

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

LEONARDO SPINELLI ANDRIGHETTI

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MAPEAMENTO DE
POSIÇÃO DE JUNTA APLICADO AO PROCESSO DE
SOLDAGEM ROBOTIZADA**

CAXIAS DO SUL

2021

LEONARDO SPINELLI ANDRIGHETTI

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA MAPEAMENTO DE POSIÇÃO DE JUNTA APLICADO AO PROCESSO DE SOLDAGEM ROBOTIZADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção da aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II – Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Orientador:

Me. Felipe Augusto Tondo

Aprovado em 30/06/2021

Banca Examinadora

Me. Felipe Augusto Tondo (orientador)
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Me. Ricardo Leal Costi
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Me. Paulo Henrique Gubert
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

RESUMO

A soldagem robotizada, processo amplamente utilizado na indústria de manufatura, possui como um dos fatores que limitam sua eficácia os erros cometidos no alinhamento das peças, ocasionados pelos processos prévios à soldagem (tais como: corte e dobra), bem como por erro do operador no posicionamento das peças a serem soldadas. Ressalta-se que embora essa problemática possa ser atualmente sanada por equipamentos de alta performance, esses são de alto custo, que podem acarretar na inviabilidade de aplicação em alguns casos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar uma alternativa aos equipamentos para mapeamento de posições da junta de topo utilizando um sensor de distância a LASER e um braço robótico de seis eixos. O algoritmo implementado foi desenvolvido no *Software* TwinCAT utilizando como controlador um computador industrial com plataforma Windows. Os resultados obtidos demonstraram que o algoritmo proposto e a programação realizada foram eficazes para o mapeamento das juntas, processamento e envio dos dados ao robô e a realização de uma trajetória com precisão e repetibilidade nas três posições de um conjunto de peças selecionadas, além de apresentar um custo final abaixo da média existente no mercado. As análises preliminares sugerem a viabilidade de implementação da tecnologia proposta a fim de minimizar as falhas de soldagem ocasionadas pela imprecisão do posicionamento das peças em demandas específicas do mercado.

Palavras-chave: soldagem adaptativa, sensores a LASER, rastreamento de junta, solda MIG/MAG

ABSTRACT

The robotic welding is largely used in the manufacturing industry, standing out as a flexible, efficient and precise operation process, which enables high productivity and quality. However, improvements and adaptations have been continuously studied. One of the factors that limit and compromise the quality of this process are the errors made in the alignment of the parts, caused by the processes before the welding (such as: cutting and bending), as well as by the error of the welding operator in positioning the parts. Although this problem can now be solved by high performance equipment, these ones are of high cost, which results in the infeasibility of application in some cases. The objective of these paper was the development of an algorithm for mapping positions, using a LASER distance sensor and a six-axis robotic arm already used in industrial processes. The algorithm was developed at the Twincat Software using an industrial computer with Windows platform as controller. The results obtained showed that the proposed algorithm and the programming were effective for mapping the joints, processing and sending data to the robot and the calculation of a trajectory with precision and repeatability at the parts, positioned in three different ways. Preliminary analyzes suggest the feasibility of implementing the proposed technology in order to minimize welding failures caused by the inaccuracy of the placement of parts in specific market demands.

Keywords: adaptive welding, LASER sensors, seam tracking, MIG/MAG welding.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Configuração física do robô industrial. | 15 |
| Figura 2 – Classificação dos robôs conforme os tipos de juntas..... | 16 |
| Figura 3 – Classificação dos robôs conforme os tipos de juntas (a) e ilustração do sistema de coordenadas ortogonal (b). | 17 |
| Figura 4 – Evolução dos processos de soldagem. | 18 |
| Figura 5 – Classificação dos processos de soldagem..... | 19 |
| Figura 6 – Representação do processo de soldagem a arco, ilustração do arco elétrico (a), fotografia do arco elétrico (b) e zonas pós-soldagem (c)..... | 21 |
| Figura 7 – Ilustração esquemática da solda MIG/MAG. | 22 |
| Figura 8 – Equipamentos do processo MIG/MAG. | 23 |
| Figura 9 – Representação esquemática do controle adaptativo..... | 27 |
| Figura 10 – Visão geral da estrutura do <i>software</i> de controle do rastreador de costura..... | 29 |
| Figura 11 – Classificação dos sensores para soldagem a arco. | 30 |
| Figura 12 – Sistema automatizado de soldagem com sensor de contato do tipo roda mola (a) e sonda de contato (b)..... | 31 |
| Figura 13 – Espectro de luz durante a soldagem a arco (u.a.= unidade arbitrária). ... | 33 |
| Figura 14 – Configuração do sensor LASER com padrão de projeção de ponto de LASER (a), uma única faixa de LASER (b) e múltiplas faixas de LASER (c). | 33 |
| Figura 15 – Técnica da triangulação óptica com um feixe LASER..... | 34 |
| Figura 16 – Ilustração do funcionamento de um sensor óptico tipo “folha de luz” e seus parâmetros característicos..... | 35 |
| Figura 17 – Perfil de uma junta “V” calibrado no sistema de coordenadas bidimensional do sensor LASER e algumas das informações geométricas da junta disponibilizadas. | 37 |
| Figura 18 – Representação de encoder absoluto de deslocamento linear (a) e angular (b). | 38 |
| Figura 19 – Aspectos físicos de encoders rotativos. | 38 |
| Figura 20 – Demonstração do aumento das publicações sobre soldagem robotizada a partir de 1997. | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 – Manipulador Robótico BA006N (a) e Controladora E01(b). | 42 |
| Figura 22 – Cabeçote LASER IL600. | 42 |
| Figura 23 – Amplificador IL1000 (a) e Acoplador Ethercat DL-EC1A(b). | 43 |
| Figura 24 – Suporte do sensor de distância a LASER acoplado a ferramenta do robô. | 44 |
| Figura 25 – Computador Industrial CX8190 (a) e acoplador Ethernet/IP EL6652 (b). | 45 |
| Figura 26 – Esquemático da Arquitetura de Hardware da Bancada de Testes. | 46 |
| Figura 27 – Dimensões da Chapa de Aço SAE 1020 (a) para ensaio e posicionamento para simulação de uma junta de topo (b). | 47 |
| Figura 28 – Fluxograma proposto para o algoritmo de funcionamento. | 48 |
| Figura 29 – Bancada de testes utilizada para o desenvolvimento da tecnologia proposta. | 49 |
| Figura 30 – Representação do painel de comando utilizado (a) e do dispositivo EL6652 (b)..... | 50 |
| Figura 31 – Representação da controladora E01 (a) e da placa principal “ <i>main CPU</i> (b)..... | 50 |
| Figura 32 – Variáveis utilizadas para recebimento dos dados de coordenadas da posição do robô. | 51 |
| Figura 33 – Representação das coordenadas do robô demonstradas no <i>teach</i> <i>pendant</i> (a) e valores recebidos no computador industrial (b)..... | 51 |
| Figura 34 – Representação do amplificador de sinais (IL1000) e o módulo de comunicação Ethercat (DL-ECA1)..... | 52 |
| Figura 35 – Variável de entrada dos valores de distância medida pelo sensor LASER..... | 52 |
| Figura 36 – Representação da incidência do feixe LASER na folha branca. | 53 |
| Figura 37 – Trajetória executada pelo robô, utilizando o ponto LASER como centro da ferramenta. | 54 |
| Figura 38 – Posição inicial do programa trajetória de referência (a), posição inicial da trajetória de varredura do primeiro ponto da junta (b), posição final da trajetória de varredura do primeiro ponto da junta (c), posição inicial da trajetória de varredura do segundo ponto da junta (d), posição final da trajetória de varredura do segundo ponto da junta (e) e posição final do programa trajetória de referência (f). | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 39 – Visualização do programa da trajetória de referência na tela do teach pendant do robô. | 55 |
| Figura 40 – Passo inicial da máquina de estado, aguarda gatilho do robô para prosseguir..... | 56 |
| Figura 41 – Gatilho para o início da coleta de dados do ponto inicial da junta..... | 56 |
| Figura 42 – Lógica executada para a coleta de dados das coordenadas do robô em vetores..... | 57 |
| Figura 43 – Compensação do posicionamento do sensor a LASER nas coordenadas X e Y..... | 58 |
| Figura 44 – Lógica para encontrar o maior valor medido de distância em cada uma das varreduras realizadas pelo robô. | 58 |
| Figura 45 – Lógica realizada para vincular os valores de coordenada central da junta a uma variável de tipo inteiro..... | 59 |
| Figura 46 – Lógica para envio dos dados das coordenadas centrais da junta ao programa Value..... | 59 |
| Figura 47 – Lógica para coleta de dados durante a execução da trajetória. | 60 |
| Figura 48 – Comissionamento dos dados para exportação em “.csv”..... | 60 |
| Figura 49 – Lógica para inicialização dos valores nos vetores..... | 61 |
| Figura 50 – Demarcação do posicionamento dos corpos de prova em papel milimetrado nas posições 1 (-), 2(-) e 3(-), com (a) e sem realce (b)..... | 62 |
| Figura 51 – Posição 1: demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado (a); corpos de prova posicionados sobre a demarcação do papel milimetrado (b); gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados (c)..... | 63 |
| Figura 52 – Posição 2: demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado (a); corpos de prova posicionados sobre a demarcação do papel milimetrado (b); gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados (c)..... | 64 |
| Figura 53 – Posição 3: demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado (a); corpos de prova posicionados sobre a demarcação do | |

papel milimetrado (b); gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados (c).....65

Figura 54 – Gráfico para comparação das trajetórias realizadas durante as três execuções para teste de mapeamento da junta (Posição 1, 2 e 3).....66

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Conceitos de um Robô Industrial abordado por diferentes organizações. | 14 |
| Tabela 2 – Especificações Cabeçote LASER IL600..... | 43 |
| Tabela 3 – Posições utilizadas para validação do funcionamento do algoritmo..... | 61 |
| Tabela 4 – Custo de componentes aplicados à soluções para rastreamento de junta já existentes. | 66 |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL..... | 12 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 12 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 13 |
| 2.1 | ROBÓTICA INDUSTRIAL | 13 |
| 2.1.1 | O Robô | 14 |
| 2.2 | PROCESSO DE SOLDAGEM..... | 18 |
| 2.2.1 | Soldagem por Fusão | 20 |
| 2.2.1.1 | Solda MIG/MAG | 21 |
| 2.3 | SOLDAGEM ROBOTIZADA..... | 24 |
| 2.3.1 | Soldagem Robotizada Adaptativa | 26 |
| 2.4 | SENSORIAMENTO APLICADO AO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO | 29 |
| 2.4.1 | Sensores a LASER | 32 |
| 2.4.1.1 | Estrutura do Sistema de Controle do Robô e Processamento do Perfil de Junta..... | 36 |
| 2.4.2 | Encoders Ópticos | 37 |
| 2.5 | TRABALHOS RELACIONADOS | 39 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 41 |
| 3.1 | MATERIAIS | 41 |
| 3.1.1 | Manipulador Robótico | 41 |
| 3.1.2 | Sensor de Distância | 42 |
| 3.1.3 | Computador Industrial | 44 |
| 3.1.4 | Bancada de Testes | 45 |
| 3.1.5 | Corpo de Prova | 47 |
| 3.2 | MÉTODOS | 47 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 49 |
| 4.1.1 | Montagem do Hardware e Estabelecimento da Comunicação entre os Componentes | 49 |
| 4.1.2 | Comunicação Ethercat | 52 |
| 4.1.3 | Cálculo do Offset da Tocha | 53 |
| 4.1.4 | Programação da Trajetória de Referência | 53 |
| 4.1.5 | Obtenção e Envio das Coordenadas da Junta | 56 |
| 4.1.6 | Execução e Validação do Programa | 61 |
| 4.1.7 | Avaliação da Viabilidade Econômica da Tecnologia Proposta | 66 |

| | | |
|---|---|----|
| 5 | CONCLUSÃO | 68 |
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 69 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 70 |
| | APÊNDICE 1 – PROGRAMA AUTOSTART4.PC..... | 75 |
| | APÊNDICE 2 – PROGRAMA VALUE.PRG | 76 |
| | APÊNDICE 3 – PROGRAMA PRA EXPORTAÇÃO DE ARQUIVO .CSV | 80 |

1 INTRODUÇÃO

A robótica industrial tem sido uma ferramenta de auxílio para aumento da produtividade desde o ano 1950, ano marcado pela criação do primeiro manipulador destinado à indústria. Ela permite a redução de custos dos produtos fabricados, redução de perdas e economia de energia devido à rapidez, precisão, coordenação de movimentos complexos e controle racional dos parâmetros de produção (ALBA, 2018).

A soldagem robótica implica na introdução de um robô tanto ao processo de produção física quanto para o processamento de informação. Para aplicação desta, ao longo de caminhos pré-programados, é necessário que as peças a serem soldadas sejam posicionadas com precisão e corretamente mantidas no lugar, visto que os caminhos tridimensionais a serem seguidos são complexos (NAYAK; RAY, 1993). Além disso, as peças devem ser apresentadas ao soldador robótico precisamente na mesma posição e orientação.

No entanto, falhas de alinhamento das peças, ocasionados pelos processos prévios à soldagem, bem como por erro do operador de máquinas no posicionamento das peças são bastante frequentes e ocasionam falhas no processo e posteriormente custo em retrabalho (ROUT; DEEPAK; BISWAL, 2019).

Diante dessa problemática, a soldagem está avançando para uma produção personalizada, utilizando sistemas de soldagem que podem se ajustar de forma inteligente, por meio de sistemas de visão e sensores integrados a manipuladores robóticos com a finalidade de torná-los adaptáveis a condições de contorno previamente definidas (NAYAK; RAY, 1993).

Sistemas de soldagem adaptativa possuem a capacidade de rastrear em tempo real uma junta ao longo de caminhos de solda não pré-programados. Além disso, também oferecem recursos à detecção pré-soldagem de grandes erros de fixação (localização de peças), assumindo um modelo de costura e seus parâmetros são calculados de forma adaptativa (KINDERMANN, 2016).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo para mapeamento de posições utilizando um sensor de distância a LASER e um braço robótico já utilizado em processos industriais, afim de apresentar uma tecnologia viável e que atenda as demandas específicas do mercado.

1.1 OBJETIVO GERAL

Implementação de um algoritmo para mapeamento de posições aplicado a soldagem robotizada, utilizando um sensor de distância a LASER, visando atender demandas específicas do mercado de forma mais viável economicamente.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para cumprir o objetivo geral são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- realizar a montagem do *hardware* necessário para funcionamento da bancada de testes;
- estabelecer a troca de dados entre os componentes da arquitetura da bancada de testes;
- coletar os valores de coordenadas do manipulador robótico;
- desenvolver o programa Trajetória de Referência;
- desenvolver um algoritmo para análise de dados e mapeamento de coordenadas do robô.
- desenvolver um algoritmo para envio de coordenadas à um braço robótico equipado com uma tocha de soldagem MIG/MAG;
- analisar a viabilidade econômica do protótipo desenvolvido.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentadas as características relacionadas a manipuladores robóticos, seu funcionamento e aplicação no ambiente industrial, enfatizando a utilização de robôs no processo de soldagem.

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre processos de soldagem, enfatizando o processo MIG/MAG. Além disso, serão discutidos os fundamentos teóricos básicos da soldagem robotizada e a utilização de sensoriamento aplicado ao rastreamento de juntas.

2.1 ROBÓTICA INDUSTRIAL

A robótica é a ciência ou o estudo da tecnologia associado com o projeto, fabricação, teoria e aplicação de robôs (MAHMUD, 2017; FENERICK, VOLANTE, 2020). Esta é caracterizada por integrar diferentes áreas de conhecimento, como: engenharia mecânica, engenharia elétrica, inteligência artificial e automação industrial (MAIA, 2020).

A aplicação industrial começou no século XVIII, na indústria têxtil, com o aparecimento dos primeiros teares mecânicos. Com o contínuo progresso da revolução industrial, as fábricas procuraram equipar-se com máquinas capazes de realizar e reproduzir, automaticamente, determinadas tarefas. Atualmente, devido aos inúmeros recursos que os sistemas de microcomputadores oferecem, a robótica atravessa uma época de contínuo crescimento (MAIA, 2020).

Muitas indústrias procuram investir em automatização e modernização tecnológica visando competitividade e qualidade industrial, sempre buscando evitar grande defasagem técnica e obsolescência de seus equipamentos (GOMES, 2004). Conforme Oliveira (2004) as principais aplicações industriais dos robôs são: manipulação de materiais, carregamento de máquinas, tratamento de superfícies e vaporização (spray), usinagem, montagem, inspeção e controle de qualidade (posicionamento e medição) e soldagem.

Segundo Alba (2018) a robótica possibilita a redução de custos dos produtos fabricados, visto que diminui o número de pessoas envolvidas no processo, permite maior produtividade, redução de perdas e economia de energia devido à rapidez,

precisão, coordenação de movimentos complexos e controle racional dos parâmetros de produção. Ainda, permite a privação do contato direto do ser humano com atividades perigosas ou insalubres, resultando em melhoria das condições de trabalho.

2.1.1 O Robô

Robô é classificado como um dispositivo automático, que possui parcial ou total ação de controle humano, e é utilizado para a realização de tarefas, por meio de atuadores e sensores (FERREIRA; NETO, 2013).

Conforme Romano (2002) o robô é constituído, basicamente, por sistemas mecânicos compostos por elos, juntas e atuadores, os quais são utilizados para movimentação de ferramentas e peças, que, por meio de trajetórias definidas, podem ser reprogramados de acordo com as necessidades. Dentre suas aplicações destacam-se tarefas que exigem alta repetitividade, precisão e segurança para os seres humanos na sua utilização.

Os robôs industriais ou manipuladores são os mais comuns e de maior utilidade nas linhas de produção. Na Tabela 1 são elencados os conceitos abordados por diferentes organizações, os quais definem as características dos robôs industriais.

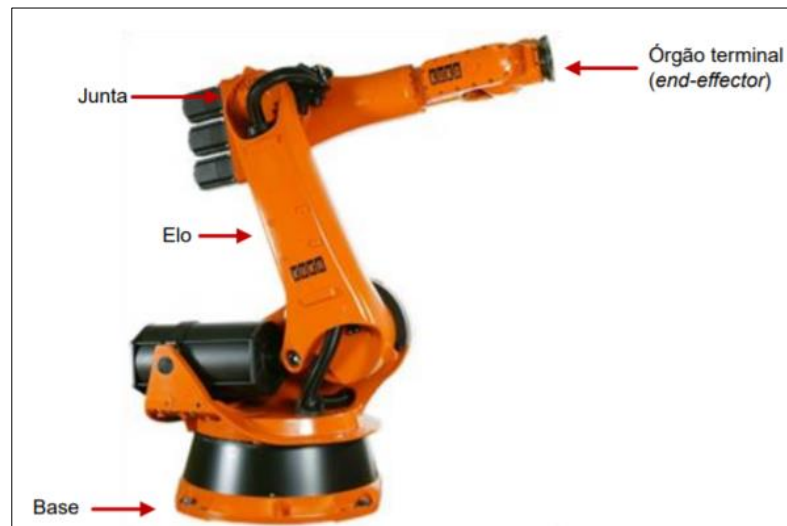
Tabela 1– Conceitos de um Robô Industrial abordado por diferentes organizações.

| Referências | Conceitos de um Robô Industrial |
|---------------|---|
| IFTtoMM, 2015 | É uma máquina reprogramável para realizar funções de manipulação, movimentação e usinagem, possibilitando interagir com o ambiente e dotada de certo grau de autonomia. |
| BARA, 2016 | Consiste em um dispositivo programável e projetado para manipular peças, ferramentas ou implementos especializados de manufatura, permitindo de movimentos programáveis utilizados para a execução de tarefas específicas de manufatura |
| RIA, 2016 | Tratam-se de um dispositivo multifuncional, reprogramável usado para realizar uma série de tarefas dedicadas à automação das atividades de um ambiente CIM (Manufatura Integrada por computador) |
| ISO, 2012 | É um manipulador multifuncional reprogramável com vários graus de liberdade, capaz de manipular materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais, seguindo trajetórias variáveis reprogramadas para realizar diversas tarefas. |

O robô industrial é constituído pela configuração física ilustrada na Figura 1, a qual engloba a base com uma cadeia serial de membros rígidos (elos) conectados por meio de articulações (juntas) e movimentados por ação de atuadores, sensores (encoders, tacômetros, LASER e câmeras) e sistemas de controle computadorizados (NETO, 2013).

O último elo possui o órgão terminal denominado de *Tool Center Point* (TCP), neste terminal são acoplados dispositivos (*end-effector*) para realização de tarefas (NETO, 2013). Diferentes modelos robóticos são projetados visando à execução de determinadas tarefas, visto que para atender diferentes especificações as características do robô podem ter grande variedade.

Figura 1 – Configuração física do robô industrial.



Fonte: Neto (2013).

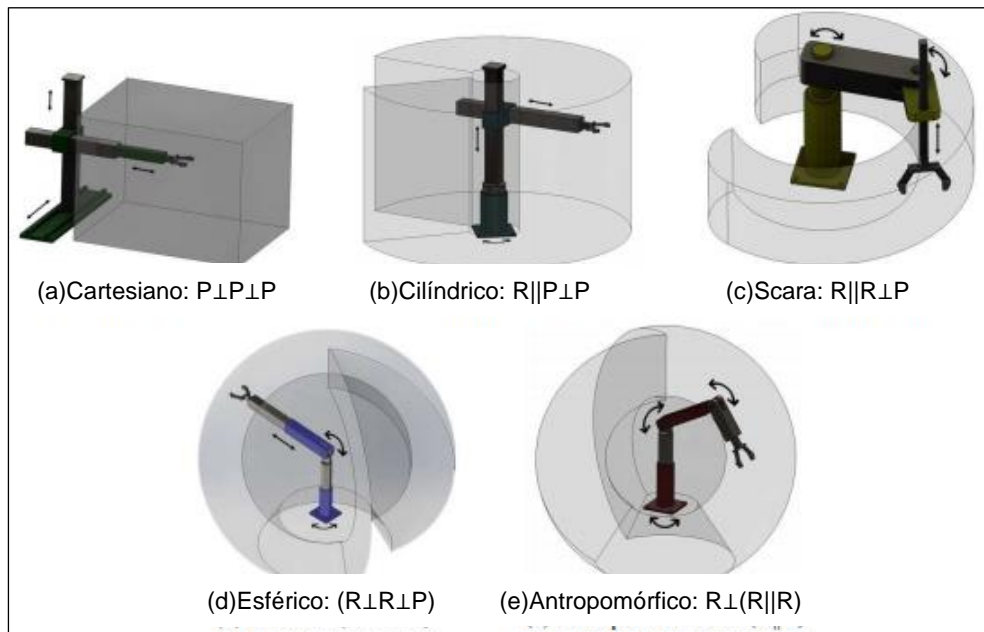
As principais características dos robôs industriais são: configuração física (partes do robô); graus de liberdade (GDL); espaço de trabalho; resolução; velocidade; precisão; exatidão; repetitividade; carga e tamanho; tipo de articulação e tipo de acionamento (elétrico, hidráulico ou pneumático) (NETO, 2013; ALBA, 2018).

Os robôs podem ser constituídos por juntas do tipo: prismática ou translação ou deslizante (P): que permite movimento linear entre dois elos; revolução ou rotativas (R): que permite movimentos de rotação entre dois elos; rola e encaixe: que permite movimentos em torno dos três eixos cartesianos (x, y, z) entre dois elos (NETO, 2013).

Conforme Rosario (2005) os robôs podem ser classificados em cinco classes

ou combinação dos tipos de juntas, as quais são: robô de coordenadas cartesianas (com três juntas tipo PPP); robô de coordenadas cilíndricas (RPP); robô de coordenadas polares ou esféricas (RRP); robô SCARA (sigla em inglês “*Selective Compliance Arm for Robotic Assembly*”) (RRP) e robô de coordenadas de revolução ou articulado (RRR), chamado de antropomórfico, conforme demonstrado na Figura 2.

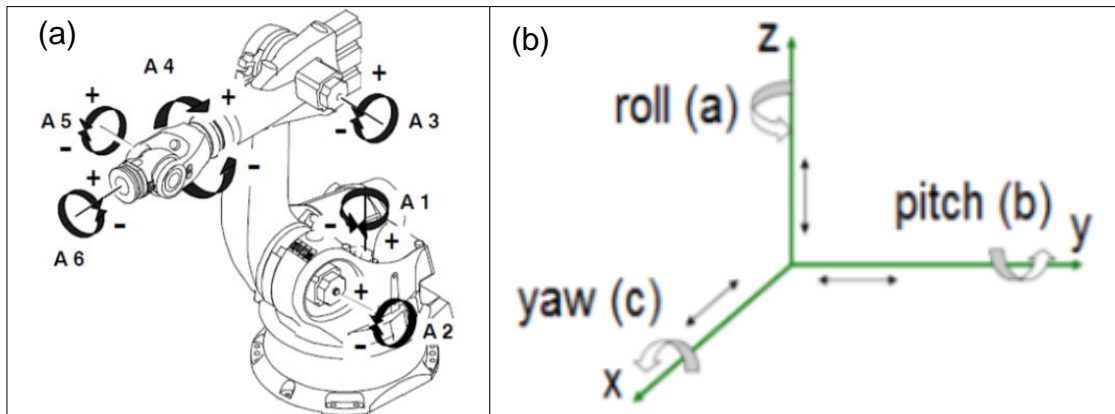
Figura 2 – Classificação dos robôs conforme os tipos de juntas.



Fonte: Santos (2017).

Além disso, são determinados os graus de liberdade que se referem ao número de movimentos individuais das articulações, permitindo identificar a versatilidade do robô e as tarefas que o mesmo pode executar. Na Figura 3a, é representado, como exemplo, as possibilidades de movimento de um robô industrial, tipo antropomórfico (NETO, 2013). No espaço tridimensional, geralmente, são necessários seis GLD: três para o posicionamento e outros três para a orientação.

Figura 3 – (a) Classificação dos robôs conforme os tipos de juntas e (b) ilustração do sistema de coordenadas ortogonal.



Fonte: Rosario (2005) e Neto (2013).

Conforme demonstrado na Figura 3, a trajetória do robô é definida por meio de um conjunto de ângulos/translações associados ao movimento angular/linear de cada grau de liberdade do robô, que após o algoritmo de interpolação, servirão como sinal de referência para o controlador de posição de cada junta robótica que realizará uma comparação com os sinais provenientes dos transdutores de posição das juntas (NETO, 2013; ALBA, 2018).

Conforme Neto (2013) o sistema de coordenadas ortogonal de um robô industrial é representado pelas informações da posição (translação) nos eixos x, y e z (x, y, z), e da orientação, rotação no eixo x, y e z (α, β, γ) pelos valores dos ângulos α (ou a) de rolamento (*roll*), β (ou b) de arfagem (*pitch*) e γ (ou c) de guinada (*yaw*) em torno de cada eixo, conforme demonstrado na Figura 3b. A posição e a orientação formam um par de informações que é denominado postura, ou frame.

As diversas aplicações industriais exigem que o robô trabalhe de acordo com a posição e orientação do seu elemento terminal em relação ao sistema de coordenadas de trabalho. O escopo desse trabalho refere-se à aplicação da robótica no processo de soldagem, diante disso nos próximos capítulos serão descritos os conceitos do processo de soldagem, e posteriormente, a modelagem e controle dos robôs aplicados ao processo de soldagem robotizada.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM

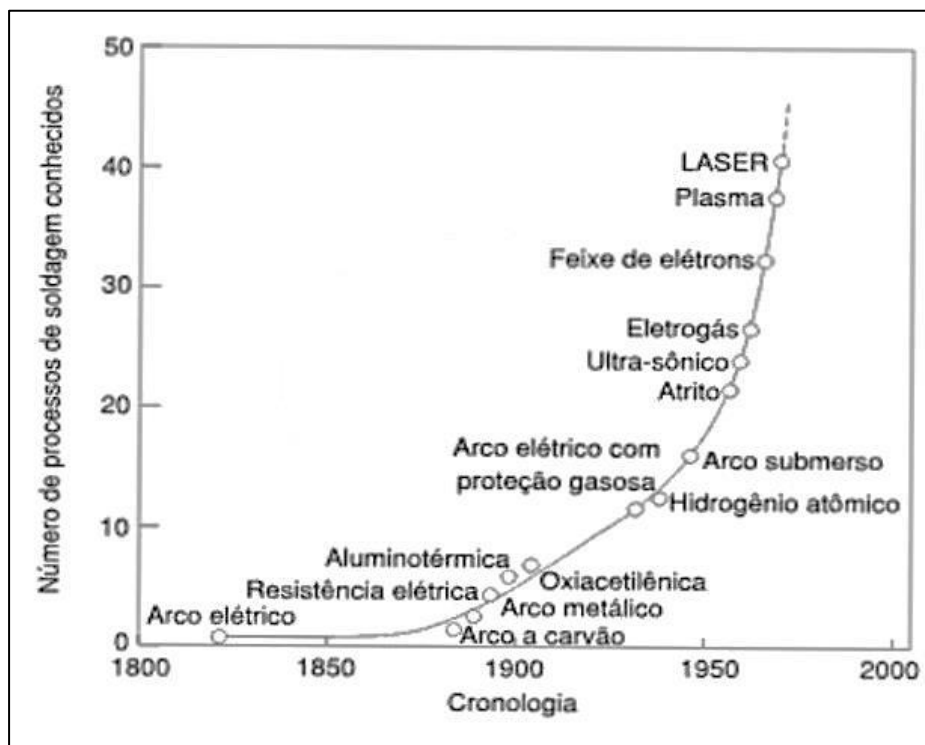
O processo de soldagem é amplamente utilizado na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas, com uma aplicação que está compreendida desde componentes eletrônicos na ordem de microns até grandes estruturas e equipamentos, como: pontes, navios, vasos de pressão e plataforma (MATTEI, 2011).

O processo de soldagem é definido, segundo a American Welding Society (AWS) como: o processo de união de materiais, usado para obter coalescência localizada de metais ou não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem utilização de pressão e/ou material de adição.

A operação de soldagem visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, a continuidade do material, bem como de suas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (MODENESI, MARQUES, 2006).

Conforme demonstrado pela Figura 4, a diversidade de processos de soldagem avançou no último século devido às novas tecnologias (MATTEI, 2011).

Figura 4 – Evolução dos processos de soldagem.



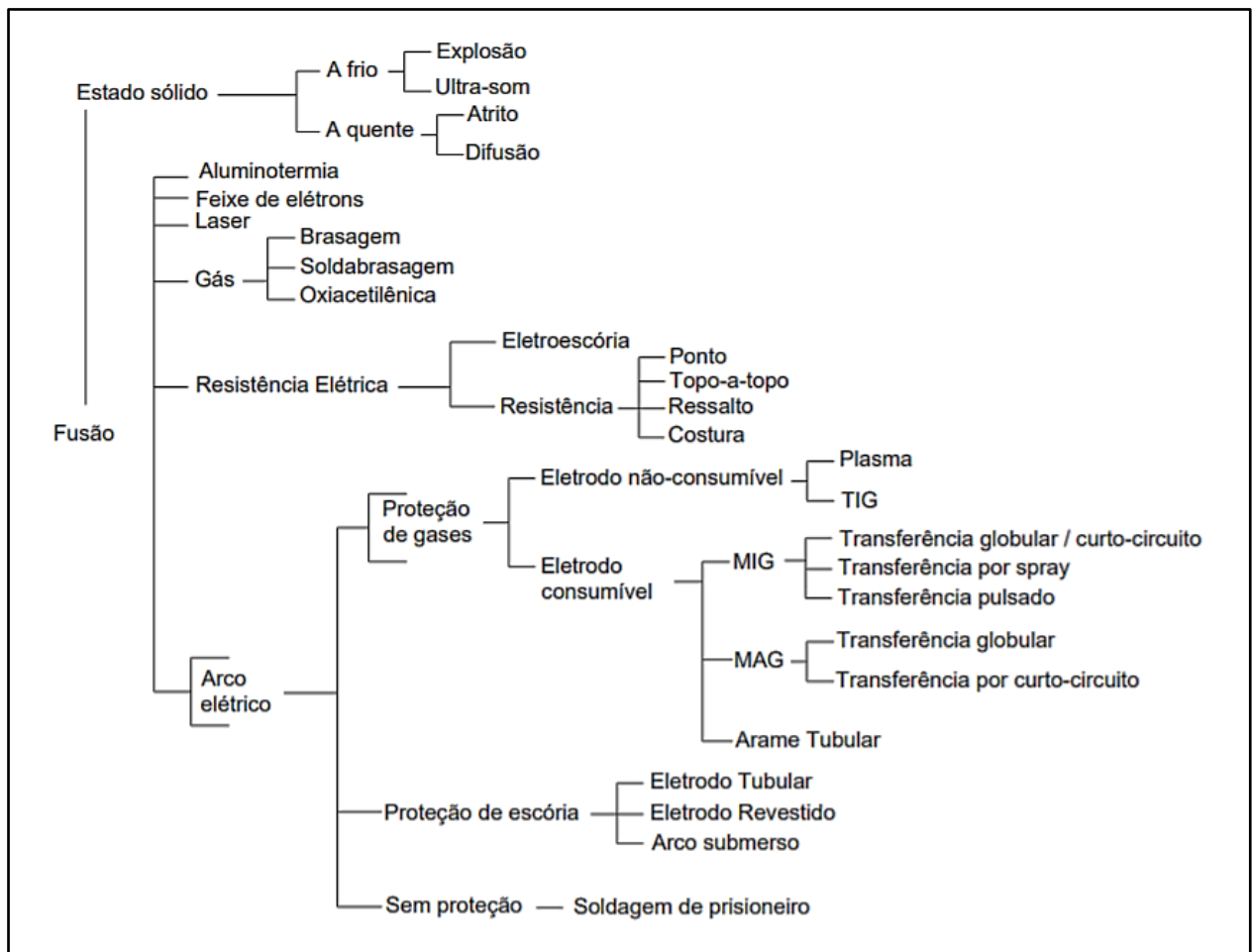
Fonte: Mattei (2011).

As características e fundamentos do processo de soldagem baseiam-se na

natureza de união e do tipo de fonte de energia. Diante disso, este processo pode ser dividido em três grupos: (a) soldagem em estado sólido; (b) soldagem sem fusão do metal de base; (c) soldagem por fusão do metal de base utilizado (EDGAR, 1993).

Os processos de soldagem podem ser classificados de acordo com a natureza da união, conforme esquematizado na Figura 5.

Figura 5 – Classificação dos processos de soldagem.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992).

Cada processo de soldagem tem suas vantagens e limitações e o adequado balanço dessas características irá determinar suas aplicações típicas. Na próxima sessão será descrito o processo de soldagem por fusão o qual refere-se ao escopo desse trabalho.

2.2.1 Soldagem por Fusão

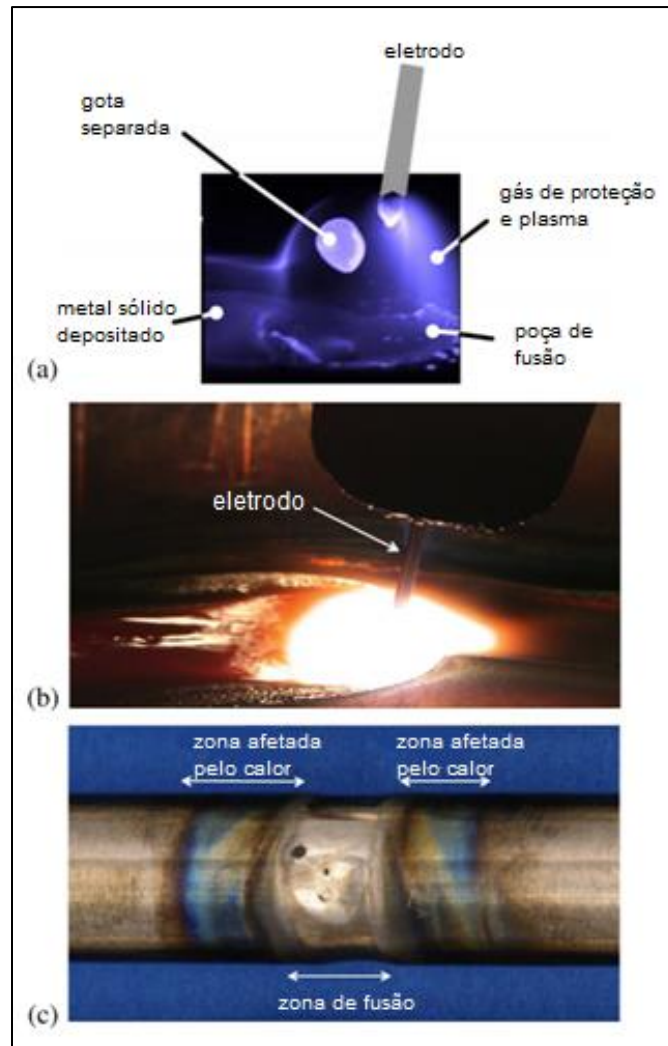
A soldagem por fusão é aplicada nas indústrias metal-mecânicas na fabricação de estruturas de engenharias, fazendo da soldagem o principal método de união de junta metálicas. Esta soldagem é caracterizada por um potente ciclo térmico capaz de realizar a fusão do metal de base e geralmente, de um metal de adição, para que assim, a solidificação do metal de solda fundido produza a união dos materiais (GUILHERME, 2011).

Conforme demonstrado na Figura 6, geralmente é envolvido a deposição de uma pequena quantidade de aço fundido entre os componentes a serem unidos ou revestidos (Figura 6a e 6b). Quando o aço se solidifica, ele solda os componentes. A metalurgia da junta soldada pode ser categorizada em duas regiões principais, a zona de fusão e a zona afetada pelo calor, Figura 6c. A zona de fusão representa ambos, o metal depositado e as partes do componente de aço que derreteram durante o processo, e é uma microestrutura de solidificação. A zona afetada pelo calor, por outro lado, representa as regiões nas proximidades da solda, onde a entrada de calor durante a soldagem altera a microestrutura sem fundir o aço (HONEYCOMBE, 2017).

Conforme mostrado anteriormente na Figura 5, existe diferentes processos de soldagem por fusão, no entanto, o arco elétrico é a fonte mais comum de calor. Este tipo de soldagem é definido como a descarga elétrica mantida por meio de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (cátodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido.

Na soldagem por fusão com arco elétrico há grande destaque para o processo soldagem por arco metálico com gás de proteção (GMAW - Gas-Shielded Metal Arc Welding), o qual também é chamado de soldagem *MIG* (Metal Inert Gas) ou *MAG* (Metal Active Gas). O processo MIG/MAG é um processo semiautomático de soldagem e tem apresentado um contínuo desenvolvimento e flexibilidade, sendo o processo de soldagem adequada à automatização (MOREIRA *et al.*, 2006). Suas características serão descritas na subseção a seguir.

Figura 6 – Representação do processo de soldagem a arco, (a) ilustração do arco elétrico, (b) fotografia do arco elétrico e (c) zonas pós-soldagem.

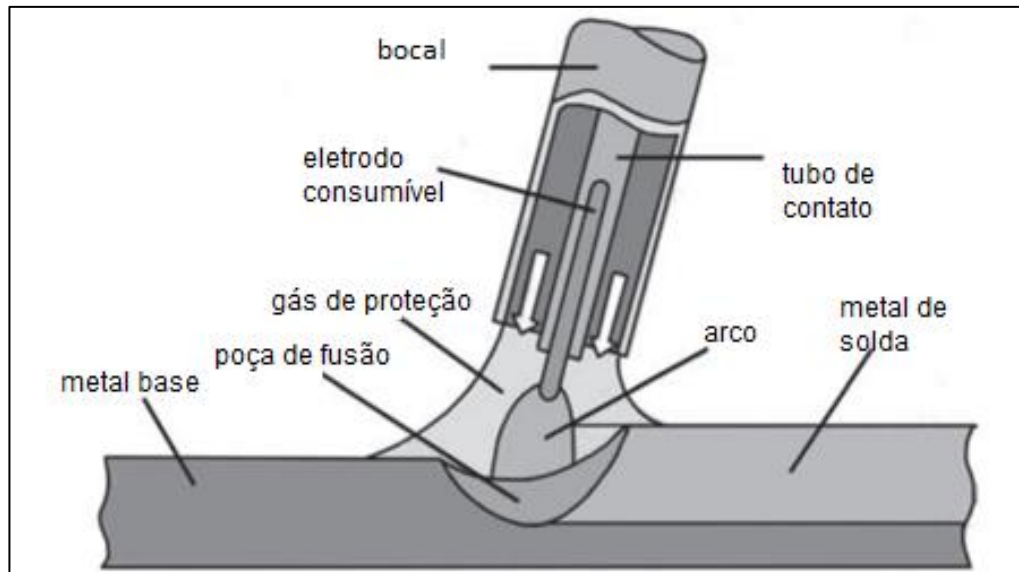


Fonte: Honeycombe (2017).

2.2.1.1 Solda MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG emprega um fio sólido consumível contínuo como eletrodo e metal de adição, com um gás inerte ou ativo para proteger o arco e a poça de fusão, como demonstrado na Figura 7 (LATHABAI, 2011). Argônio e hélio são exemplos de gases inertes e o dióxido de carbono é um exemplo de gás ativo, os quais possuem como principal função proteger a poça de fusão dos gases atmosféricos evitando a oxidação em altas temperaturas (BAUMGARTNER FILHO, 2017).

Figura 7 – Ilustração esquemática da solda MIG/MAG.



Fonte: Mathers (2002).

O sistema de soldagem demonstrado na Figura 8 é composto por uma fonte de soldagem, bobina do arame, sistema de alimentação do arame e o gás de proteção todos estes conectados à tocha de soldagem.

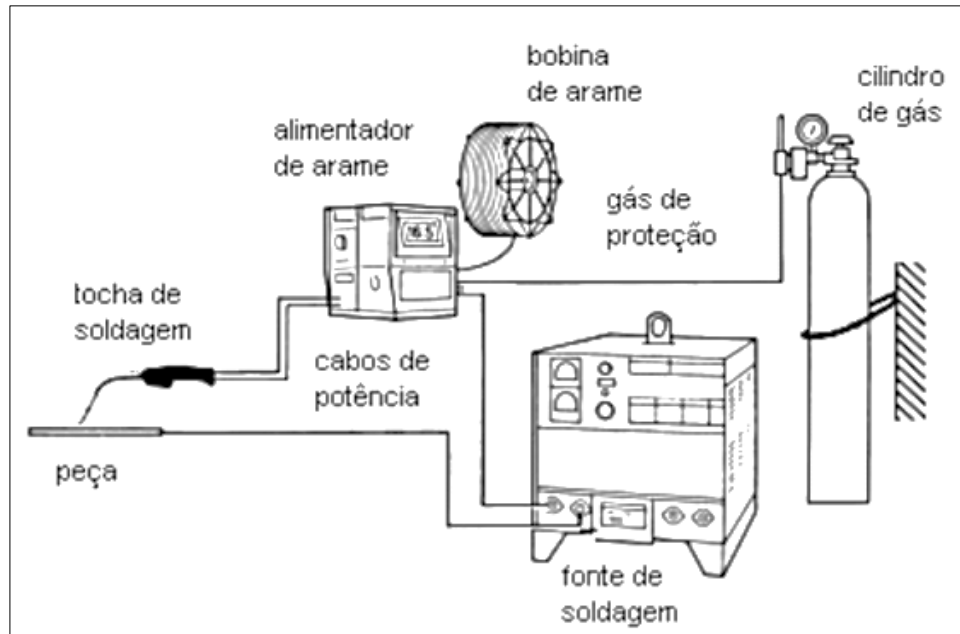
O referido processo de soldagem ocorre por meio do sistema de alimentação do arame energizado pela da fonte de energia, que pode ser do tipo tensão constante ou corrente constante. A fonte de soldagem de tensão constante possui pequenas variações da tensão final para grandes variações na corrente de soldagem, esta é usualmente utilizada em processos automáticos e semiautomáticos (BAUMGARTNER FILHO, 2017). No entanto, conforme exposto por Gonzalez (1997) em processos manuais aconselha-se a utilização da fonte tipo corrente constante, na qual para pequenas variações de correntes ocorrem altas alterações na tensão de soldagem.

A energia gerada no arco elétrico é transformada em energia térmica acarretando na fusão do arame-eletrodo energizado, este forma gotas metálicas que são transferidos à poça de fusão e geram a constituição do cordão de solda (CIRINO, 2009).

No processo de soldagem MIG/MAG a transferência metálica é uma importante variável do processo, determinada em função da corrente de soldagem, do diâmetro e composição do eletrodo nu e da composição do gás de proteção. Essa pode ser dividida em quatro formatos diferentes: globular, curto-circuito, *spray*

e pulsado (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Segundo AWS (1991) os modos de transferência metálica no processo de soldagem MIG/MAG estão relacionados aos seguintes cinco parâmetros do processo: a) Tipo de corrente e intensidade de corrente de soldagem; b) Diâmetro do eletrodo; c) Composição química do eletrodo; d) Extensão do eletrodo; e) Gás de proteção (fluxo e tipo).

Figura 8 – Equipamentos do processo MIG/MAG.



Fonte: Baumgaertner Filho (2017).

Normalmente no processo MIG/MAG utiliza-se a corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP). No entanto, existem variações deste tipo de corrente, atualmente, tais como: contínua ou alternada e constante ou pulsada (BAUMGARTNER FILHO, 2017).

Destacam-se como vantagens da soldagem MIG/MAG a alta produtividade, boa qualidade do cordão de solda, fácil utilização quando comparada a outros processos de soldagem, custo admissível, possibilidade de ser mecanizada ou automatizada; ausência de operações de remoção de escória; maior facilidade de uso; grande versatilidade de materiais; espessuras aplicáveis, podendo ser aplicada em juntas de simples geometrias até em geometrias complexas com grande responsabilidade estrutural como soldas submersas e chassis de motocicletas e bicicletas (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007; MIRANDA; FERRARESI, 2003; BAUMGARTNER FILHO, 2017).

Como desvantagem desse processo pode se citar a sensibilidade à variação

dos parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem, a necessidade de ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda; o maior custo dos equipamentos em comparação ao processo de eletrodo revestido; e menor variedade de consumíveis (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2007).

Para atendimento das demandas do mercado, devido às exigências atribuídas pelas indústrias em relação ao aumento de capacidade produtiva e melhoria na qualidade dos processos, os processos de soldagem vem sendo robotizados.

2.3 SOLDAGEM ROBOTIZADA

A automação do processo de soldagem refere-se à utilização tanto ao processo de construção física quanto ao processamento da informação (ROUT; DEEPAK; BISWAL, 2019).

A soldagem robótica é essencial em ambientes de trabalho perigosos e insalubres, onde o alcance do ser humano não é possível, tais como: construção naval e usinas de energia nuclear. Além disso, as estruturas de soldagem robótica trazem circunstâncias favoráveis, por exemplo: aumentam a eficiência, a qualidade da soldagem, a adaptabilidade e o uso do espaço de trabalho. Além disso, permitem a integração à sistemas de planejamento de trajetória, capacidade de reprodução, precisão, repetibilidade, entre outros (NAYAK; RAY, 1993; LEAL, 2005).

As operações de soldagem que podem ser realizadas por um robô industrial são classificadas em duas categorias: (i) soldagem por pontos e (ii) soldagem a arco.

Na soldagem por pontos, o robô é primeiro ensinado a uma sequência de locais distintos que são armazenados na memória desse. O robô posiciona sequencialmente a pistola de soldagem por pontos nesses locais durante o ciclo de produção real. Devido à irregularidade das peças a serem soldadas, o (tridimensional) punho é frequentemente necessário para o posicionamento hábil da pistola de soldagem por pontos. O uso de ferramentas pesadas de soldagem e o longo alcance exigido pelo robô manipulador implicam que os servos motores para movimentos articulares devem ser suficientemente fortes a fim de evitar vibrações. No entanto, uma vez que as atividades do robô são pré-ensaiadas, nenhum sensor de informações é necessário para o controle de *feedback* (NAYAK; RAY, 1993).

A soldagem a arco, por outro lado, pode exigir o movimento da tocha ao longo de costuras irregulares ou enchimento de juntas largas. Um robô controlado por servo de caminho contínuo é frequentemente projetado para um tipo específico de aplicação de soldagem (NAYAK; RAY, 1993).

Além das duas categorias acima citadas, atualmente também foi desenvolvido um sistema de solda a LASER, onde a potência da luz LASER permite a fusão e união de dois materiais. No entanto, sua aplicação é limitada para soldagem de chapas metálicas de baixa espessura.

Para soldagem robótica ao longo de caminhos pré-programados, é necessário que as peças a serem soldadas sejam posicionadas com precisão e corretamente mantidas no lugar, a fim de ensinar caminhos tridimensionais complexos. Além disso, durante a soldagem, as peças devem ser apresentadas ao soldador robótico precisamente na mesma posição e orientação. Se essas condições estritas de posicionamento de peça e programação de caminho puderem ser atendidas, não será necessário detectar a posição (NAYAK; RAY, 1993).

Sistemas de soldagem robótica, no entanto, não se adaptam às mudanças em tempo real na geometria da junta e, portanto, têm sucesso limitado em muitas aplicações de soldagem. A distorção térmica do intenso calor do arco de soldagem pode causar essas alterações na geometria da junta. Tais variações também são causadas por erros de correção ou preparação inadequada das juntas de solda. Portanto, para produzir soldas de alta qualidade por meio da mecanização, tolerâncias estritas são necessárias, tanto na preparação da junta quanto na fixação das peças soldadas (NAYAK; RAY, 1993).

Uma solução para este problema requer a detecção da geometria da junta para posicionar corretamente a tocha de soldagem ao longo da costura em tempo real. As técnicas de detecção de juntas têm sido baseadas em sensores mecânicos, elétricos, magnéticos e ópticos, com cada método tendo vantagens e desvantagens específicas em uma determinada situação de produção (GULLCO, 2012; GAN; TANG, 2011). No entanto, as duas técnicas comumente usadas são sensoramento por meio do arco (que utiliza a variação de tensão e corrente no arco de solda para guiar a tocha) e sensoramento visual.

A utilização de sistemas de visão e sensores integrados a manipuladores robóticos com a finalidade de aumentar a robustez dos processos de fabricação são abordagens viáveis, tornando-os adaptáveis a condições de contorno previamente

definidas, conforme será descrito no capítulo a seguir.

2.3.1 Soldagem Robotizada Adaptativa

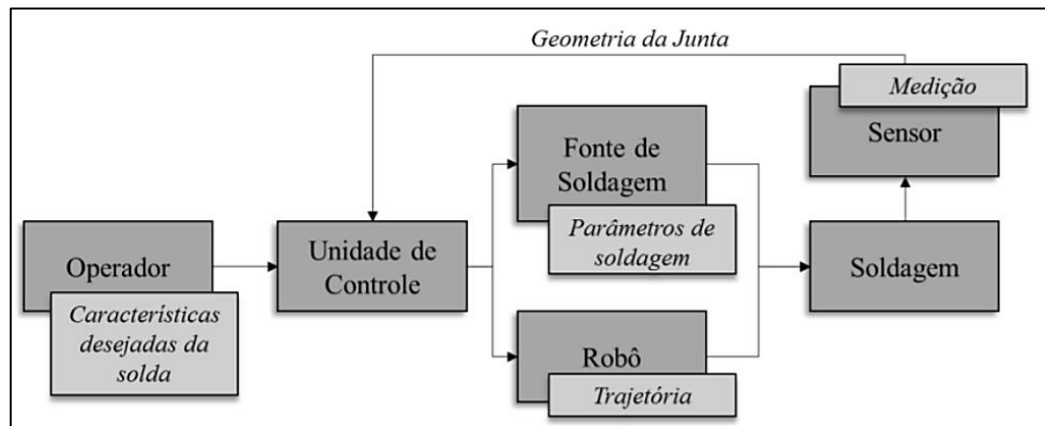
O termo soldagem adaptativa é descrito como uma correção dos parâmetros de soldagem (tensão, velocidade de arame, velocidade de soldagem, etc.) em tempo real ou pré-processo de soldagem (KINDERMANN, 2016).

Na soldagem adaptativa tem-se a integração entre o manipulador, fonte de soldagem e sistema de monitoramento da junta por meio de uma unidade de controle e tratamento dos sinais. Este sistema busca substituir não só a mão do soldador guiando a tocha, como também sua percepção do ambiente de soldagem e capacidade de reação, emulando seus sentidos e expertises, com a finalidade de aumentar a produtividade e a repetibilidade das juntas soldadas (GALLEAZI, 2019).

Embora sistemas de soldagem adaptativa possam ser representados pela capacidade do sistema de rastrear em tempo real uma emenda ao longo de caminhos de solda não pré-programados, esses também oferecem recursos à detecção *offline* de erros de fixação antes do início da soldagem (localização de peças) e ajuste dos parâmetros do processo de soldagem com base nas dimensões da peça. Dessa forma um modelo da costura é assumido e seus parâmetros são calculados de forma adaptativa. O modelo geométrico da costura é gerado a partir das coordenadas dos pontos característicos da costura identificados na imagem de alcance (NAYAK; RAY, 1993).

Na Figura 9 é demonstrada uma representação esquemática do controle adaptativo de soldagem.

Figura 9 – Representação esquemática do controle adaptativo.



Fonte: Galleazi (2019).

A operação de um sistema de soldagem robótica adaptável dentro do ambiente não estruturado de uma costura 3D geral envolve, (1) controlar a interação tocha-costura para alcançar as qualidades de solda desejadas e (2) controlar a posição e orientação da tocha, bem como a rotação do sensor de alcance à frente para rastrear a costura. Essas funções são gerenciadas pelo controlador principal e pelo controlador de baixo nível, respectivamente. As entradas para esses controladores são derivadas da análise das imagens de alcance. Especificamente, o estágio de processamento de imagem de alcance extrai os recursos de junta e produz suas coordenadas no espaço do mundo, que é então usado na geração do modelo de ambiente e no modelo de geometria de emenda (NAYAK; RAY, 1993).

Conforme Sampaio (2010), na última década os sistemas de monitoramento e controle baseados em grandezas mensuráveis do processo de soldagem tornaram-se os principais objetos de pesquisa e desenvolvimento. Aliado a essa tendência, os esforços se concentraram na adaptação automática dos parâmetros de soldagem conforme as leituras de monitoramento são realizadas (DA CRUZ, 2019).

O controle de rastreamento de uma costura desconhecida é considerado bem desenvolvido, no entanto para aprimorar seu desempenho, principalmente no que diz respeito a costuras complexas pode-se (i) aumentar o número de graus de liberdade do sistema, e (ii) introduzir um planejador de soldagem *on-line* (NAYAK; RAY, 1993).

A estrutura hierárquica do *software* de controle de sistema é demonstrada na Figura 10. Conforme demonstrado este é responsável por várias tarefas, incluindo, (i) inicialização do sistema (ii) operação do sensor de alcance (iii) invocação do

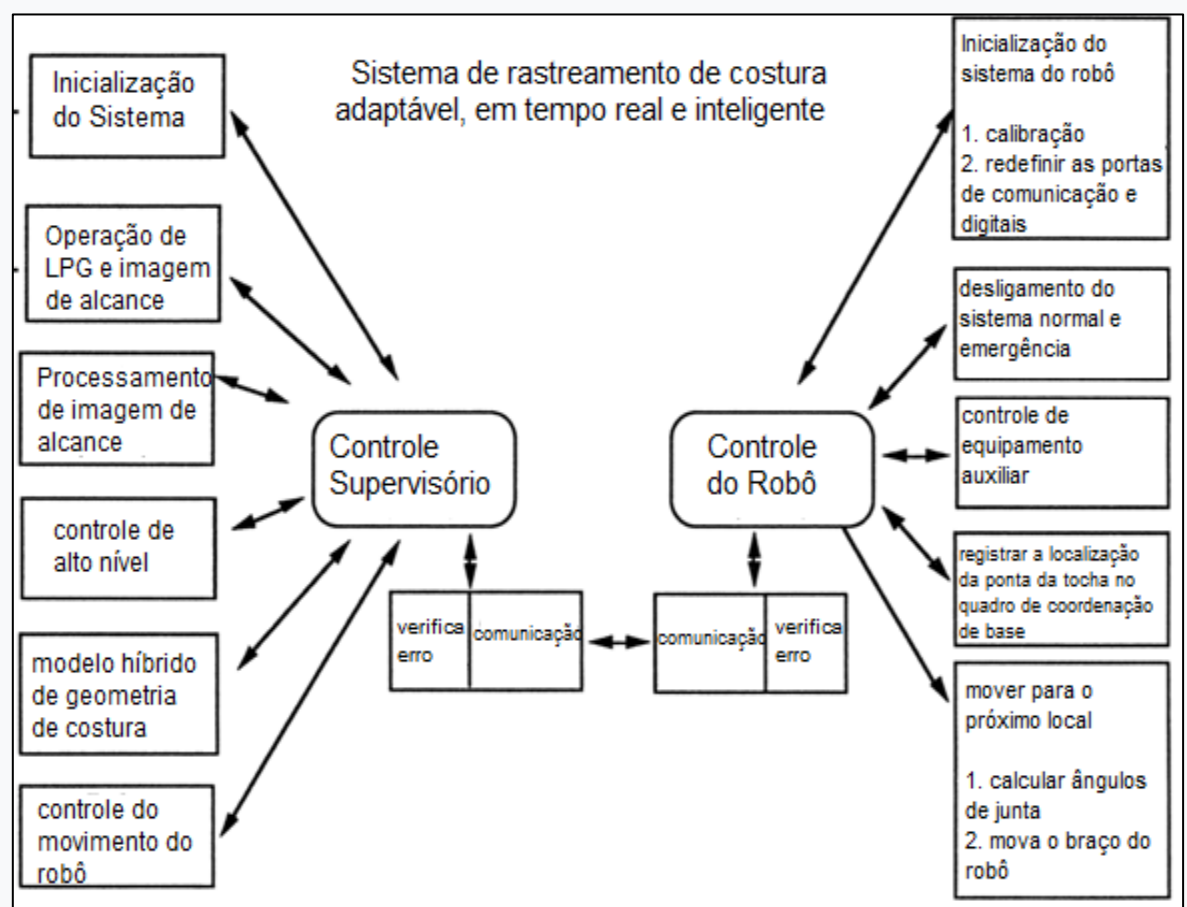
módulo de processamento de imagem de alcance para reconhecimento de costura, (iv) controle de trajetória do robô final e (v) comunicação com o módulo de controle do robô (NAYAK; RAY, 1993).

O *software* controla os parâmetros operacionais do sensor de alcance que incluem: (i) tempo de exposição da matriz dos dispositivos de carga acoplada (sigla em inglês “CCD”- *charge-coupled devices*), (ii) posição do feixe na varredura e (iii) níveis de limiar para o pré-processamento do sinal dos CCD. Os dados de faixa bruta (ppv) assim adquiridos são pré-processados no Processador de Imagem de Alcance (sigla em inglês “RPM”- *range image processor*) convertendo-os na distância na imagem de alcance (NAYAK; RAY, 1993).

As operações de rastreamento de costura são processadas por três módulos principais - Módulo de Controle Supervisório (sigla em inglês “SCM”- *Supervisory Controller*), Módulo de Controle do Robô (sigla em inglês “RCM”- *Robot Controller*) e Módulo de Processamento de Imagem de Alcance (RPM). Enquanto o SCM e o RPM são hospedados em um microcomputador, o RCM reside no robô. A operação do sistema de rastreamento de costura, com seu *software* estruturado modularmente, envolve a interação entre esses módulos individuais (NAYAK; RAY, 1993).

Os parâmetros do processo de soldagem, como tensão do arco, taxa de alimentação do arame, velocidade de deslocamento da tocha e posição da tocha em relação à costura, são ajustados em tempo real com base na visualização das características da junta de solda e dimensões da seção transversal à frente do arco de soldagem. O controle adequado do processo de soldagem requer a compreensão da importância das variações das características da junta de solda e das dimensões da seção transversal no processo de soldagem e dividi-los em subintervalos. Este conhecimento pode ser armazenado na tabela de adaptação de soldagem e usado para pesquisar combinações de parâmetros de processo de soldagem apropriados para cada combinação possível de medidas transversais (NAYAK; RAY, 1993).

Figura 10 – Visão geral da estrutura do *software* de controle do rastreador de costura.



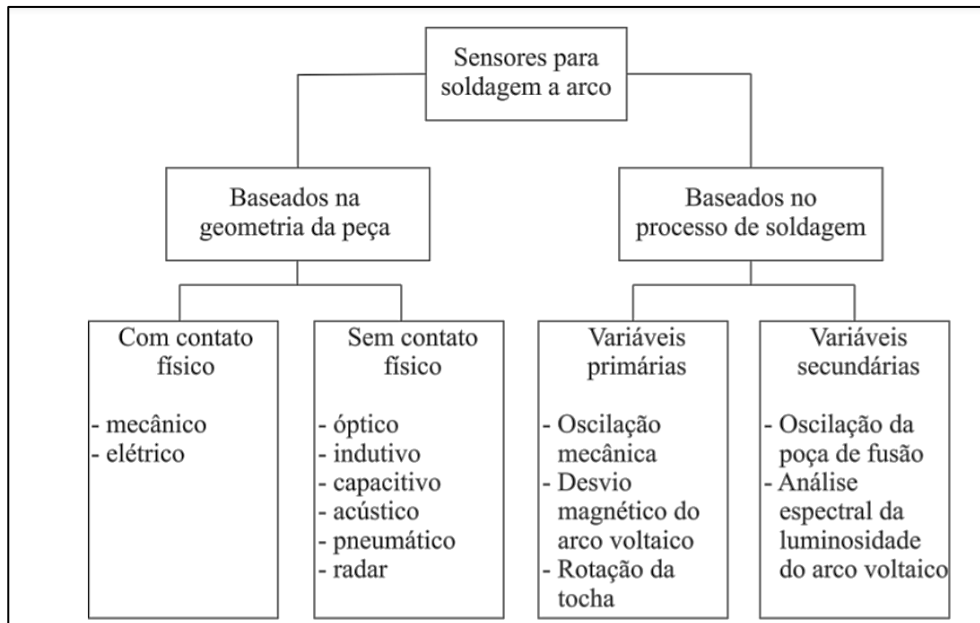
Fonte: Nayak, Ray (1993).

Diante disso, a utilização de sensores é vital para detecção do ponto de soldagem, a correta posição da tocha em relação à junta e a automática correção de sua trajetória durante a soldagem. Alguns dos diversos tipos de sensores aplicáveis no processo de soldagem a arco serão descritos na subseção a seguir.

2.4 SENSORIAMENTO APLICADO AO PROCESSO DE SOLDAGEM A ARCO

A Figura 11 demonstra uma proposta de classificação de sensores para soldagem a arco, segundo a norma alemã DVS 0927 (2005), de acordo com a qual os mesmos são divididos com relação à estratégia de observação (geometria ou processo) em que o sinal é adquirido.

Figura 11 – Classificação dos sensores para soldagem a arco.



Fonte: DVS 0927 (2005).

Os sensores baseados no processo de soldagem detectam o sinal a partir de variáveis primárias (corrente e/ou tensão de solda) ou secundárias (luminosidade, oscilação da poça, etc.). Diante disso, esses não necessitam de um equipamento específico de medição, uma vez que a informação é obtida diretamente do próprio processo de soldagem (KINDERMANN, 2016). Uma vantagem dos referidos sensores é a ausência de *offset* de medição, uma vez que a região de medição é a mesma que a região da solda.

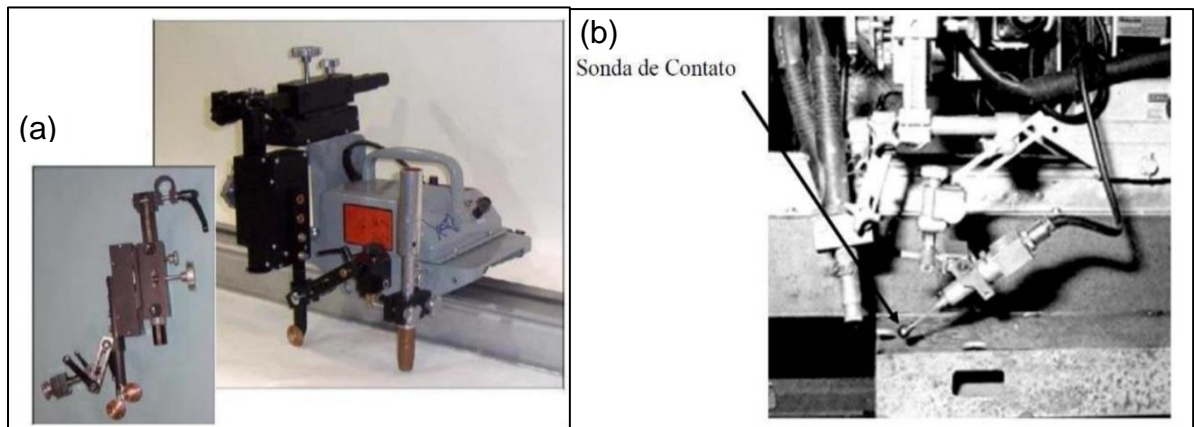
O sensor a arco utiliza a leitura da variação da corrente durante uma oscilação mecânica da tocha de soldagem no interior da junta (também conhecido como tecimento). No entanto, ele é empregado somente para seguimento de junta (KINDERMANN, 2016).

Os sensores baseados na geometria, por sua vez, necessitam de um equipamento adicional para medição, uma vez que adquirem seu sinal a partir da geometria da junta ou de um canto ou região da própria peça (KINDERMANN, 2016).

Os sensores por geometria podem ser classificados por: com contato físico ou sem contato físico. Os com contatos físicos são considerados ultrapassados, e abrangem tipos de sensores que vão desde sistemas mecânicos simples (tais como: o sistema roda-mola, no qual a roda metálica é posta em contato com a superfície a

ser seguida) (Figura 12a) até sistemas eletromecânicos complexos. Um caso de um sistema eletromecânico é a utilização de uma sonda de contato. A sonda metálica entra em contato com uma junta em formato de “V” ou de “T” e a partir desse contato são criados sinais elétricos para um sistema de controle (Figura 12b) (MENDONÇA, 2013).

Figura 12 – (a) Sistema automatizado de soldagem com sensor de contato do tipo roda mola e (b) sonda de contato.



Fonte: Gullco (2012) e Costa (2003).

Entre as desvantagens dos sensores com contato, está a distância de *offset*, tendo em vista que a tocha de soldagem fica afastada do sensor, a diminuição de acesso à tocha devido ao acoplamento de dispositivos adicionais e o desgaste do sensor (MENDONÇA, 2013).

Quanto aos sensores sem contato físico, os sistemas que utilizam princípios ópticos se destacam por rapidez de medição, relativa portabilidade e disponibilidade de informações para controle adaptativo. Esses dividem-se em sensores óticos passivos e ativos (KINDERMANN, 2016) e são empregados tanto para processo TIG (XU *et al.*, 2012) como para o processo MIG/MAG (YE *et al.*, 2013) onde a região de interesse pode ser o arco voltaico e a poça de fusão e/ou a junta a ser soldada (KUO; WU, 2002; XU *et al.*, 2012).

Os sensores passivos utilizam uma câmera (CCD ou CMOS) para analisar diretamente a região de interesse, os ativos, por outro lado, realizam uma observação indireta da região de interesse por meio de uma luz estruturada que é projetado em um objeto e a forma do objeto é determinada medindo a deformação do padrão refletido (GAN; TANG, 2011). A vantagem do ativo frente ao passivo se deve ao fato de que nos passivos a própria luz do arco voltaico e instabilidades no

processo de soldagem interferem na análise da imagem, com a observação indireta da luz nos ativos, o sensor óptico torna-se sensível à luz do arco e pode fornecer dados densos e altamente precisos (GAN; TANG, 2011; KINDERMANN, 2016).

Os sensores a LASER vêm se destacando por sua robustez, por ser menos sensível ao seu ambiente de trabalho (luz e ruído) quando comparado a outros sensores e pelo rápido crescimento de suas aplicações (GAN; TANG, 2011). Além disso, serão os sensores utilizados nesse trabalho e por esse motivo suas características serão aprofundadas a seguir.

2.4.1 Sensores a LASER

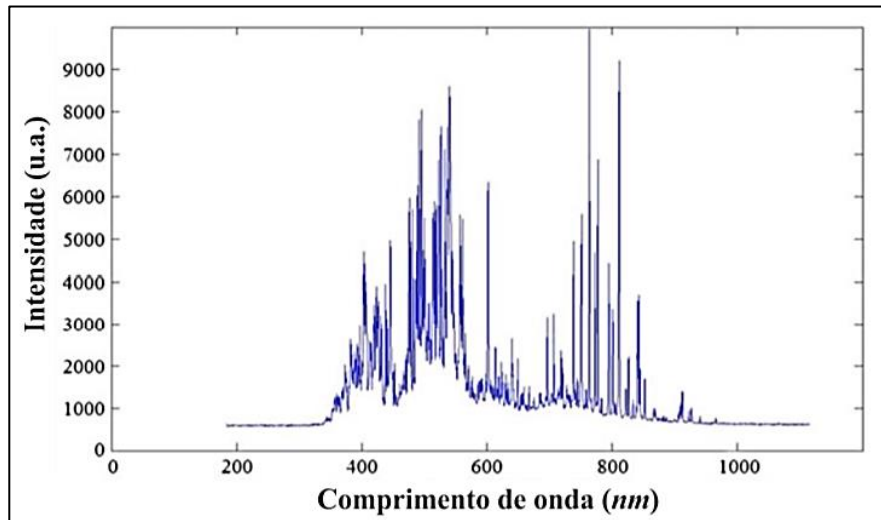
Os sensores de luz estruturada a LASER têm sido amplamente utilizados em robôs industriais para várias aplicações, como: programação on-line, medição e controle de qualidade de peças, identificação e localização de peças, etc (GAN; TANG, 2011).

Um sistema básico de visão de luz estruturada consiste em uma ou várias câmeras e um projetor que emite padrões óticos. O projetor pode emitir padrões de luz branca e de LASER. Com os padrões de LASER, o sistema é chamado de sensor de luz estruturado a LASER, o que é chamado para simplificar de sensor a LASER (GAN; TANG, 2011).

A cor da luz LASER utilizada nos sensores para soldagem é geralmente a vermelha, devido à baixa intensidade deste comprimento de onda (de 625 a 740 nm) no espectro do arco voltaico (Figura 13), o que facilita a visualização do feixe de LASER com menores interferências da luz do arco (KINDERMANN, 2016).

Os diodos LASER podem ser operados em dois modos: modo contínuo e modo modulado ou pulsado (GAN; TANG, 2011).

Figura 13 – Espectro de luz durante a soldagem a arco (u.a.= unidade arbitrária).

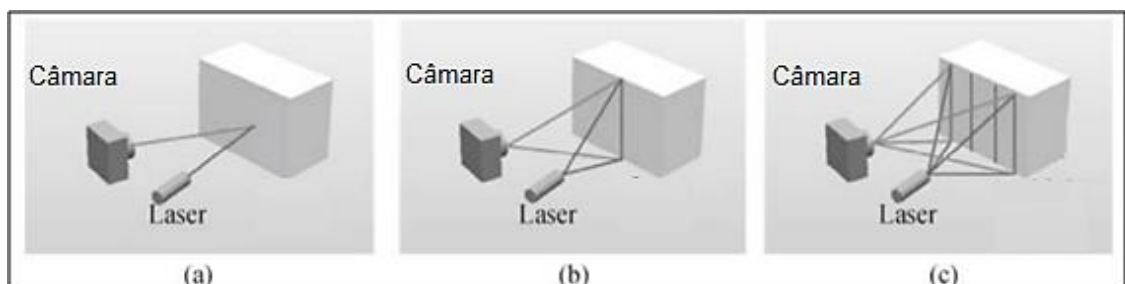


Fonte: Ye *et al.* (2013).

Conforme demonstrado na Figura 14, o sistema pode projetar por meio de lentes cilíndricas ou de holograma: um ponto de LASER, uma única faixa de LASER ou múltiplas faixas de LASER. Outros padrões como: um círculo ou vários círculos concêntricos e uma grade também são utilizados (GAN; TANG, 2011).

Na configuração de um sensor de ponto de LASER, a posição do ponto de LASER, a qual é o ponto de intersecção do feixe de LASER e o objeto sob medição, pode ser facilmente identificada e medida com alta precisão. No entanto, apenas um ponto pode ser medido de cada vez. A principal dificuldade envolvida nos sistemas de luz estruturada a LASER com múltiplas faixas ou padrões complicados é a ambiguidade na identificação de faixas de luz em regiões onde ocorrem descontinuidades de profundidade (GAN; TANG, 2011).

Figura 14 – Configuração do sensor LASER com padrão de projeção de ponto de LASER (a), uma única faixa de LASER (b) e múltiplas faixas de LASER (c).

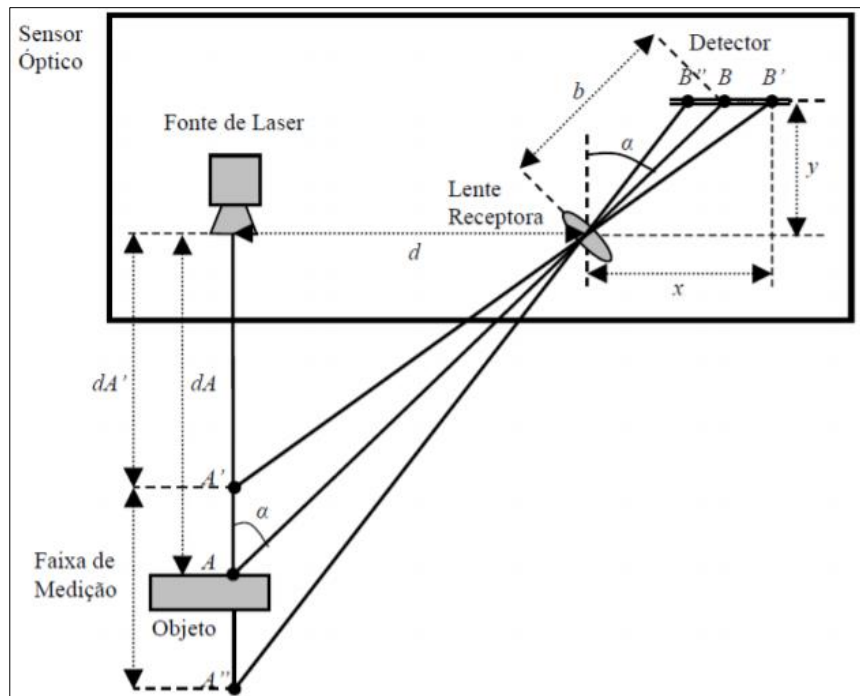


Fonte: Gan e Tang (2011).

A maioria dos sensores ópticos pontuais utiliza o princípio da triangulação

óptica ativa. Conforme demonstrado na Figura 15, neste método, um ponto LASER é projetado sobre a superfície com um determinado ângulo de incidência (α). Um elemento receptor, normalmente um sensor CMOS ou CCD, recebe a informação de luz do ponto projetado. Com alterações da distância registram-se diferentes posições no detector (KINDERMANN, 2016).

Figura 15 – Técnica da triangulação óptica com um feixe LASER.



Fonte: Bonacorso (2004).

Por meio da equação 1 é possível determinar a posição da superfície medida em relação ao sistema (BONACORSO, 2004).

$$dA' = \frac{(b \cdot d \cdot \cos\alpha)}{(\overline{BB'} + b \cdot \sin\alpha)} \quad (1)$$

onde:

dA' : distância do objeto à fonte LASER;

b : distância entre a lente e a imagem;

d : distância entre o emissor LASER e a lente;

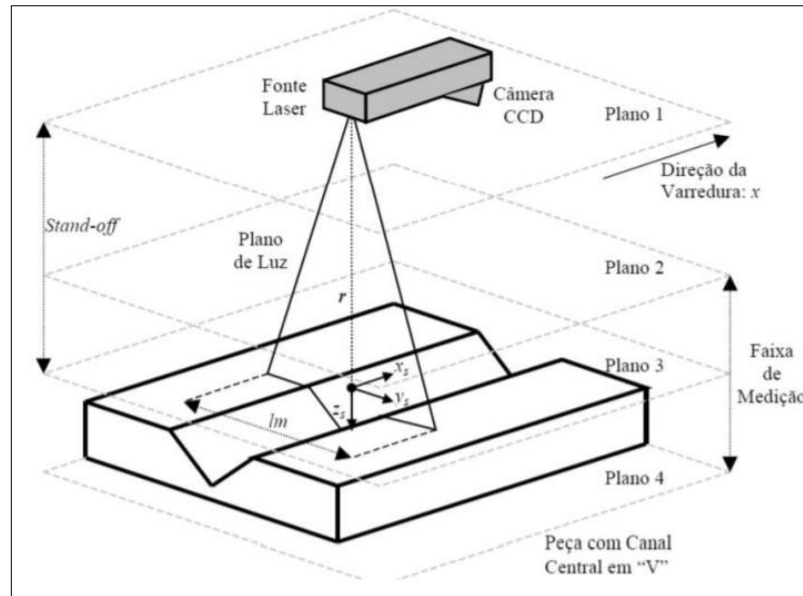
$\overline{BB'}$: deslocamento do ponto visualizado na câmera;

α : ângulo de triangulação.

Uma variação desse método de triangulação pode ser utilizada para medir a

forma geométrica de uma junta de solda. Para tanto, uma lente adicional posicionada a frente do emissor LASER expande o ponto LASER para uma fina linha e projeta esta na peça a ser mensurada. Esse princípio está ilustrado na Figura 16 e é também chamado de “folha de luz”.

Figura 16 – Ilustração do funcionamento de um sensor óptico tipo “folha de luz” e seus parâmetros característicos.



Fonte: Bonacorso (2004).

Conforme demonstrado na Figura 16, o princípio de funcionamento consiste inicialmente na projeção de um plano de luz (LASER) na superfície da peça ser medida (plano 3), nas direções z_s e y_s . A interseção deste plano com a superfície define uma linha que é então capturada pelo sistema de visualização (normalmente CCD) posicionado, conforme a técnica de triangulação, a uma distância e inclinação conhecidas em relação ao plano de luz. Analisando a imagem obtida, é possível determinar as coordenadas bidimensionais médias pelo sensor (y_s, z_s) (KINDERMANN, 2016).

A largura de medição da “folha de luz”, l_m , depende da distância r . Quando a peça se encontra no Plano 2 (Figura 16), a largura de medição é mínima, no plano 4, ela é máxima. A distância entre estes dois planos determina a faixa de medição, que é uma característica de fabricação de cada sensor (KINDERMANN, 2016).

Um sistema de deslocamento externo faz com que o feixe faça a varredura da junta. Isto permite uma representação tridimensional, conhecendo-se também a coordenada na direção x . Desse modo, a resolução horizontal é independente da

resolução vertical do sensor. Assim, tem-se uma pequena largura de medição, mas uma grande faixa de medição (KINDERMANN, 2016; GAN; TANG, 2011).

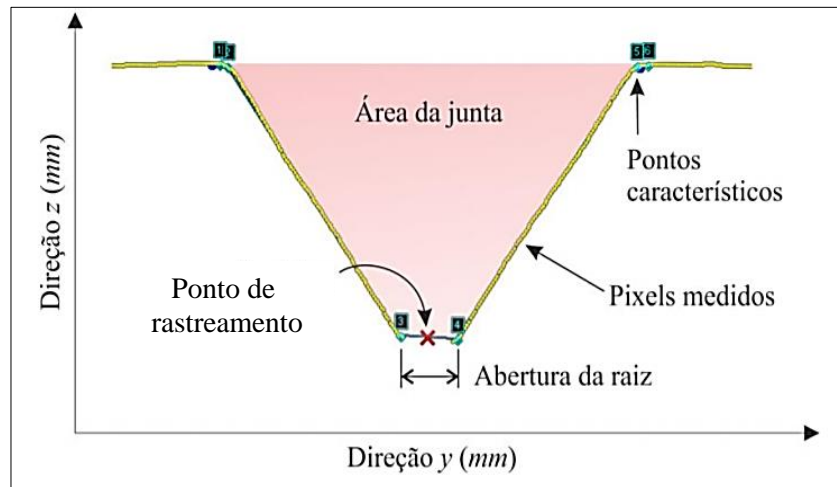
Por intermédio dos dados determinados pela medição da junta com base em sensores LASER e com ajuda de uma estratégia de controle, existe a possibilidade nos modernos sistemas de soldagem de realizar a construção dos cordões de solda automaticamente e calcular possíveis multipasses. Também com a ajuda de algoritmos, pode-se otimizar os parâmetros de soldagem com o arco de solda aberto. Estes requisitos só podem ser alcançados com o rastreamento da junta online (KINDERMANN, 2016).

2.4.1.1 Estrutura do Sistema de Controle do Robô e Processamento do Perfil de Junta

A Figura 17 mostra um exemplo de um perfil de uma junta em “V” capturada com o sensor LASER de linha, após processamento e tratamento da imagem (KINDERMANN, 2016).

As informações visuais primeiramente adquiridas pelo sensor CMOS (denominadas *range image*) devem fornecer, depois de adequado processamento de imagem, as dimensões geométricas e de posicionamento da junta em um sistema de coordenada conhecido. O x vermelho é chamado Ponto de Rastreamento (PR) e determina o centro da junta. As coordenadas do PR são obtidas em relação às coordenadas do robô por meio de uma calibração que envolve a transformação do sistema de coordenadas do sensor para o sistema de coordenadas do robô em translação e rotação (KINDERMANN, 2016; GAN; TANG, 2011).

Figura 17 – Perfil de uma junta “V” calibrado no sistema de coordenadas bidimensional do sensor LASER e algumas das informações geométricas da junta disponibilizadas.



Fonte: Kindermann (2016).

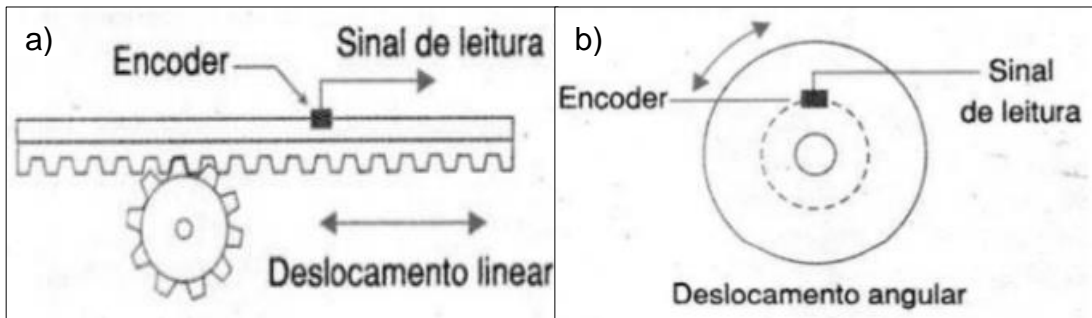
A informação adquirida pelo sensor é processada por um sistema de visão a fim de identificar o objeto e a relação entre a posição espacial do objeto e a posição do sensor. No presente trabalho, um sensor de LASER em formato ponto (*LASER point*), será utilizado para mapeamento do PR.

2.4.2 Encoders Ópticos

Os encoders são sensores do tipo CDTs (transdutores codificados) que possuem a capacidade de saber com alta precisão o posicionamento e a velocidade de peças em deslocamentos lineares ou angulares, conforme demonstrado na Figura 18 (LOSCHI; LIAL, 2012).

Transdutores de movimento são capazes de converter movimentos lineares ou circulares em informações elétricas que podem ser transformadas em informações binárias e processadas por um *software* que converta essas informações em velocidade, espaço, etc (RANIEL, 2011). Os encoders podem ser do tipo absoluto os quais são responsáveis por indicar a posição real do objeto por meio de um código único capaz de identificar sua posição a cada movimento, ou do tipo incremental onde a posição é determinada por pulsos a partir do zero (LOSCHI; LIAL, 2012).

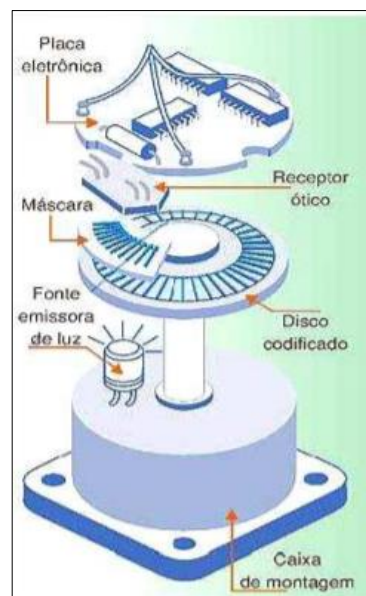
Figura 18 – Representação de encoder absoluto de deslocamento linear (a) e angular (b).



Fonte: Loschi e Lial (2012).

O encoder aplicado ao deslocamento angular é geralmente construído por um emissor (LED), receptor (foto-sensor) e um ou mais discos perfurados (máscara) que possibilita a passagem ou não luz gerando assim pulsos ao girar o eixo de acionamento. Os furos do disco ficam entre um feixe infravermelho gerado por um circuito eletrônico, eles ficam entre um emissor e receptor de infravermelho, quando o feixe do emissor chega no receptor sem interrupção é gerado um pulso, conforme demonstrado na Figura 19 (RANIEL, 2011). Para movimentos lineares o princípio é o mesmo, a única diferença fica relacionada em que a tira de claros e escuros fique disposta longitudinalmente, podendo o emissor e receptor se movimentarem ou até mesmo a movimentação está somente na tira (LOSCHI; LIAL, 2012).

Figura 19 – Aspectos físicos de encoders rotativos.



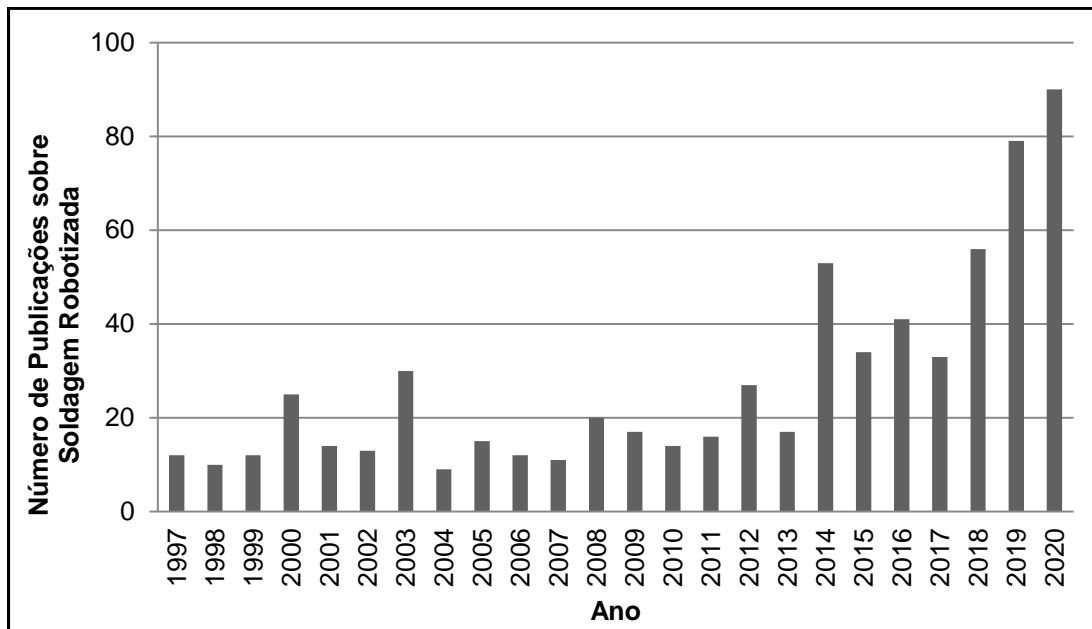
Fonte: Oliveira (2007).

Em processos que envolvam robotização, este tipo de sensor permite o monitoramento da posição de cada um dos eixos do robô. Neste trabalho, a posição dos eixos do robô é de extrema importância, tendo em vista que as coordenadas de posicionamento do mesmo serão utilizadas como referência para mapeamento da junta a ser soldada.

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

A Figura 20 demonstra um gráfico do aumento no número de publicações sobre soldagem robotizada especialmente nos últimos dois anos. Esse fato pode ser atribuído à necessidade de atendimento as exigências das indústrias em relação ao aumento da produtividade e melhoria na qualidade (precisão, exatidão, segurança, velocidade, repetitividade) dos processos de soldagem.

Figura 20 – Demonstração do aumento das publicações sobre soldagem robotizada a partir de 1997.



Fonte: Science Direct (2020).

A tecnologia aplicada a soldagem robotizada, evoluiu a adaptação automática às geometrias de solda, indo de encontro ao presente trabalho. Abaixo, trabalhos já desenvolvidos nesta área são discutidos.

Segundo o estudo realizado por Galeazi (2019), englobou-se a aplicação e

avaliação da utilização de um sensor LASER de linha para varredura, correção de posicionamento e ajuste de parâmetros simultaneamente ao processo de soldagem. O trabalho foi realizado utilizando uma peça de geometria orbital, sendo esta, um tubo em que a junta a ser soldada percorria o perímetro do mesmo.

Como resultado, o autor relata a inconsistência nas medições devido à falhas de *hardware*, sendo necessárias correções no algoritmo de trabalhos anteriores para melhora notável na aplicação do sistema.

Conforme estudo de Koss (2019), o LASER do tipo linha foi implementado juntamente a um manipulador, possibilitando um rastreamento de costura 3D. Um sistema de controle *feed-forward* foi implementado a fim de alcançar uma precisão de 0,05 mm durante a soldagem de peças de geometria definida em tempo real. A configuração do sistema proposto por Koss, pode ser adaptada a outros processos clássicos de soldagem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos que foram implementados para o desenvolvimento de um algoritmo para mapeamento de posições utilizando um sensor de distância a LASER e um robô industrial.

3.1 MATERIAIS

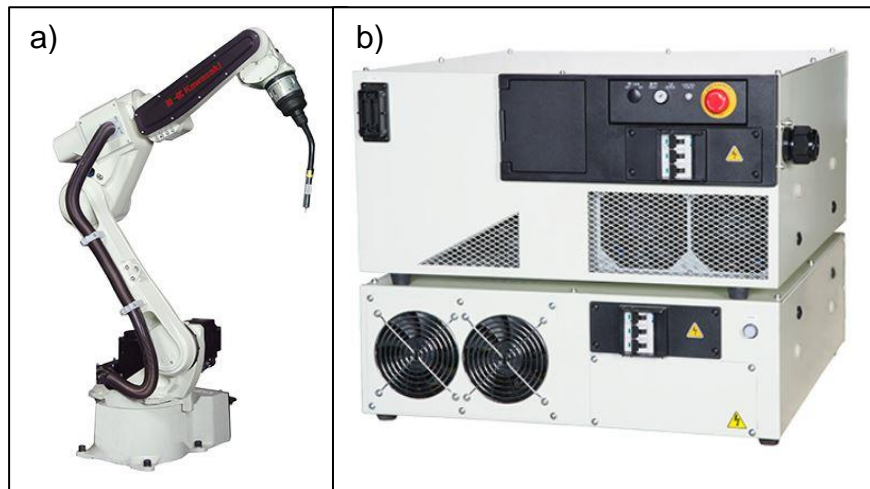
Nesta seção são descritos os materiais utilizados para o desenvolvimento de uma bancada de testes para execução do protótipo desenvolvido no presente trabalho.

3.1.1 *Manipulador Robótico*

O componente principal utilizado na bancada de ensaios foi um robô antropomórfico modelo Kawasaki BA006N (Figura 21). A sua estrutura cinemática é do tipo articulado com 6 graus de liberdade. Eles são definidos pela rotação dos eixos do robô denominados em ordem crescente de J1 a J6.

O robô possui uma unidade de controle modelo E01 e um *teach-pendant* (controle) para programação da trajetória de soldagem e movimentação do robô. A controladora também é responsável pela coleta e tratamento dos dados do robô, que posteriormente serão compartilhados via protocolo Ethernet/IP.

Figura 21 – (a) Manipulador Robótico BA006N e (b) Controladora E01.



Fonte: Kawasaki (2021).

3.1.2 Sensor de Distância

O cabeçote de medição LASER utilizado neste trabalho foi o IL-600 (Figura 22), da fabricante Keyence. Esse sensor é classificado como sensor de detecção por ponto (KEYENCE, 2020) e foi utilizado pois possui repetibilidade adequada ao projeto, estrutura física robusta e possui custo baixo quando comparado aos sensores já existentes em mercado.

Figura 22 – Cabeçote Laser IL600.



Fonte: Keyence (2020).

As especificações do sensor de medição de distância IL-600 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações Cabeçote LASER IL600.

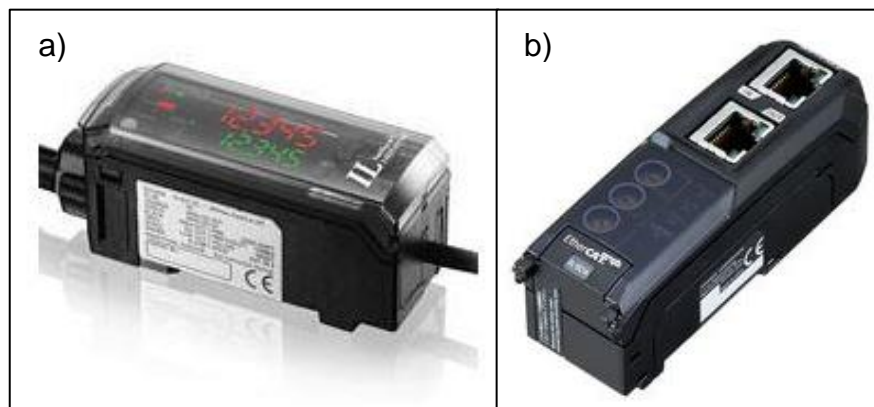
| | |
|--------------------------------|---|
| Modelo | IL-600 |
| Distância de referência | 600 mm |
| Alcance da medição | 200 a 1000 mm |
| Fonte de luz | LASER vermelho de semiconductor, comprimento de onda: 655 nm (luz visível) |
| Material | Material da carcaça: PBT. Peças metálicas: SUS304, Embalagem: NBR. Tampa da lente: Vidro, Cabo: PVC |
| Peso | Aproximadamente 135 g |

Fonte: Keyence (2020).

Para controle e otimização do sinal enviado pelo sensor medidor de distância, a fabricante Keyence disponibilizou o amplificador de sinal IL-1000 (Figura 23), que tem por objetivo tratamento do sinal medido para alcançar uma medição estável do alvo através do auto ajuste do feixe LASER em relação à reflexão da superfície medida.

A troca de dados entre o computador industrial CX8190 e o amplificador de sinal do sensor IL-600 foi realizada utilizando um acoplador para protocolo Ethercat DL-EC1A. O intuito do uso desse equipamento é a realização da troca de dados entre sensor e computador industrial de maneira robusta, diminuindo a possibilidade de ruído no meio físico utilizado (BECKHOFF, 2020).

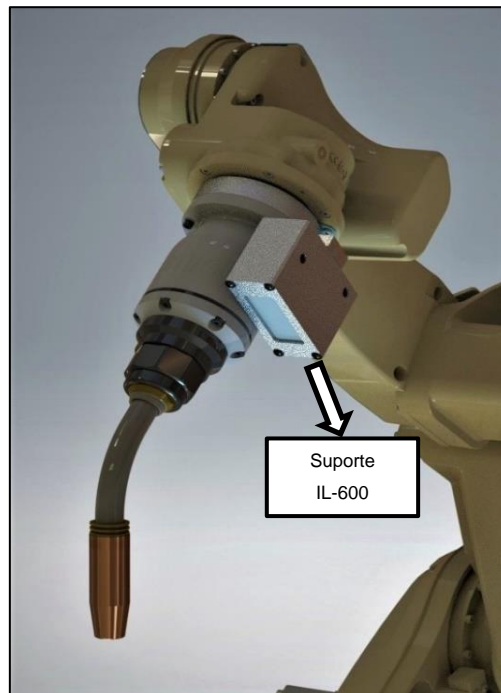
Figura 23 – (a) Amplificador IL1000 e (b) Acoplador Ethercat DL-EC1A.



Fonte: Keyence (2020).

O sensor de distância a LASER foi posicionado no braço robótico por meio de um dispositivo projetado para acoplar o mesmo na ferramenta do robô. Na Figura 24, uma ilustração do suporte desenvolvido para posterior fabricação.

Figura 24 – Suporte do sensor de distância a laser acoplado a ferramenta do robô.



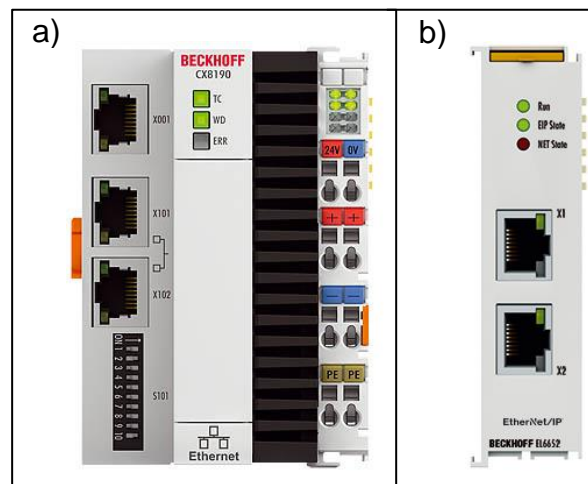
Fonte: o autor (2021).

3.1.3 Computador Industrial

Para análise e condicionamento dos dados, foi utilizado um computador industrial da marca *Beckhoff*, modelo CX8190 (Figura 25). O sistema de controle foi programado através do *software TwinCAT 3*.

O protocolo de comunicação utilizado pelo robô FDB6 é o *Ethernet/IP*. O computador industrial utilizado não possui o *Ethernet/IP* como protocolo nativo, portanto, foi necessário a utilização do módulo EL6652 para recebimento e envio de dados.

Figura 25 – (a) Computador Industrial CX8190 e (b) acoplador Ethernet/IP EL6652.

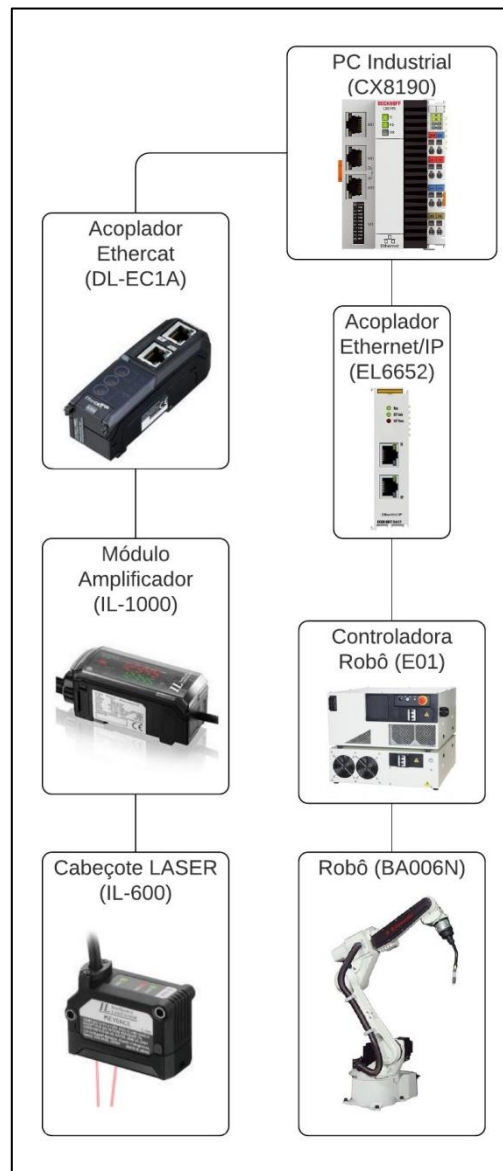


Fonte: Beckhoff (2020).

3.1.4 Bancada de Testes

A bancada de testes foi construída em um espaço disponibilizado pela empresa SUMIG Robótica e Automação, utilizando-se a arquitetura demonstrada no esquemático da Figura 26.

Figura 26 – Esquemático da Arquitetura de Hardware da Bancada de Testes.



Fonte: o autor (2021).

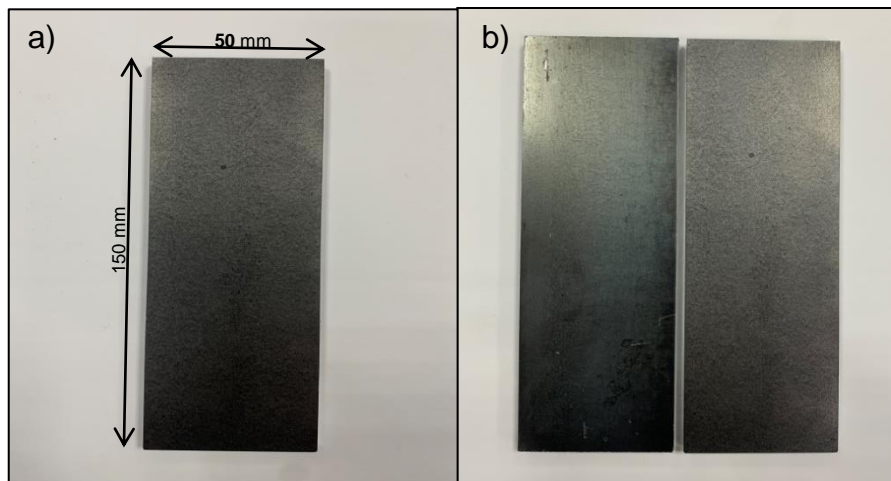
O computador industrial foi o responsável pelo tratamento de todos os dados coletados do sistema. Por meio da *Ethernet/IP* o referido computador realizou as trocas de dados com o robô BA006N. O amplificador IL1000, por meio do acoplador DL-EC1A, enviou os dados medidos pelo sensor IL-600 para o computador industrial via protocolo de comunicação *Ethercat*. Os dados do sensor a LASER e de posicionamento do robô foram coletados simultaneamente para posterior processamento.

3.1.5 Corpo de Prova

Chapas de aço SAE 1020 são amplamente utilizadas em processos industriais, razão pela qual foram escolhidas como corpo de prova deste trabalho.

Foram utilizadas duas chapas retangulares de espessura 6 mm, posicionadas afim de simular uma junta de topo. As dimensões de largura e comprimento da chapa são apresentadas na Figura 27, bem como o posicionamento para simulação da junta a ser mapeada.

Figura 27 – Dimensões da Chapa de Aço SAE 1020 (a) para ensaio e posicionamento para simulação de uma junta de topo (b).

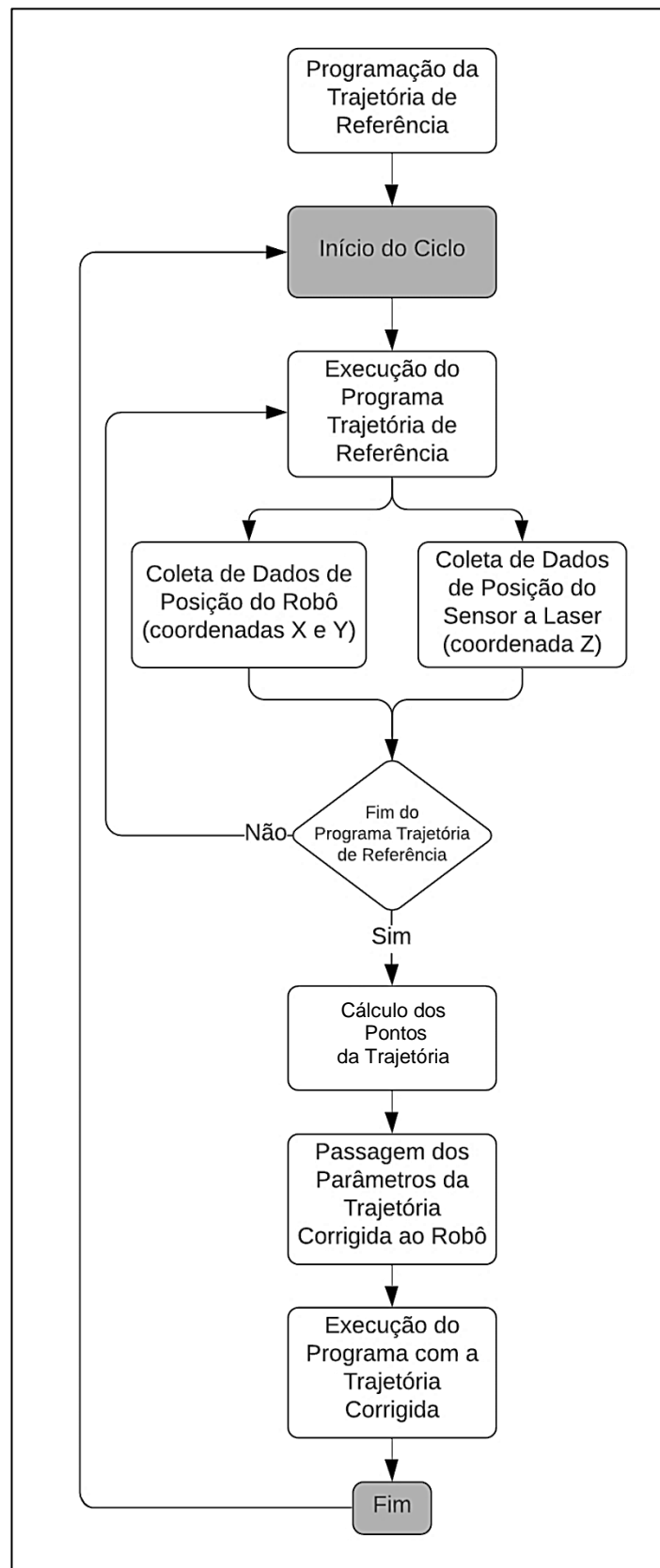


Fonte: o autor (2021).

3.2 MÉTODOS

O fluxograma da Figura 28 apresenta a metodologia de funcionamento proposta para o algoritmo implementado no protótipo para mapeamento das posições. Durante a parametrização dos dados de entrada, foi realizada a programação da trajetória de referência. Nessa etapa, o robô realizou uma varredura nos dois pontos principais da junta a ser soldada para cálculo da trajetória. Durante a execução do programa de trajetória de referência, o computador industrial coletou os dados de posicionamento do robô e do sensor de distância a LASER para posterior processamento. Após finalização do programa Trajetória de Referência, o que será discutido no Capítulo 4.1.4, a procura dos pontos corrigidos da trajetória correta de soldagem é realizada para posterior envio ao robô.

Figura 28 – Fluxograma proposto para o algoritmo de funcionamento.



Fonte: o autor (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

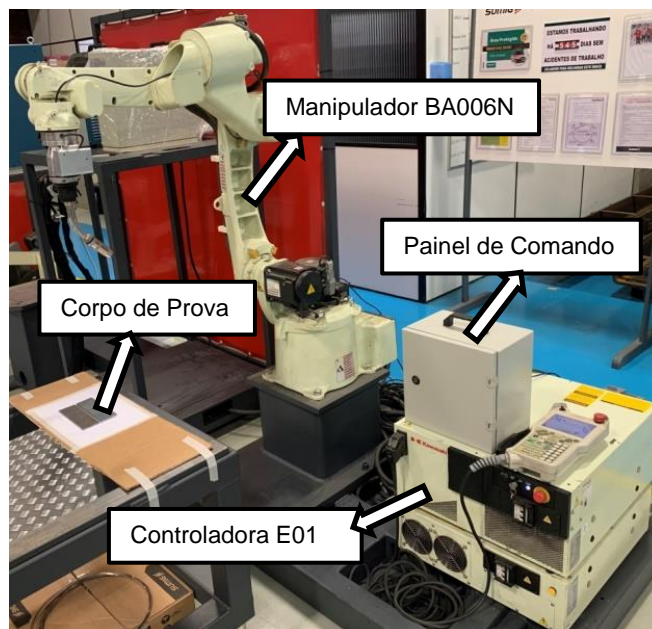
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento do algoritmo para mapeamento de posições por meio de um sensor de distância a LASER.

Primeiramente, são detalhadas a montagem do hardware, a comunicação entre os dispositivos e a lógica proposta para o algoritmo de forma detalhada. Por fim, são apresentados os resultados de execução e validação da programação realizada, discutindo a viabilidade de sua aplicação.

4.1.1 Montagem do Hardware e Estabelecimento da Comunicação entre os Componentes

A bancada de testes desenvolvida está representada na Figura 29 e será posteriormente detalhada.

Figura 29 – Bancada de testes utilizada para o desenvolvimento da tecnologia proposta.

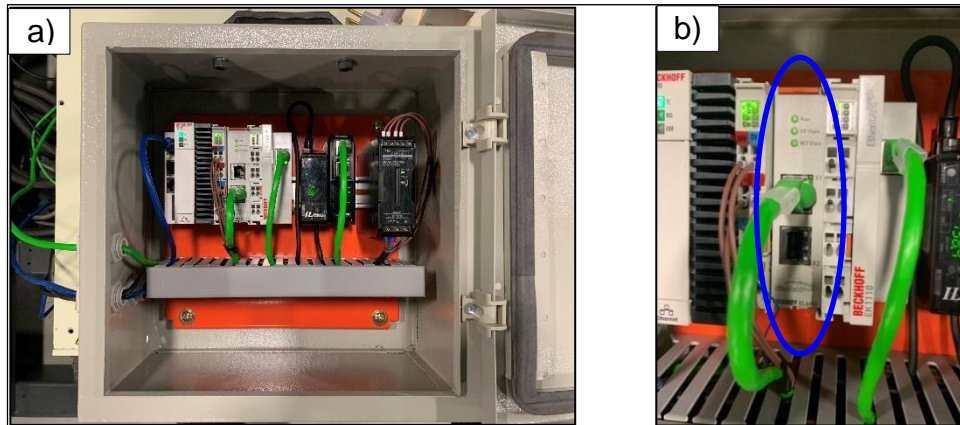


Fonte: o autor (2021).

O painel de comando está representado na Figura 30a e foi montado para realizar a integração entre o robô, o computador industrial e o sensor de distância a LAS. A comunicação entre o computador industrial e a controladora do manipulador

BA006N foi estabelecida por meio do protocolo Ethernet/IP. O dispositivo EL6652 (Figura 30b), foi utilizado como meio físico e recebeu como endereço de protocolo de rede o IP fixo 192.168.2.1. O cabo ethernet foi conectado na porta X1 do componente, em uma das extremidades, conforme demarcado na Figura 30b.

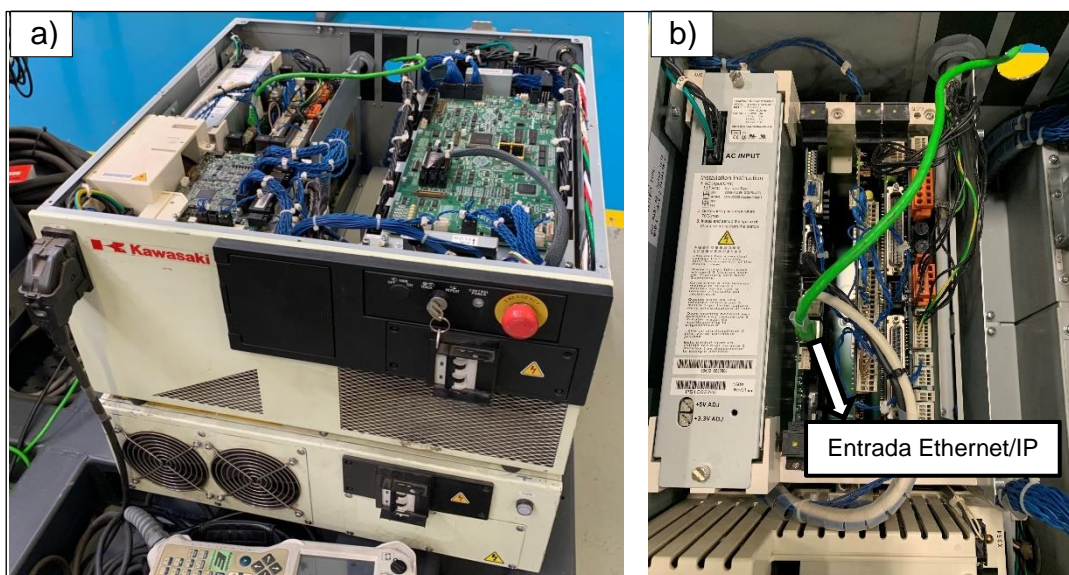
Figura 30 – (a) Representação do painel de comando utilizado e do (b) dispositivo EL6652.



Fonte: o autor (2020).

A Figura 31 ilustra a controladora E01 (a) e a sua placa principal “*main CPU*”. Conforme observado na Figura 31b, a outra extremidade do cabo ethernet (cabo verde) foi conectada a “*main CPU*” da controladora E01. A porta do modelo ethernet, nomeada como CN1, foi utilizada como meio físico e recebeu o endereçamento 192.168.2.2 na arquitetura de rede.

Figura 31 – (a) Representação da controladora E01 e da (b) placa principal “*main CPU*”.



Fonte: o autor (2021).

Os dados das coordenadas 3D do robô (x,y,z) foram disponibilizadas via protocolo Ethernet/IP utilizando 2 bytes para cada uma das dimensões. O programa foi desenvolvido em linguagem AS, sintaxe utilizada em robôs da marca Kawasaki (Apêndice 1). O tratamento dos dados recebidos no computador industrial foi realizado utilizando uma variável do tipo *array* de bytes com duas posições e cada um dos dois bytes foi vinculado a um byte dedicado ao protocolo ethernet/IP e definido como entrada de dados (Figura 32).

Figura 32 – Variáveis utilizadas para recebimento dos dados de coordenadas da posição do robô.

```
EixoX AT %I* : ARRAY [0..1] OF BYTE;
EixoY AT %I* : ARRAY [0..1] OF BYTE;
EixoZ AT %I* : ARRAY [0..1] OF BYTE;
```

Fonte: o autor (2021).

O teste da comunicação Ethernet/IP foi realizado por meio da comparação dos valores de coordenadas mostrados na tela do robô (Figura 33a) com os dados recebidos nas variáveis dedicadas do computador industrial (Figura 33b). Para realização do presente trabalho, os valores utilizados são números inteiros que representam milímetros do envelope de trabalho do robô, portanto, as variáveis de posição foram arredondadas.

Figura 33 – (a) Representação das coordenadas do robô demonstradas no *teach pendant* e (b) valores recebidos no computador industrial.

| | | | |
|----|---|----|---|
| a) | <pre>Monitor1 :Áxis data monitor JT 1 : 0.002 X : 3.428 JT 2 : -10.101 Y : 680.446 JT 3 : -102.499 Z : 687.859 JT 4 : -0.012 O : -88.216 JT 5 : -86.215 A : 133.757 JT 6 : -0.015 T : 88.505</pre> | b) | <pre>ValorX 3 := VALUE.ValorEixoX 3 ; ValorY 680 := VALUE.ValorEixoY 680 ; ValorZ 688 := VALUE.ValorEixoZ 688 ;</pre> |
|----|---|----|---|

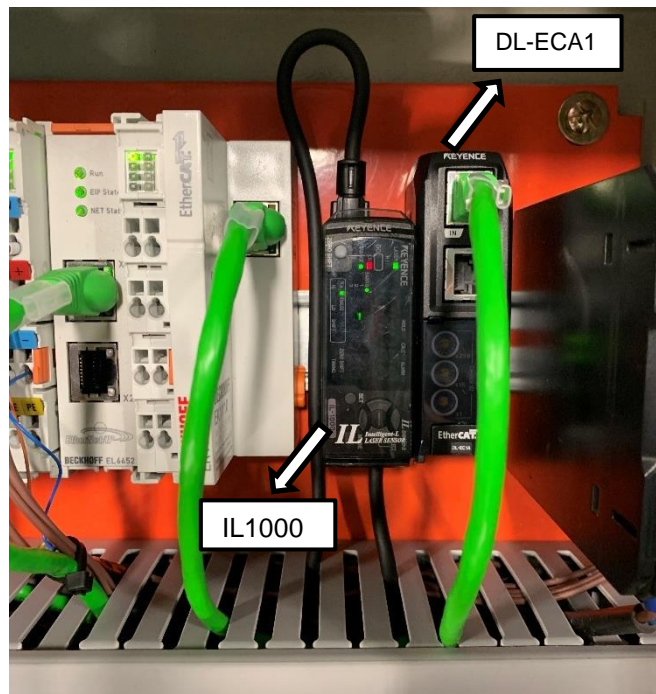
Fonte: o autor (2021).

As variáveis utilizadas para recebimento dos dados foram tratadas para conversão dos dois *bytes* recebidos em números inteiros. Os bytes de coordenadas do robô são utilizados como entradas do programa "Value.prg", apresentado no Apêndice 2.

4.1.2 Comunicação Ethercat

A troca de dados entre o amplificador de sinais IL1000 e o módulo de comunicação Ethercat (DL-ECA1) foi realizada por meio do protocolo Ethercat, utilizando um cabo Ethernet como meio físico. Os valores de distância medida pelo sensor a LASER são disponibilizados como dados previamente tratados e em uma variável de saída inteira pelo módulo DL-ECA1. Os dispositivos são apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Representação do amplificador de sinais (IL1000) e o módulo de comunicação Ethercat (DL-ECA1).



Fonte: o autor (2021).

Para a lógica desenvolvida, a variável utilizada destinada a coleta dos valores de distância foi a de tipo duplo-inteiro. Foi necessário tratar o sinal recebido para aproveitamento somente da parte inteira do valor medido pelo sensor de distância. O tratamento do dado foi realizado conforme Figura 35.

Figura 35 – Variável de entrada dos valores de distância medida pelo sensor LASER.

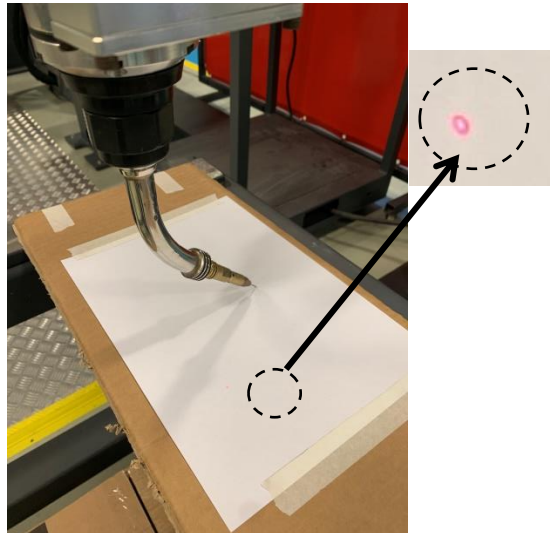
```
ValorZLaser := DINT_TO_INT(EixoZLaser/100);
```

Fonte: o autor (2021).

4.1.3 Cálculo do *Offset* da Tocha

O *offset* da tocha foi calculado pela diferença entre a distância do centro da ferramenta do robô e o centro do ponto de medição do sensor LASER, conforme representado na Figura 36. Primeiramente foram realizadas as medições das coordenadas (x,y) iniciais do robô, as quais foram obtidas como (2,793, 884,779). Após, movimentou-se o robô para o ponto onde o feixe LASER incidia a folha branca e obteve-se as coordenadas (x,y) finais, iguais a (-67,617, 970,727). Por meio do cálculo da diferença entre as referidas coordenadas, definiu-se o *offset* entre o LASER e a ponta da ferramenta, como 70,410 mm para X e -85,948 mm para Y.

Figura 36 – Representação da incidência do feixe LASER na folha branca.



Fonte: o autor (2021).

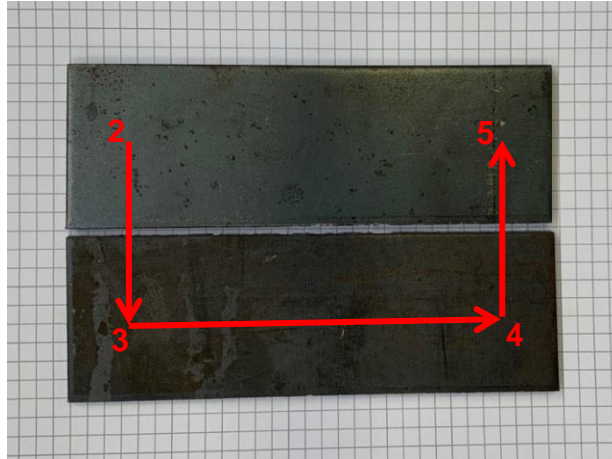
Apesar do cálculo de *offset* realizado, no momento da verificação do funcionamento efetivo do algoritmo, foi constatado a necessidade de alteração dos valores obtidos de 70,410 mm para 71 mm em X e de -85,948 mm para 90 mm em Y, conforme será melhor descrito na Seção 4.1.6.

4.1.4 Programação da Trajetória de Referência

O programa Trajetória de Referência foi desenvolvido por meio da programação por movimentação, sendo a gravação dos pontos realizada na interface do manipulador BA006N. O referido programa consiste em seis pontos que

possuem movimentação linear entre os mesmos, sendo o primeiro e o último pontos uma posição segura longe da área de atuação do robô na peça. Como referência visual para gravação da trajetória, utilizou-se o feixe LASER emitido pelo sensor de distância presente na ferramenta do manipulador. A Figura 37 representa as trajetórias e a ordem e execução dos pontos programados.

Figura 37 – Trajetória executada pelo robô, utilizando o ponto LASER como centro da ferramenta.

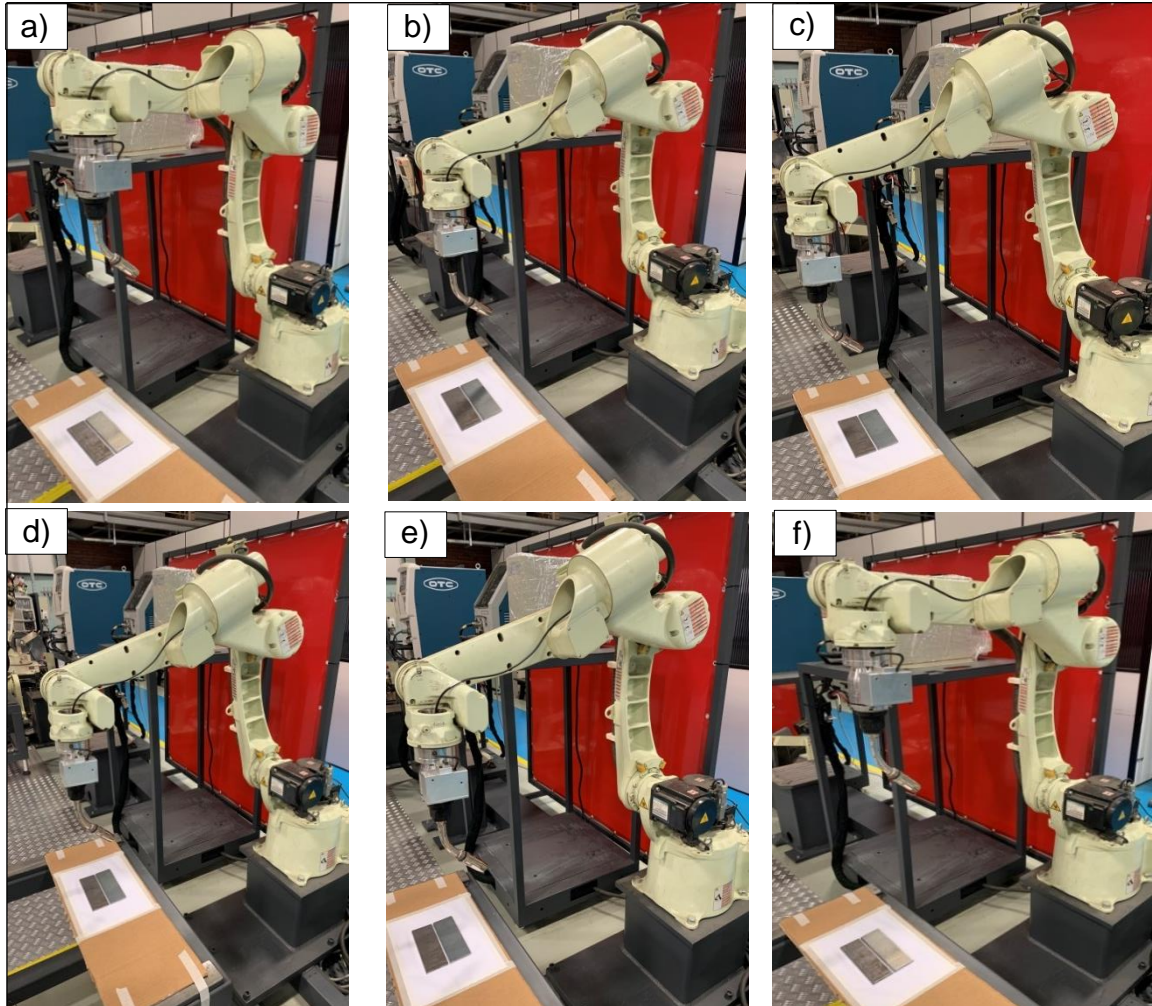


Fonte: o autor (2021).

Na Figura 38 são demonstradas as posições do robô em cada um dos pontos da trajetória de referência, isto é, a posição inicial do programa trajetória de referência (a), a posição inicial (b) e final (c) da trajetória de varredura do primeiro ponto da junta, a posição inicial (d) e final (e) da trajetória de varredura do segundo ponto da junta e a posição final do programa trajetória de referência (f).

O programa para a obtenção das posições representadas na Figura 40 foi desenvolvido em modo de gravação de pontos no robô e é demonstrado na Figura 39. Para as trajetórias em que a medição de coordenadas da junta foi realizada, o tipo de movimentação utilizado foi o linear, a qual é definida como a interpolação de uma reta traçada entre dois pontos determinados. Na trajetória executada, este tipo de movimentação foi utilizado para que a coordenada Z do robô não sofresse variação. Já para as posições inicial e final, o tipo de movimentação utilizado foi movimentação por junta, isto é, a movimentação entre dois pontos é realizada com maior velocidade.

Figura 38 – (a) Posição inicial do programa trajetória de referência, (b) posição inicial da trajetória de varredura do primeiro ponto da junta, (c) posição final da trajetória de varredura do primeiro ponto da junta, (d) posição inicial da trajetória de varredura do segundo ponto da junta, (e) posição final da trajetória de varredura do segundo ponto da junta e (f) posição final do programa trajetória de referência.



Fonte: o autor (2021).

Figura 39 – Visualização do programa da trajetória de referência na tela do *teach pendant* do robô.

| Ins. | Intp | No | Spd | Acc | Tmr | J/E | [Option Switch |
|-------|-------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------|
| AC | JOINT | | 9 | 4 | 0 | | [|
| 1 | AC | JOINT | 9 | 4 | 0 | | [|
| 2 | AC | JOINT | 9 | 4 | 0 | | [|
| 3 | AC | LINEAR | 9 | 4 | 0 | | [|
| 4 | AC | LINEAR | 9 | 4 | 0 | | [|
| 5 | AC | LINEAR | 9 | 4 | 0 | | [|
| 6 | AC | JOINT | 9 | 4 | 0 | | [|
| 7 | AC | KI80[0] (ext_position) | | | | | [|
| 8 | AC | JOINT | 9 | 4 | 0 | | [|
| [EOF] | | | | | | | |

Sintaxe de programação dos posicionamentos no *teach pendant* do robô

Fonte: o autor (2021).

4.1.5 Obtenção e Envio das Coordenadas da Junta

O programa para obtenção e tratamento dos dados foi desenvolvido em linguagem estruturada. A programação foi realizada de forma sequencial seguindo a estrutura de máquina de estados tendo a variável “Int_Case” como responsável pela troca de estados e será detalhada a seguir.

Na etapa inicial, chamada de estado zero, o programa executável no computador industrial recebe o sinal alto da saída de número 53 do manipulador, acionada pela posição número 1 do programa da Trajetória de Referência. Como entrada do sinal de início no computador industrial, a variável “MainStart” foi vinculada e troca o estado da variável Int_Case (Figura 40).

Figura 40 – Passo inicial da máquina de estado, aguarda gatilho do robô para prosseguir.

```
0:  IF MainStart THEN
      Int_Case := 5;
    END_IF
```

Fonte: o autor (2021).

Sendo o valor da variável Int_Case igual a 5, um gatilho para início da leitura de coordenadas do robô é executado (Figura 41) por meio da saída 49 acionada pelo programa trajetória de referência.

Figura 41 – Gatilho para o início da coleta de dados do ponto inicial da junta.

```
5:
    IF Start_Read1 THEN
      Int_Case := 10;
    END_IF
```

Fonte: o autor (2021).

Após o acionamento do sinal para início da leitura de dados, a cada 400 ms os valores das coordenadas (x, y e z) do robô, juntamente com o valor da distância medida pelo sensor a LASER, são armazenados em vetores para posterior tratamento dos dados (Figura 42). Ao final da execução da primeira trajetória linear executada pelo robô, o sinal de início da leitura do primeiro ponto da junta a ser mapeada é desacionado, assim, o estado da variável Int_Case é modificado. O

programa segue de forma sequencial e igual para a varredura do ponto número dois da junta por meio da execução da segunda trajetória linear do programa trajetória de referência.

Figura 42 – Lógica executada para a coleta de dados das coordenadas do robô em vetores.

```
10:
    Pulso := CLOCK.ClockOUT;
    Vetor1_EixoX[Step] := ValorX;
    Vetor1_EixoY[Step] := ValorY;
    Vetor1_EixoZ[Step] := ValorZ;
    Vetor1_EixoZLaser[Step] := ValorZLaser;

    IF NOT(Start_Read1) THEN
        Int_Case := 15;
    END_IF
```

Fonte: o autor (2021).

Após a realização da coleta das coordenadas e salvamento dos dados em vetores, inicia-se a avaliação dos dados para encontrar a posição da reta a ser posteriormente executada. Com a variável Int_Case igual a vinte e cinco da execução da máquina de estados, é realizada a compensação do offset do LASER em relação aos dados coletados da ferramenta do robô (Figura 43). Nota-se que após a execução de testes, os valores de compensação foram modificados em relação aos previamente definidos pelo offset da ferramenta em relação à posição do LASER (Seção 4.13). Esta variação ocorreu devido à perda de precisão imposta pelas casas decimais das coordenadas x, y e z do robô, uma vez que os valores medidos foram tratados como números inteiros.

Figura 43 – Compensação do posicionamento do sensor a LASER nas coordenadas X e Y.

```

25:
  FOR j := 0 TO 99 DO
    Vetor1_EixoX[j] := Vetor1_EixoX[j] - 70;
    Vetor1_EixoY[j] := Vetor1_EixoY[j] + 91;
    Vetor2_EixoX[j] := Vetor2_EixoX[j] - 70;
    Vetor2_EixoY[j] := Vetor2_EixoY[j] + 91;
  END_FOR

  Int_Case := 30;

```

Fonte: o autor (2021).

A obtenção do ponto central da junta de topo foi possível por meio da leitura do maior valor de distância medido pelo sensor a LASER em relação ao centro da ferramenta do robô. A lógica foi desenvolvida de modo a encontrar a maior medida de distância gravada no vetor de dados que contém os valores medidos do sensor a LASER e armazena a posição desta medida em uma variável (Figura 44).

Figura 44 – Lógica para encontrar o maior valor medido de distância em cada uma das varreduras realizadas pelo robô.

```

30:
  Valor1 := Vetor1_EixoZLaser[0];
  Valor2 := Vetor2_EixoZLaser[0];
  FOR Calc_Index := 1 TO 99 DO
    IF Valor1 < Vetor1_EixoZLaser[Calc_Index] THEN
      Valor1 := Vetor1_EixoZLaser[Calc_Index];
      Posic1 := Calc_Index;
    END_IF
    IF Valor2 < Vetor2_EixoZLaser[Calc_Index] THEN
      Valor2 := Vetor2_EixoZLaser[Calc_Index];
      Posic2 := Calc_Index;
    END_IF
  END_FOR

  Int_Case := 40;

```

Fonte: o autor (2021).

Com a obtenção do ponto central, os pontos inicial e final da reta a ser traçada pelo robô são coletados em três dimensões, através do posicionamento desses pontos nos vetores gravados. Estas três dimensões (x, y e z), juntamente com a distância medida pelo sensor a LASER, são posteriormente vinculadas às

variáveis de tipo inteiro (Figura 45).

Figura 45 – Lógica realizada para vincular os valores de coordenada central da junta a uma variável de tipo inteiro.

```

40:
  P1X_Junta := Vetor1_EixoX[Posic1+1];
  P1Y_Junta := Vetor1_EixoY[Posic1+1];
  P1Z_Junta := Vetor1_EixoZ[Posic1+1];
  P1Z_JuntaLaser:= Vetor1_EixoZLaser[Posic1+1];
  P2X_Junta := Vetor2_EixoX[Posic2+1];
  P2Y_Junta := Vetor2_EixoY[Posic2+1];
  P2Z_Junta := Vetor2_EixoZ[Posic2+1];
  P2Z_JuntaLaser:= Vetor2_EixoZLaser[Posic2+1];
  Int_Case := 45;

```

Fonte: o autor (2021).

As variáveis do tipo inteiro, contendo os valores de início e fim da reta a ser soldada, são tratadas pelo programa VALUE.prg para serem disponibilizadas como saídas do protocolo Ethernet/IP em formato de dois bytes para cada variável, conforme lógica apresentada na Figura 46. Posteriormente, uma saída do robô é acionada para informar ao computador industrial que as variáveis foram coletas via rede.

Figura 46 – Lógica para envio dos dados das coordenadas centrais da junta ao programa Value.

```

45:
  VALUE.PX1 := P1X_Junta;
  VALUE.PY1 := P1Y_Junta;
  VALUE.PZ1 := P1Z_Junta - P1Z_JuntaLaser;
  VALUE.PX2 := P2X_Junta;
  VALUE.PY2 := P2Y_Junta;
  VALUE.PZ2 := P2Z_Junta - P2Z_JuntaLaser;

  IF Start_Read1 THEN
    Int_Case := 46;
  END_IF

```

Fonte: o autor (2021).

No passo posterior ao recebimento dos dados pelo robô, um novo vetor para mapeamento de cada coordenada é inicializado. Cada vetor foi utilizado para

registro da coordenadas lineares traçadas pelo manipulador robótico durante a execução da trajetória entre o ponto inicial e final da junta, conforme lógica desenvolvida e demonstrada na Figura 47.

Figura 47 – Lógica para coleta de dados durante a execução da trajetória.

```

46:
    Pulso := CLOCK.ClockOUT;
    DadosX_Trajectoria[Step] := ValorX;
    DadosY_Trajectoria[Step] := ValorY;
    DadosZ_Trajectoria[Step] := ValorZ;

    IF NOT(Start_Read1) THEN
        Int_Case := 50;
    END_IF

```

Fonte: o autor (2021).

Os vetores coletados de X,Y,Z, as medidas do sensor LASER e os valores da trajetória realizada pelo robô foram exportados por meio de um arquivo .csv para posterior análise (Figura 48). O algoritmo que realiza esta operação está detalhado no Apêndice 3.

Figura 48 – Comissionamento dos dados para exportação em “.csv”.

```

50:
    FOR k := 0 TO 100 DO
        EXPORT_TO_CSV.Database[0,k] := INT_TO_STRING(Vetor1_EixoX[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[1,k] := INT_TO_STRING(Vetor1_EixoY[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[2,k] := INT_TO_STRING(Vetor1_EixoZ[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[3,k] := INT_TO_STRING(Vetor1_EixoZLaser[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[4,k] := INT_TO_STRING(Vetor2_EixoX[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[5,k] := INT_TO_STRING(Vetor2_EixoY[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[6,k] := INT_TO_STRING(Vetor2_EixoZ[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[7,k] := INT_TO_STRING(Vetor2_EixoZLaser[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[8,k] := INT_TO_STRING(DadosX_Trajectoria[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[9,k] := INT_TO_STRING(DadosY_Trajectoria[k]);
        EXPORT_TO_CSV.Database[10,k] := INT_TO_STRING(DadosZ_Trajectoria[k]);
    END_FOR

    Int_Case := 60;

```

Fonte: o autor (2021).

O fim do ciclo de execução do algoritmo ocorre quando os vetores de armazenamento dos dados têm os valores novamente inicializados, contendo o valor

zero em cada uma de suas posições. Para realizar uma nova operação, a variável `Int_case`, a qual é responsável pelo controle da máquina de estados, é também inicializada recebendo o valor zero (Figura 49).

Figura 49 – Lógica para inicialização dos valores nos vetores.

```

60:
    FOR Index:=0 TO 99 DO
        Vetor2_EixoX[Index] := 0;
        Vetor2_EixoY[Index] := 0;
        Vetor2_EixoZ[Index] := 0;
        Vetor2_EixoZLaser[Index] := 0;
        Vetor1_EixoX[Index] := 0;
        Vetor1_EixoY[Index] := 0;
        Vetor1_EixoZ[Index] := 0;
        Vetor1_EixoZLaser[Index] := 0;
    END_FOR

    Int_Case := 0;

```

Fonte: o autor (2021).

4.1.6 Execução e Validação do Programa

Para realizar a validação do algoritmo proposto os corpos de prova foram dispostos em três diferentes posições, descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Posições utilizadas para validação do funcionamento do algoritmo.

| Posição 1 | Posição de Referência |
|-----------|---|
| Posição 2 | Posição 1 com deslocamento linear em Y |
| Posição 3 | Posição 1 com deslocamento angular de 10 graus no sentido positivo (horário). |

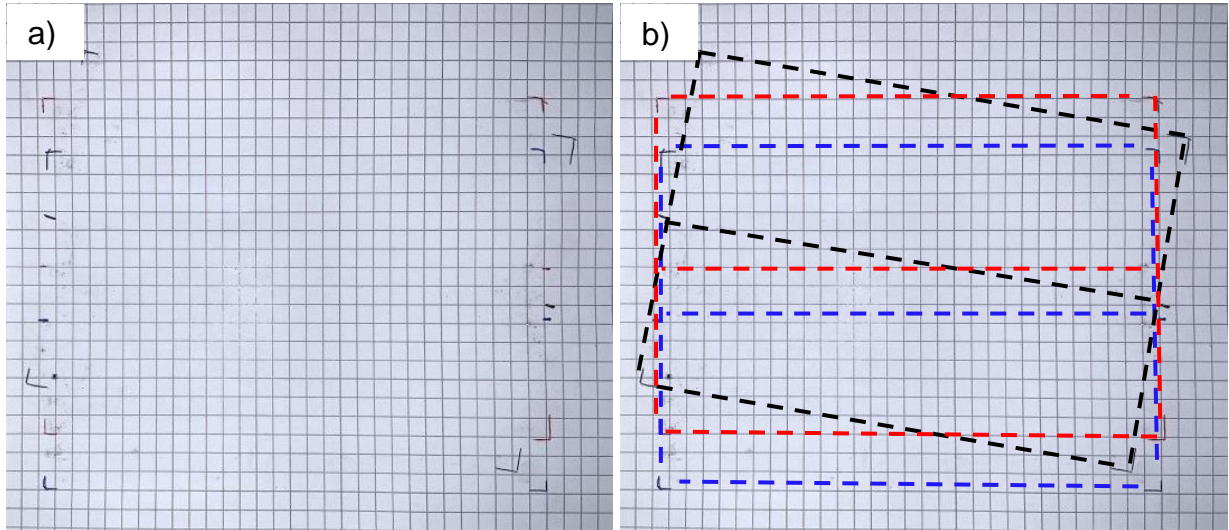
Fonte: o autor (2021).

As posições descritas na Tabela 3 foram escolhidas para permitir a avaliação do comportamento do algoritmo frente às duas formas de deslocamento possíveis na prática (angular e linear). Ressalta-se que a dimensão da fenda entre os dois corpos de prova foi de 2 mm em todas as posições estudadas.

Na Figura 50 pode ser observada a demarcação, em papel milimetrado, da posição dos cantos das peças e do centro da junta em cada posição avaliada. Para

facilitar a visualização de cada posicionamento estudado esses foram representados separadamente nas Figuras 51, 52 e 53 para as trajetórias das Posições 1, 2 e 3, respectivamente.

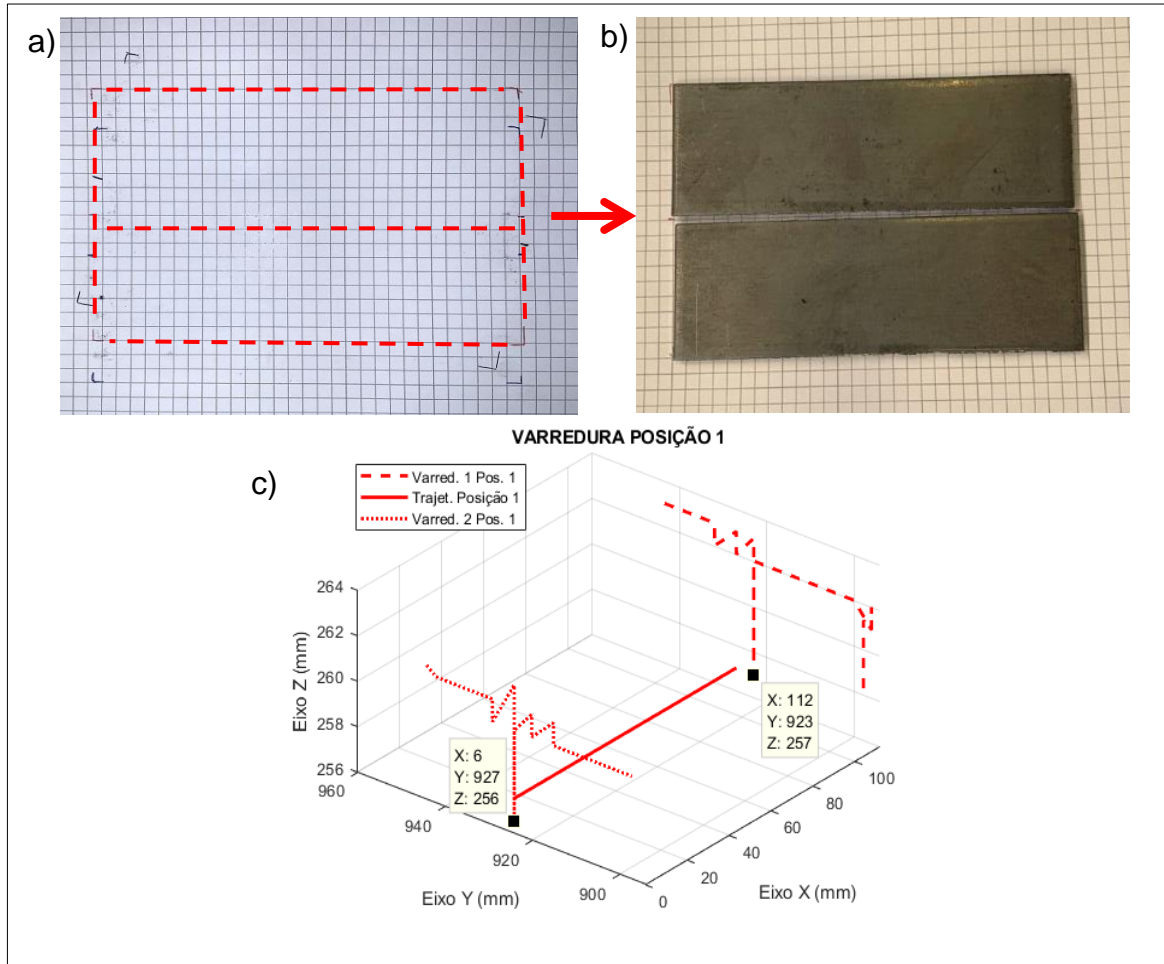
Figura 50 – (a) Demarcação do posicionamento dos corpos de prova em papel milimetrado nas posições 1 (-), 2(-) e 3(-), com e (b) sem realce.



Fonte: o autor (2021).

Na Figura 51a, observa-se o realce da demarcação do posicionamento da peça na primeira execução do programa (Posição 1), os corpos de prova posicionados sobre o realce (Figura 51b) e o gráfico representado na Figura 51c, representa os dados coletados de movimentação do manipulador durante a execução dos programas de varredura, cálculo e trajetória linear percorrida pelo robô. Os dois pontos em destaque no gráfico, referem-se aos pontos centrais da junta mapeada encontrados pelo algoritmo como início e fim da reta a ser percorrida pelo robô.

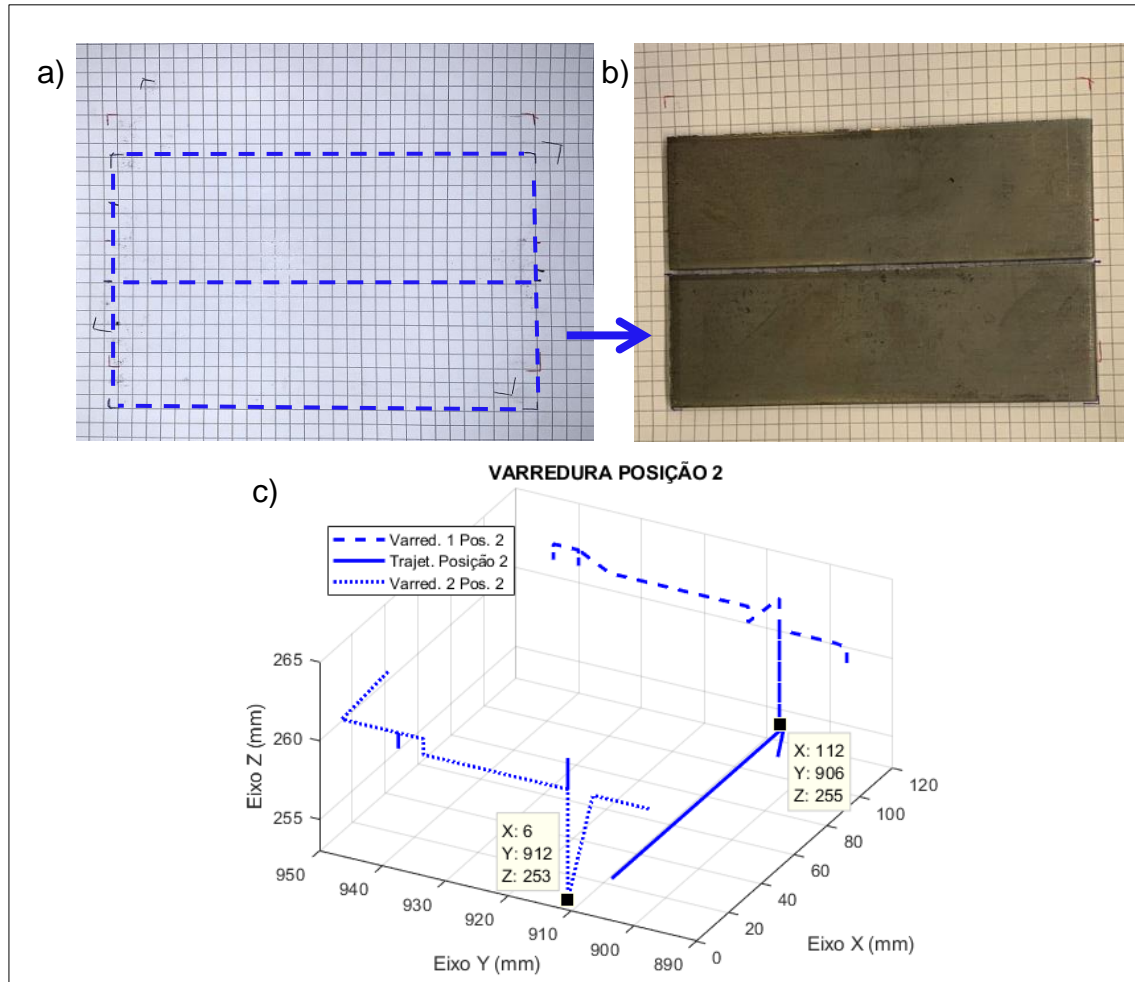
Figura 51 – Posição 1 : (a) demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado; (b) corpos de prova posicionados sobre a demarcação do papel milimetrado; (c) gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados.



Fonte: o autor (2021).

De forma análoga, a Figura 52 demonstra as representações de posicionamento e o gráfico das trajetórias mapeadas durante a execução do programa referente à Posição 2. O posicionamento testado nessa segunda execução, simulou uma movimentação lateral da junta de teste. A movimentação lateral do corpo foi de aproximadamente 1,5 centímetros.

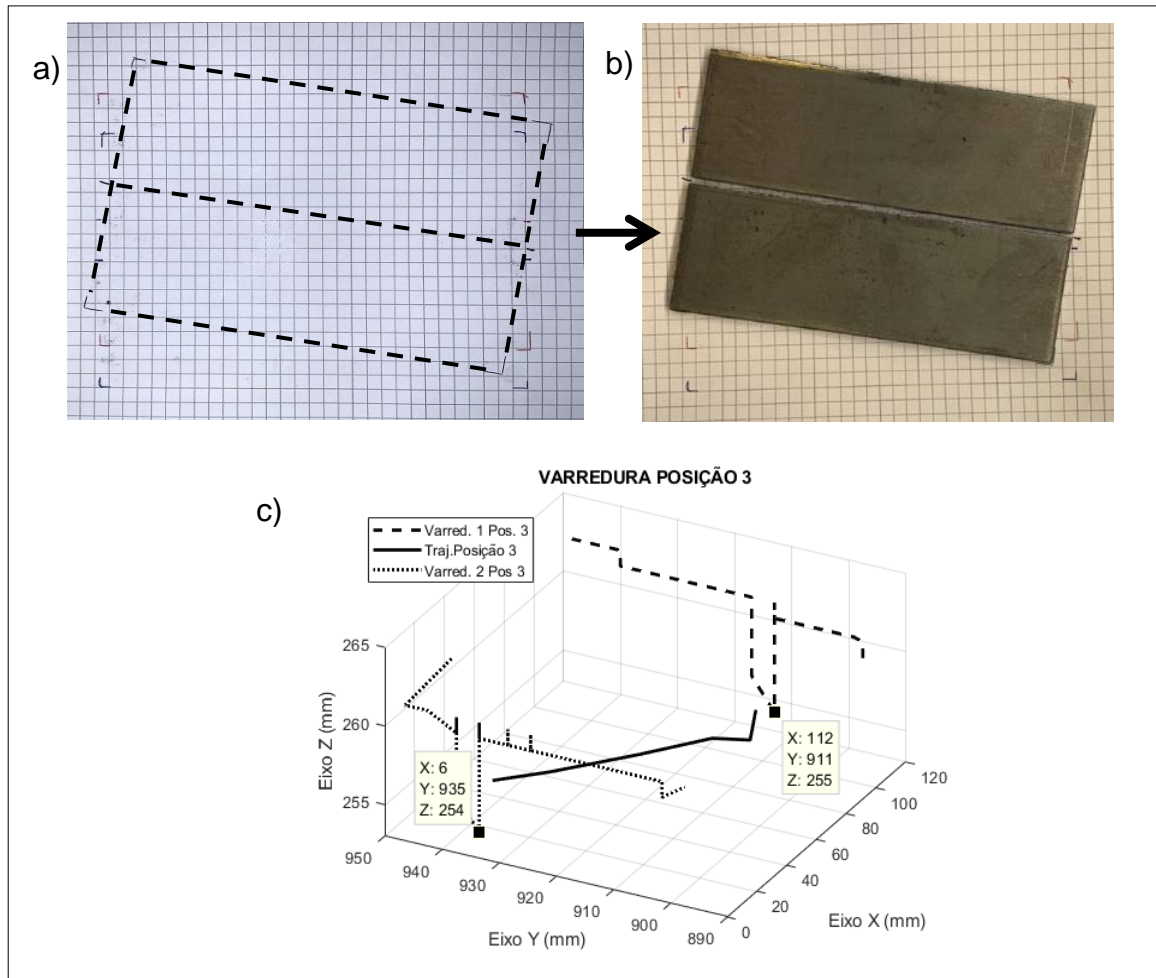
Figura 52 – Posição 2 : (a) demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado; (b) corpos de prova posicionados sobre a demarcação do papel milimetrado; (c) gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados.



Fonte: o autor (2021).

Para a simulação da variação de posicionamento de maneira angular, Posição 3, movimentou-se a peça aproximadamente 10 graus em sentido horário, conforme demonstrado na Figura 53.

Figura 53 – Posição 3 : (a) demarcação do posicionamento da peça no papel milimetrado; (b) corpos de prova posicionados sobre a demarcação do papel milimetrado; (c) gráfico dos dados coletados da trajetória de varredura do primeiro e segundo ponto central da junta, bem como o posicionamento do braço robótico durante a execução da linha reta entre os dois pontos mapeados.

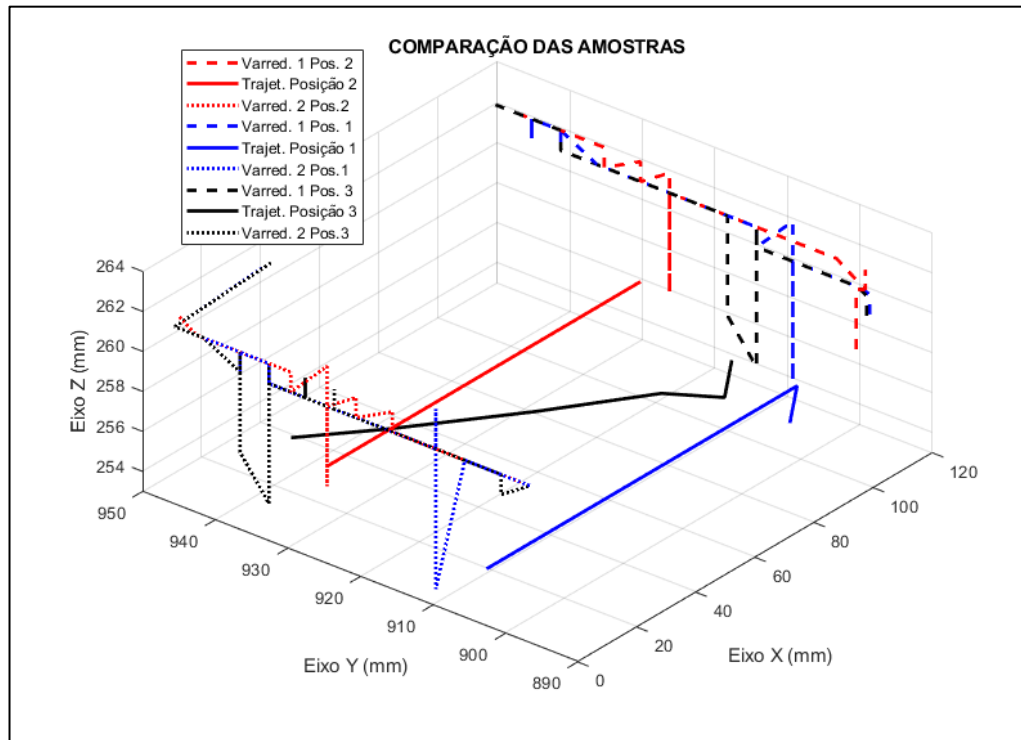


Fonte: o autor (2021).

O gráfico da Figura 54, demonstra de forma comparativa o mapeamento de cada trajetória de teste realizada. A performance do algoritmo foi satisfatória, mantendo o mesmo comportamento e precisão durante as repetições de execução de todas as trajetórias testadas. Na realização desta etapa, observou-se uma diferença entre a reta a ser traçada e a trajetória executada pelo robô, resultado da utilização somente de números inteiros no mapeamento das coordenadas. A variação entre a trajetória programada e a executada pelo manipulador robótico foi de aproximadamente ± 2 mm. A pequena diferença constatada é provavelmente resultante da coleta e processamento dos dados como números inteiros. Quando aplicado à mecânica do corpo de prova o erro constatado mostra-se pouco expressivo.

Nota-se que o comportamento do manipulador atendeu ao objetivo de traçar uma reta entre os dois pontos centrais da junta medida além de realizar a trajetória entre os pontos com êxito, compensando as variações de movimentação lateral e angular da peça de maneira precisa e estável.

Figura 54 – Gráfico para comparação das trajetórias realizadas durante as três execuções para teste de mapeamento da junta (Posição 1, 2 e 3).



Fonte: o autor (2021).

4.1.7 Avaliação da Viabilidade Econômica da Tecnologia Proposta

Na Tabela 4 são demonstrados os custos das soluções já existentes para o mapeamento de juntas aplicados à soldagem, os orçamentos utilizados estão disponíveis no Apêndice 4.

Tabela 4 – Custo de componentes aplicados às soluções para rastreamento de junta já existentes.

| Tecnologias para rastreamento de juntas | Custo (R\$) |
|---|-------------|
| Perfilômetro | 88.294,15 |
| Câmera de Visão Artificial | 89.174,61 |
| Rastreamento por Toque de Arame | 32.500,00 |
| LASER Ponto (solução proposta) | 6.402,04 |

Fonte: o autor (2021).

Conforme observado na Tabela 4, a diferença entre o custo das tecnologias já existentes e a proposta realizada por este trabalho é bastante expressivo, sendo a solução proposta 92,75, 92,80 e 80,30% mais barata quando comparada, respectivamente, ao perfilômetro, à câmera de visão artificial e ao rastreamento por toque de arame.

Apesar do menor custo, a solução proposta possui limitações. Apresenta-se como principal desvantagem a baixa robustez quando aplicada a posicionamentos que exigem alta precisão, enquanto as tecnologias existentes e consolidadas no mercado apresentam precisão elevada. Contudo, a tecnologia apresentada neste trabalho atende às demandas em que o projeto não exige alta precisão de forma mais viável, como por exemplo, em processos que necessitam o rastreamento de junta de topo com variação lateral e angular.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo minimizar o erro na execução da solda robotizada, devido às falhas de alinhamento das peças, por meio do desenvolvimento de um algoritmo para mapeamento de posições de junta com a utilização de uma proposta mais viável economicamente para atender aplicações específicas no mercado

Os resultados obtidos por meio da visualização da trajetória realizada pelo robô e da análise gráfica dos dados demonstraram que a arquitetura dos componentes proposta, o algoritmo de mapeamento de junta desenvolvido e a programação do manipulador robótico atenderam o propósito do trabalho e foram capazes de realizar o mapeamento das juntas, processamento e envio dos dados ao robô para a realização de uma trajetória com precisão e repetitividade nas três posições de peças estudadas.

Não obstante, o custo para a aplicação da tecnologia proposta mostrou-se inferior ao custo das soluções já existentes no mercado, sendo esse um diferencial positivo do projeto desenvolvido.

As expectativas do presente trabalho foram atendidas e demonstram de forma preliminar a viabilidade de implementação dessa tecnologia para minimizar as falhas do processo de soldagem devido à imprecisão de posicionamento das peças.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos e o conhecimento adquirido no decorrer deste trabalho, sugere-se a continuidade do estudo em alguns aspectos que não puderam ser avaliados, os quais estão listados a seguir:

- implementar a coleta de dados utilizando maior precisão nos valores das coordenadas, isto é, com números decimais;
- aumentar a taxa de amostragem no momento da execução da coleta dos dados;
- aplicar a trajetória executada pelo robô, após a execução do algoritmo, no processo de soldagem MIG/MAG para análise do comportamento da solda;
- aplicar a tecnologia proposta no presente trabalho no processo de soldagem com movimentação de “costura”;
- desenvolver um algoritmo para mapeamento de outras geometrias de junta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, L. R. **Desenvolvimento de um Sistema Mecatrônico para a Manutenção do Arco Elétrico de Sistemas do Tipo MIG/MAG em Processos de Soldagem de Juntas em Configuração T.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2015.

AWS, **American Welding Society. Welding Handbook –Welding Processes**, part 1. Welding Handbook Committee, v. 2, ed. 8, USA, Miami, 1991.

BARA, British Automation & Robot Association. Disponível em: <www.bara.org.uk> Acessado em: julho de 2016.

BAUMGAERTNER FILHO, A. J. **Análise dos parâmetros da polaridade negativa na curva de corrente de soldagem MIG/MAG polaridade variável aplicados à soldagem para revestimento.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2017.

BECKHOFF, 2020. Disponível em: <<http://www.beckhoff.com.br>> Acesso em: outubro de 2020.

Bonacorso, N.G., **Automatização dos Processos de Medição de Superfícies e de Deposição por Soldagem Visando a Recuperação de Rotores de Turbinas Hidráulicas de Grande Porte.** Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2004.

CIRINO, L. M. **Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2009.

COSTA, A. R. F. **Desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta que utiliza o próprio arco como sensor.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2003

DA CRUZ, T. N. **Implementação de sistema adaptativo de solda em linha de produção automotiva.** Dissertação de Mestrado - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento. Curitiba – PR, 2019.

DVS, Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen. DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren. p. 8, 2005.

EDGAR, T. W. **Fundamentals of welding- energy sources used for fusion welding. Metals park:** ASM Metals Handbook, 1993.

FANTUZZI, C.; SECCHI, C.; VISIOLI, A. On the fault detection and isolation of industrial robot manipulators. **IFAC Proceedings**, v. 36, p. 399–404, 2003.

FENERICK, J. A.; VOLANTE, C. R. Evolução das indústrias, os benefícios da

automação e as perspectivas do mercado da robótica no brasil e no mundo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 734–745, 2020.

GALEAZZI, D. **Soldagem MIG/MAG orbital com sensoriamento LASER: análise e melhorias de condições operacionais para aumento da confiabilidade.**

Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2019.

GAN, Z.; TANG, Q. **Visual Sensing and its Applications Integration of LASER Sensors to Industrial Robots**, 2011.

GOMES, B. S. **Automação e Robótica nas Indústrias Brasileiras Um estudo exploratório.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2004.

GONZALEZ, A. R. **Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 1997.

GUILHERME, L. H. **Soldagem: processos e metalurgia.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos - SP , 2011.

GULLCO. Gullco international limited. Product Applications - Shipbuilding Building, 2010. Disponível em: <https://www.westermans.com/gullcowelding>. Acesso em: outubro de 2020.

IFTOMM - International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science, 2015. Disponível em: <http://www.iftomm2015.tw/> Acesso em: outubro de 2020.

ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices -- Vocabulary. 2012. Disponível em: www.iso.org.br Acessado em outubro de 2020.

KEYENCE, 2020. Disponível em: <http://www.keyence.com.br> Acesso em: outubro de 2020.

KINDERMANN, R. M. **Soldagem orbital do passe de raiz – algoritmos para controle adaptativo por meio de sensoriamento LASER.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016.

KUO, H.C.; L.J. WU. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic. **Journal of Materials Processing Technology**, v.120, p. 169-185, 2002.

LATHABAI, S. **Joining of aluminium and its alloys.** Process Science and Engineering, Woodhead Publishing Limited, Austrália 2011.

LOSCHI; LIAL, R. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/RafaelLial/automaio-industrial-encoder-transdutor-de-posio-angular>. Acesso em: novembro de 2020.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**, p. 430, 1996.

MAHMUD, D. A. **O uso de robótica educacional como motivação a aprendizagem de matemática**. Dissertação de Mestrado, Unidade Federal do Amapá, Macapá. 2017.

MAIA, D. V. A. **Automação Industrial e Robótica**, Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17829/material/ARTIGO08.pdf> Acessado em: 07 de novembro de 2020.

MARQUES, P. V. Ç.; MODENESI, P. J. Ç.; BRACARANESE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Segunda edição. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MATHERS, G. **The welding of aluminium alloys**, Cambridge, Woodhead, 2002.

MATTEI, F. **Desenvolvimento de Equipamento para Estudo de Soldagem por Fricção**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2011.

MENDONÇA, F. K. **Evolução da técnica de seguimento de junta via sensoriamento do arco para operações de soldagem em posições forçadas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2013.

MIRANDA, H. C.; FERRARESI, V. A. Identificação da transferência metálica na soldagem MIG/MAG pulsada de aço inoxidável a partir de um sensor óptico, 2º **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, Uberlândia, maio de 2003.

MODENESI, P.J, MARQUES, P. V. **Soldagem I – Introdução aos Processos de Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem, Soldagem I**, p. 1, 2006.

MOREIRA, A. F.; GALLEGO, J.; TOKIMATSU, R.; YAMAKAKI, W. A. **Caracterização de revestimentos soldados com arame tubular**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, p. 5330-5340, 2006.

NAYAK, N.; RAY, A. **Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding**, Springer-Verlag London, 1993.

NENTWICH, C.; JUNKER, S.; REINHART, G. Data-driven models for fault classification and prediction of industrial robots. **Procedia CIRP**, v. 93, p. 1055–1060, 2020.

NETO, E. F. C. **Desenvolvimento de método para projeto modular de célula de manufatura robotizada com programação no nível de tarefas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife -PE, 2013.

NOF, S. Y. **Handbook of industrial robotics**. Indiana, USA: John Wiley & Sons,

1999.

OLIVEIRA, A. M. **Encoder**. Instituto Federal de Educação Tecnológica do Mato Grosso- IFMT, Cuiabá - MT- 2007.

OLIVEIRA, J. E. L. **Introdução a Automação Robotizada**. Centro Universitário Selesiano de São Paulo. Unisal, campus Americana. Disponível em: <www.cptec.br/stm-4/pdf/auto2.pdf>. Acessado em : setembro de 2020.

OTC Daihen, 2020. Disponível em: <<https://www.daihen-usa.com/products/>> Acesso em: outubro de 2020.

RANIEL, T. **Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Controle de Posição e Velocidade De uma Esteira Transportadora usando Inversor de Frequência e Microcontrolador**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, São Paulo - SP, 2011.

RIA, **Robotic Industries Association**. Disponível em:<www.robotics.org> Acessado em outubro de 2020.

ROMANO, V. F. **Robótica industrial: aplicação na indústria de manufatura e de processos**. Editora Edgard Blucher, 2002.

ROSARIO, J. M. **Princípios de mecatrônica**. 1 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

ROUT, A.; DEEPAK, B. B. V. I.; BISWAL, B. B. **Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. Robotics and Computer Integrated Manufacturing**, v. 56, p. 12-37, 2019.

SAMPAIO, D. **Automação do Monitoramento da Qualidade do Processo de Solda a Ponto Resistiva**, Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo - SP, 2010.

SANTOS, F. L. M. **Modelagem e simulação de robôs seriais baseada em helicoides**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 2017.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SICILIANO, B. e KHATIB, O. **Springer Handbook of Robotics**, California, USA: Springer Science & Business Media, v. 1, ed. 1, Califória, 2008.

WAINER, E. Ç.; BRANDI, S. D. Ç.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgar Bluncher, 1992.

WANG, B.; HU, J.; SUN, L; FREIHEIT, T. **Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives, Journal of Manufacturing Systems**, v. 56, p. 373-391, 2020.

XU, Y.; YU, H.; ZHONG, J.; LIN, T.; CHEN, S. .Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor. **Journal of Materials Processing Technology**, V. 212, p. 1654-1662, 2012.

YE, Z.; FANG, G.; CHEN, S.; ZOU, J. J.Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG welding. International **Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 67, p. 1987-1996, 2012.

APÊNDICE 1 – PROGRAMA AUTOSTART4.PC

```
.PROGRAM autostart4.pc() #0
  y_lsb_pos_x = 1
  y_lsb_pos_y = 17
  y_lsb_pos_z = 33
  b_pos_monit = FALSE
loop:
  WHILE (m_pos_monit_on) DO
    b_pos_monit = TRUE
  IF (b_pos_monit) THEN
    DECOMPOSE pm[1] = HERE
    FOR .i = 1 TO 3
      p[.i] = ROUND(pm[.i])
    END
    BITS y_lsb_pos_x,16 = p[1]
    BITS y_lsb_pos_y,16 = p[2]
    BITS y_lsb_pos_z,16 = p[3]
    TWAIT 0.25
  END
END
b_pos_monit = FALSE
TWAIT 0.1
GOTO loop
.END
```

APÊNDICE 2 – PROGRAMA VALUE.PRG

```

PROGRAM VALUE
VAR_INPUT
    EixoX : ARRAY[0..1] OF BYTE;
    EixoY : ARRAY[0..1] OF BYTE;
    EixoZ : ARRAY[0..1] OF BYTE;
    PX1 : INT;
    PY1 : INT;
    PZ1 : INT;
    PX2 : INT;
    PY2 : INT;
    PZ2 : INT;
END_VAR
VAR
    ValorEixoX : INT;
    ValorEixoY : INT;
    ValorEixoZ : INT;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    PX1Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
    PY1Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
    PZ1Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
    PX2Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
    PY2Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
    PZ2Out : ARRAY[0..1] OF
BYTE;
END_VAR
ValorEixoX.0 := EixoX[0].0;
ValorEixoX.1 := EixoX[0].1;
ValorEixoX.2 := EixoX[0].2;
ValorEixoX.3 := EixoX[0].3;
ValorEixoX.4 := EixoX[0].4;
ValorEixoX.5 := EixoX[0].5;
ValorEixoX.6 := EixoX[0].6;
ValorEixoX.7 := EixoX[0].7;
ValorEixoX.8 := EixoX[1].0;
ValorEixoX.9 := EixoX[1].1;
ValorEixoX.10:= EixoX[1].2;
ValorEixoX.11:= EixoX[1].3;
ValorEixoX.12:= EixoX[1].4;
ValorEixoX.13:= EixoX[1].5;
ValorEixoX.14:= EixoX[1].6;
ValorEixoX.15:= EixoX[1].7;

ValorEixoY.0 := EixoY[0].0;
ValorEixoY.1 := EixoY[0].1;
ValorEixoY.2 := EixoY[0].2;
ValorEixoY.3 := EixoY[0].3;
ValorEixoY.4 := EixoY[0].4;
ValorEixoY.5 := EixoY[0].5;
ValorEixoY.6 := EixoY[0].6;
ValorEixoY.7 := EixoY[0].7;
ValorEixoY.8 := EixoY[1].0;
ValorEixoY.9 := EixoY[1].1;
ValorEixoY.10:= EixoY[1].2;
ValorEixoY.11:= EixoY[1].3;
ValorEixoY.12:= EixoY[1].4;

```

```
PY1Out[0].0 := PY1.0;  
PY1Out[0].1 := PY1.1;  
PY1Out[0].2 := PY1.2;  
PY1Out[0].3 := PY1.3;  
PY1Out[0].4 := PY1.4;  
PY1Out[0].5 := PY1.5;  
PY1Out[0].6 := PY1.6;  
PY1Out[0].7 := PY1.7;  
PY1Out[1].0 := PY1.8;  
PY1Out[1].1 := PY1.9;  
PY1Out[1].2 := PY1.10;  
PY1Out[1].3 := PY1.11;  
PY1Out[1].4 := PY1.12;  
PY1Out[1].5 := PY1.13;  
PY1Out[1].6 := PY1.14;  
PY1Out[1].7 := PY1.15;
```

```
PY2Out[0].0 := PY2.0;  
PY2Out[0].1 := PY2.1;  
PY2Out[0].2 := PY2.2;  
PY2Out[0].3 := PY2.3;  
PY2Out[0].4 := PY2.4;  
PY2Out[0].5 := PY2.5;  
PY2Out[0].6 := PY2.6;  
PY2Out[0].7 := PY2.7;  
PY2Out[1].0 := PY2.8;  
PY2Out[1].1 := PY2.9;  
PY2Out[1].2 := PY2.10;  
PY2Out[1].3 := PY2.11;  
PY2Out[1].4 := PY2.12;  
PY2Out[1].5 := PY2.13;  
PY2Out[1].6 := PY2.14;  
PY2Out[1].7 := PY2.15;
```

ValorEixoY.13:= EixoY[1].5;
ValorEixoY.14:= EixoY[1].6;
ValorEixoY.15:= EixoY[1].7;

ValorEixoZ.0 := EixoZ[0].0;
ValorEixoZ.1 := EixoZ[0].1;
ValorEixoZ.2 := EixoZ[0].2;
ValorEixoZ.3 := EixoZ[0].3;
ValorEixoZ.4 := EixoZ[0].4;
ValorEixoZ.5 := EixoZ[0].5;
ValorEixoZ.6 := EixoZ[0].6;
ValorEixoZ.7 := EixoZ[0].7;
ValorEixoZ.8 := EixoZ[1].0;
ValorEixoZ.9 := EixoZ[1].1;
ValorEixoZ.10:= EixoZ[1].2;
ValorEixoZ.11:= EixoZ[1].3;
ValorEixoZ.12:= EixoZ[1].4;
ValorEixoZ.13:= EixoZ[1].5;
ValorEixoZ.14:= EixoZ[1].6;
ValorEixoZ.15:= EixoZ[1].7;

PX1Out[0].0 := PX1.0;
PX1Out[0].1 := PX1.1;
PX1Out[0].2 := PX1.2;
PX1Out[0].3 := PX1.3;
PX1Out[0].4 := PX1.4;
PX1Out[0].5 := PX1.5;
PX1Out[0].6 := PX1.6;
PX1Out[0].7 := PX1.7;
PX1Out[1].0 := PX1.8;
PX1Out[1].1 := PX1.9;
PX1Out[1].2 := PX1.10;
PX1Out[1].3 := PX1.11;
PX1Out[1].4 := PX1.12;
PX1Out[1].5 := PX1.13;
PX1Out[1].6 := PX1.14;
PX1Out[1].7 := PX1.15;

PX2Out[0].0 := PX2.0;
PX2Out[0].1 := PX2.1;
PX2Out[0].2 := PX2.2;
PX2Out[0].3 := PX2.3;
PX2Out[0].4 := PX2.4;
PX2Out[0].5 := PX2.5;
PX2Out[0].6 := PX2.6;
PX2Out[0].7 := PX2.7;
PX2Out[1].0 := PX2.8;
PX2Out[1].1 := PX2.9;
PX2Out[1].2 := PX2.10;
PX2Out[1].3 := PX2.11;
PX2Out[1].4 := PX2.12;
PX2Out[1].5 := PX2.13;
PX2Out[1].6 := PX2.14;

PZ1Out[0].0 := PZ1.0;
PZ1Out[0].1 := PZ1.1;
PZ1Out[0].2 := PZ1.2;
PZ1Out[0].3 := PZ1.3;
PZ1Out[0].4 := PZ1.4;
PZ1Out[0].5 := PZ1.5;
PZ1Out[0].6 := PZ1.6;
PZ1Out[0].7 := PZ1.7;
PZ1Out[1].0 := PZ1.8;
PZ1Out[1].1 := PZ1.9;
PZ1Out[1].2 := PZ1.10;
PZ1Out[1].3 := PZ1.11;
PZ1Out[1].4 := PZ1.12;
PZ1Out[1].5 := PZ1.13;
PZ1Out[1].6 := PZ1.14;
PZ1Out[1].7 := PZ1.15;

PZ2Out[0].0 := PZ2.0;
PZ2Out[0].1 := PZ2.1;
PZ2Out[0].2 := PZ2.2;
PZ2Out[0].3 := PZ2.3;
PZ2Out[0].4 := PZ2.4;
PZ2Out[0].5 := PZ2.5;
PZ2Out[0].6 := PZ2.6;
PZ2Out[0].7 := PZ2.7;
PZ2Out[1].0 := PZ2.8;
PZ2Out[1].1 := PZ2.9;
PZ2Out[1].2 := PZ2.10;
PZ2Out[1].3 := PZ2.11;
PZ2Out[1].4 := PZ2.12;
PZ2Out[1].5 := PZ2.13;
PZ2Out[1].6 := PZ2.14;
PZ2Out[1].7 := PZ2.15;

APÊNDICE 3 – PROGRAMA PRA EXPORTAÇÃO DE ARQUIVO .CSV

```

PROGRAM EXPORT_TO_CSV
VAR CONSTANT
    MAX_CSV_ROWS    : UDINT := 11;
    MAX_CSV_COLUMNS : UDINT := 100;
END_VAR
VAR_INPUT
    Database    : ARRAY[0..MAX_CSV_ROWS,0..MAX_CSV_COLUMNS]    OF
STRING;
END_VAR
VAR
    bWrite: BOOL := FALSE;(* Rising edge starts program execution *)
    sNetId: T_AmsNetId := '192.168.15.8.1.1';    (* TwinCAT system network
address *)
    sFileName      : T_MaxString := 'C:\Posicao1.csv';(* CSV destination file path
and name *)
    sCSVLine       : STRING(1024) := ";(* Single CSV text line (row, record), we
are using string as record buffer (your are able to see created fields) *)
    sCSVField      : T_MaxString := ";(* Single CSV field value (column, record
field) *)
    bBusy          : BOOL;
    bError         : BOOL;
    nErrId         : UDINT;
    nRow           : UDINT    := 0;(* Row number (record) *)
    nColumn        : UDINT    := 0;(* Column number (record field) *)
    hFile          : UINT     := 0;(* File handle of the source file *)
    step           : DWORD    := 0;
    fbFileOpen     : FB_FileOpen;(* Opens file *)
    fbFileClose    : FB_FileClose;(* Closes file *)
    fbFileWrite    : FB_FileWrite; (* Writes one record (line) *)
    fbWriter       : FB_CSVMemBufferWriter;
END_VAR

```

CASE step OF

```

0:  (* Wait for rising edge at bWrite variable *)
    IF bWrite THEN
        bWrite          := FALSE;
        bBusy           := TRUE;
        bError          := FALSE;
        nErrId         := 0;
        hFile           := 0;
        nRow            := 0;
        nColumn         := 0;
        step            := 1;
    END_IF
1:  (* Open source file *)
    fbFileOpen( bExecute := FALSE );
    fbFileOpen( sNetId := sNetId, sPathName := sFileName,
    nMode := FOPEN_MODEWRITE OR FOPEN_MODETEXT,
    ePath := PATH_GENERIC, bExecute := TRUE );
    step := 2;
2:(* Wait until open not busy *)
    fbFileOpen( bExecute := FALSE, bError => bError, nErrID => nErrID,
    hFile => hFile );
    IF NOT fbFileOpen.bBusy THEN
        IF NOT fbFileOpen.bError THEN
            step := 3;
        ELSE(* Error: file not found? *)
            step := 100;
        END_IF
    END_IF
3:(* Convert one PLC record to CSV format *)
    sCSVLine := "";
    fbWriter.eCmd := eEnumCmd_First;(* Write first field value *)
    IF nRow <= MAX_CSV_ROWS THEN
        FOR nColumn := 0 TO MAX_CSV_COLUMNS BY 1 DO
sCSVField := STRING_TO_CSVFIELD( database[ nRow, nColumn ], FALSE );

```

```

fbWriter(   pBuffer := ADR( sCSVLine ), cbBuffer := SIZEOF( sCSVLine ) - 1,
            putValue := sCSVField, pValue := 0, cbValue := 0,
            bCRLF := ( nColumn = MAX_CSV_COLUMNS ) );
            IF fbWriter.bOk THEN
                fbWriter.eCmd := eEnumCmd_Next;
            ELSE(* Error *)
                step := 100;
                RETURN;
            END_IF
        END_FOR(* FOR nColumn := 0... *)
        IF RIGHT( sCSVLine, 2 ) = '$R$L' THEN
            sCSVLine := REPLACE( sCSVLine, '$L', 2, LEN( sCSVLine ) - 1 );
        END_IF
        nRow := nRow + 1;(* Increment number of created records (rows) *)
        step := 4;(* Write record to the file *)
    ELSE(* All rows written => Close file *)
        step := 10;
    END_IF
4:   (* Write single text line *)
    fbFileWrite(sNetId:= sNetId, hFile:= hFile, pWriteBuff:= ADR(sCSVLine),
               cbWriteLen:= SIZEOF(sCSVLine), bExecute:= TRUE);
    step := 5;
5:(* Wait until write not busy *)
    fbFileWrite(bExecute:= FALSE, bError => bError, nErrID => nErrID );
    IF NOT fbFileWrite.bBusy THEN
        IF NOT fbFileWrite.bError THEN
            step := 3;(* Write next record *)
        ELSE(* Error *)
            step := 100;
        END_IF
    END_IF
END_IF

```

```
10: (* Close source file *)
    fbFileClose( bExecute := FALSE );
    fbFileClose( sNetId := sNetId, hFile := hFile, bExecute := TRUE );
    step := 11;
11:(* Wait until close not busy *)
    fbFileClose( bExecute := FALSE, bError => bError, nErrID => nErrID );
    IF ( NOT fbFileClose.bBusy ) THEN
        hFile := 0;
        step := 100;
    END_IF
100: (* Error or ready step => cleanup *)
    IF ( hFile <> 0 ) THEN
        step := 10; (* Close the source file *)
    ELSE
        bBusy := FALSE;
        step := 0;    (* Ready *)
    END_IF
END CASE
```

APÊNDICE 4 – CUSTOS DE SOLUÇÕES SIMILARES



KEYENCE BRASIL COMÉRCIO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA
 Av. Brigadeiro Faria Lima, 4221, 7º Andar, Cjto 71/72 - Itaim Bibi
 São Paulo/SP Tel: +55(11)3045-4011
 CNPJ: 13.743.249/0001-39

Orçamento

Contato: Leonardo Andrighetti
 E-mail: leonardo.andrighetti@sumig.com
 Destinatário: SUMIG ROBOTICA E AUTOMACAO LTDA
 R TENENTE CORONEL DURVAL DE ALVARENGA SOUTTO MAYOR 1449
 CAXIAS DO SUL - RS
 95042-560
 C.N.P.J.: 12.755.329/0001-41

Orçamento: 10139320
 Data Orçamento: 25/05/2021

Contato Sales Engineer: Giovanni Caprio
 tel.: (41)9.9228-0425
 e-mail: giovanni.caprio@keyence.com.br

- O NUMERO DESTE ORÇAMENTO DEVE SER MENCIONADO NA ORDEM DE COMPRA.
 - TODOS OS PEDIDOS DEVERAO SER ENVIADOS PARA O E-MAIL PEDIDOS@KEYENCE.COM.BR E VENDEDOR RESPONSÁVEL EM COPIA.
 - Valor da proposta em Reais (R\$)
 - Não concordamos com nenhum tipo de custo transacional
 - De acordo com as alterações promovidas no Regulamento do ICMS pelo Decreto nº 65.253/2020, o contribuinte paulista que calcula hoje nas operações internas 12% a título de ICMS, passara a calcular 13,3% a partir de 15/01/2021.
 - Valores unitários sujeitos a ajuste após esta data em decorrência do aumento do imposto.

Agradecemos a oportunidade de oferecer um orçamento para o(s) seguinte(s) produto(s)

| Item | Cód. Prod. | Descrição | UN | Preço Unit | Qtd | Preço Total S/ IPI | % IPI | % ICMS | % ICMS ST | NCM |
|------|------------|---|----|------------|------|-----------------------|-------|--------|--------------|----------|
| 01 | LJ-V7001 | SENSOR DE DESLOCAMENTO DE LA SER 2D (CONTROLADOR) | UN | 27.674,35 | 1,00 | 27.674,35 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 90314990 |
| 02 | LJ-V7080 | SENSOR DE DESLOCAMENTO A LAS ER (CABECOTE DO SENSOR) | UN | 43.653,03 | 1,00 | 43.653,03 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 90132000 |
| 03 | LJ-H3 | CD-ROM, SOFTWARE PARA PC PAR A SERIE LJ-V | UN | 5.618,73 | 1,00 | 5.618,73 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 85234920 |
| 04 | CB-B10 | CABO 10 METROS | UN | 2.451,01 | 1,00 | 2.451,01 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 85444200 |

Disponibilidade: **Em até 10 dias úteis após aceite do pedido de compras**

Cond. de Entrega: (X) CIF () FOB

Cond. Pagamento: 28 E 42 DIAS - sujeito a análise de crédito.

Finalidade do material: **INDUSTRIALIZAÇÃO**

Validade do Orçamento: 04/06/2021

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| Total Mercadoria¹ | 79.397,12 |
| IPI | 8.897,03 |
| ICMS-ST | 0,00 |
| Frete | 0,00 |
| Total (COM IMPOSTOS) | 88.294,15 |

¹ Os impostos mencionados abaixo estão inclusos no valor total da mercadoria.

| | |
|---------------|----------|
| ICMS | 3.175,87 |
| PIS | 1.310,05 |
| COFINS | 6.034,18 |

O prazo de entrega é previsto, em casos de incidente com transporte fora de nosso controle, este sofrerá alteração e será informada uma nova previsão. Aplicados os Termos e as Condições da Keyence Brasil. Entre em contato conosco para obter mais informações. A Keyence Brasil não presta serviços de integração e instalação.



KEYENCE BRASIL COMÉRCIO DE PRODUTOS ELETRÔNICOS LTDA
 Av. Brigadeiro Faria Lima, 4221, 7º Andar, Cjto 71/72 - Itaim Bibi
 São Paulo/SP Tel: +55(11)3045-4011
 CNPJ: 13.743.249/0001-39

Orçamento

Contato: Leonardo Andrighetti
 E-mail: leonardo.andrighetti@sumig.com
 Destinatário: SUMIG ROBOTICA E AUTOMACAO LTDA
 R TENENTE CORONEL DURVAL DE ALVARENGA SOUTTO MAYOR 1449
 CAXIAS DO SUL - RS
 95042-560
 C.N.P.J.: 12.755.329/0001-41

Orçamento: 10139319
 Data Orçamento: 25/05/2021

Contato Sales Engineer: Giovanni Caprio
 tel.: (41)9.9228-0425
 e-mail: giovanni.caprio@keyence.com.br

- O NUMERO DESTE ORCAMENTO DEVE SER MENCIONADO NA ORDEM DE COMPRA.
- TODOS OS PEDIDOS DEVERAO SER ENVIADOS PARA O E-MAIL PEDIDOS@KEYENCE.COM.BR E VENDEDOR RESPONSAVEL EM COPIA.
- Valor da proposta em Reais (R\$)
- Nao concordamos com nenhum tipo de custo transaccional
- De acordo com as alteracoes promovidas no Regulamento do ICMS pelo Decreto nº 65.253/2020, o contribuinte paulista que calcula hoje nas operacoes internas 12% a titulo de ICMS, passara a calcular 13,3% a partir de 15/01/2021.
- Valores unitarios sujeitos a ajuste apos esta data em decorrenca do aumento do imposto.

Agradecemos a oportunidade de oferecer um orçamento para o(s) seguinte(s) produto(s)

| Item | Cód. Prod. | Descrição | UN | Preço Unit | Qtd | Preço Total S/ IPI | % IPI | % ICMS | % ICMS ST | NCM |
|------|------------|--|----|------------|------|--------------------|-------|--------|-----------|----------|
| 01 | CV-X420F | SISTEMA DE VISAO DE ALTA VELOCIDADE E ALTA CAPACIDADE | UN | 22.066,28 | 1,00 | 22.066,28 | 10,00 | 4,00 | 0,00 | 85437039 |
| 02 | CA-H200MX | CAMERA DE ALTA VELOCIDADE PARA SISTEMA DE VISAO | UN | 14.884,73 | 1,00 | 14.884,73 | 20,00 | 4,00 | 0,00 | 85258029 |
| 03 | CA-CH5 | CABO DE CAMERA ALTA VELOCIDADE 5M, CONECTOR RETO | UN | 1.068,59 | 1,00 | 1.068,59 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 85444200 |
| 04 | CA-LHR16 | LENTE ALTA RESOLUCAO E BAIXA DISTORCAO, 16MM | UN | 4.495,68 | 1,00 | 4.495,68 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 90021900 |
| 05 | CA-DC60E | MODULO DE EXPANSAO PARA ILUMINACAO LUMITRAX E MULTI-SPECTRUM | UN | 2.631,70 | 1,00 | 2.631,70 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 85371090 |
| 06 | CA-D5MX | CABO PARA ILUMINACAO MULTI SPECTRUM (5 METROS) | UN | 695,10 | 1,00 | 695,10 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 85444200 |
| 07 | CA-DQP12X | ILUMINACAO, TIPO QUADRADA DI RETA, 125 X 125 MM | UN | 10.951,01 | 1,00 | 10.951,01 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 94054090 |
| 08 | OP-88379 | PLACA DE CALIBRACAO - 125 MM | UN | 397,69 | 1,00 | 397,69 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 73269090 |
| 09 | OP-51612 | CONJUNTO DE ESPACADORES (CAMERA DA SERIE CV-X) | UN | 311,24 | 1,00 | 311,24 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 90319090 |
| 10 | CA-DRM10X | ILUMINACAO MULTI-SPECTRUM 100MM | UN | 9.729,11 | 1,00 | 9.729,11 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 94054090 |
| 11 | CA-DSW7 | ILUMINACAO BRANCA, TIPO BACK-LIGHT, 97X78MM | UN | 4.149,86 | 1,00 | 4.149,86 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 94054090 |
| 12 | CA-DC40E | UNIDADE DE EXPANSAO ILUMINACAO LED | UN | 2.005,76 | 1,00 | 2.005,76 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 85371090 |
| 13 | CA-DBW12W | ILUMINACAO BRANCA, TIPO BARRA, 132X41MM | UN | 4.530,26 | 1,00 | 4.530,26 | 15,00 | 4,00 | 0,00 | 94054090 |
| 14 | CA-D5 | CABO DE EXTENSAO DE ILUMINACAO 5M | UN | 138,33 | 1,00 | 138,33 | 5,00 | 4,00 | 0,00 | 85444200 |

Disponibilidade: Item(ns) 11 - 13 - Em até 10 dias úteis após aceite do pedido de compras, demais produto(s): Pronta entrega (Sujeito a alteração após aceite do pedido de compra)
 Cond. de Entrega: (X) CIF () FOB
 Cond. Pagamento: 28 E 42 DIAS - sujeito a análise de crédito.
 Finalidade do material: **INDUSTRIALIZAÇÃO**
 Validade do Orçamento: 04/06/2021

| | |
|-------------------------------|------------------|
| Total Mercadoria ¹ | 78.055,34 |
| IPI | 11.119,27 |
| ICMS-ST | 0,00 |
| Frete | 0,00 |
| Total (COM IMPOSTOS) | 89.174,61 |

¹ Os impostos mencionados abaixo estão incluídos no valor total da mercadoria.

| | |
|--------|----------|
| ICMS | 3.122,15 |
| PIS | 1.287,91 |
| COFINS | 5.932,20 |

O prazo de entrega é previsto, em casos de incidente com transporte fora de nosso controle, este sofrerá alteração e será informada uma nova previsão.