intelligence and Automation, LNEE 88. Pp 23-32, 2011.

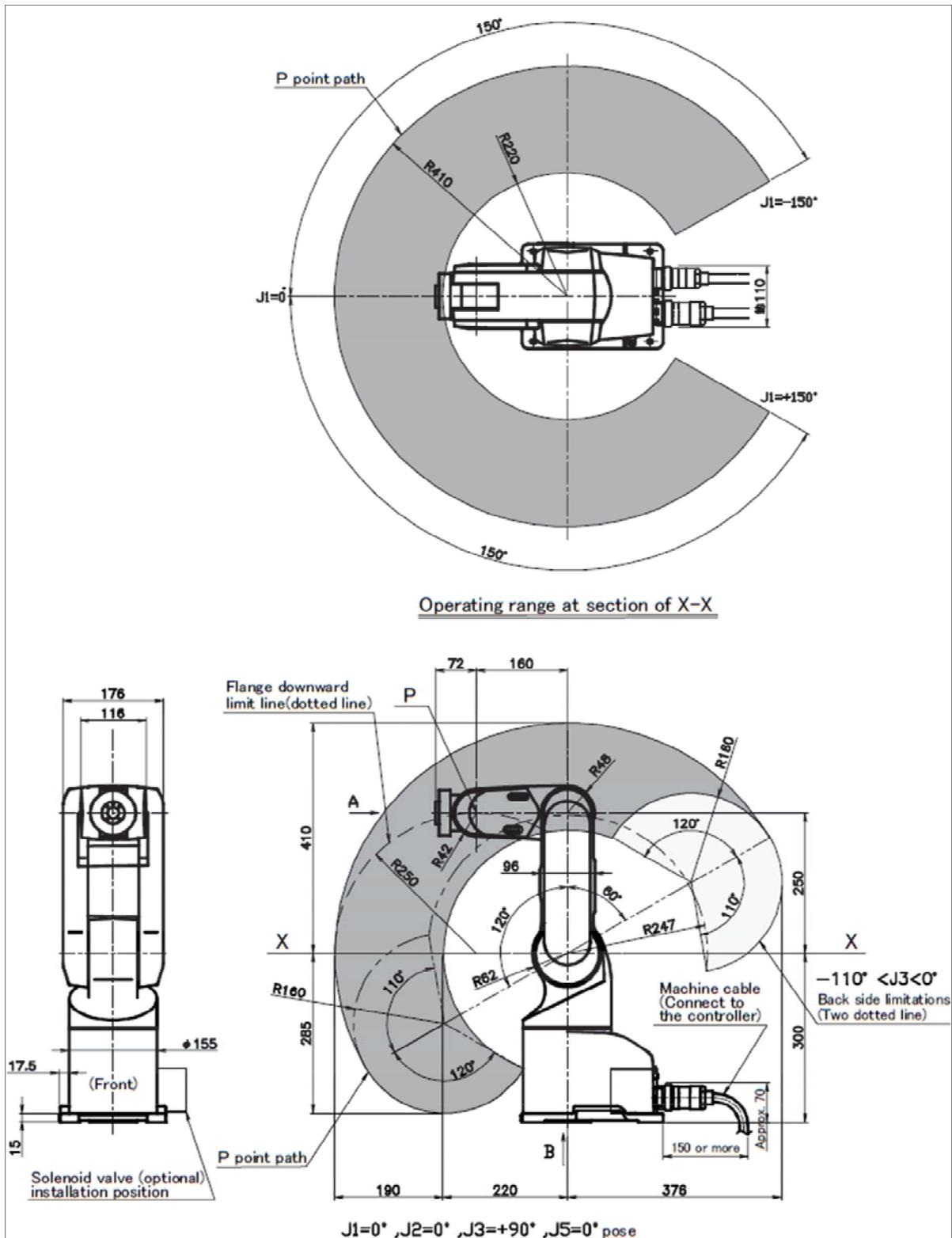
MOTTA, J. M.; **Optimised Robot Calibrations Using a Vision-Based Measurement System with a Single Camera**, Relatório de Tese de Doutorado, Cranfield University, Reino Unido, 1999.

SHEN, H., LIN, T., CHEN, S.: **A Study on Vision-Based Real-Time Seam Tracking in Robotic Arc Welding**. Robot. Weld Intelligence. & Automation, 311–318, 2007.

SHI, F., ZHOU, L., LIN, T., CHEN, S.: **Efficient Weld Seam Detection for Robotic Welding from a Single Image**. Robot. Weld Intelligence. & Automation, 289–294, 2007.

ANEXO I

Dimensões do robô Mitsubishi MELFA RV-2AJ.



Fonte: Mitsubishi, 2002

ANEXO II

Especificações técnicas da Logitech® HD Pro *Webcam* C920.

- Videochamada Full HD de 1080 *pixels* (até 1920 x 1080 *pixels*) com a versão mais recente do Skype para Windows.
- Videochamada HD de 720 *pixels* (até 1280 x 720 *pixels*)
- Gravação de vídeo *Full* HD (até 1920 x 1080 *pixels*) com um sistema recomendado
- Captura de foto com 15 *megapixels* (com otimização do software)
- Compactação de vídeo H.264
- Tecnologia Logitech Fluid Crystal™.
- Lente Carl Zeiss® com foco automático de vinte estágios.
- Correção automática de pouca luz.
- Foco automático
- Conexão USB 2.0 de alta velocidade certificado (pronto para USB 3.0).
- Controles de panorâmica, inclinação e zoom.
- Detecção de movimento.
- Clipe universal pronto para tripés que se ajusta a monitores de laptop, LCD ou CRT.