



**INSTITUTO
FEDERAL**
Piauí

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LEONARDO MONTEIRO AMARAL

**PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM
LINHAS DE PRODUÇÃO DE TUBOS E PERFIS COM VISÃO COMPUTACIONAL
E RASPBERRY PI/OPENCV**

TERESINA

2023

LEONARDO MONTEIRO AMARAL

PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM
LINHAS DE PRODUÇÃO DE TUBOS E PERFIS COM VISÃO COMPUTACIONAL E
RASPBERRY PI/OPENCV

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Orientador: Prof. Me. Mário Viana Medeiros Filho.

TERESINA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Amaral, Leonardo Monteiro

A485p Proposta de automação da identificação de juntas soldadas em linhas de produção de tubos e perfis com visão computacional e raspberry Pi opencv / Leonardo Monteiro Amaral. - 2023.
37 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central, 2023.

Orientador : Prof Me. Mário Viana Medeiros Filho.

1. Juntas soldadas. 2. Inspeção. 3. Tubos. 4. Perfis. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

LEONARDO MONTEIRO AMARAL

PROPOSTA DE AUTOMAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS EM
LINHAS DE PRODUÇÃO DE TUBOS E PERFIS COM VISÃO COMPUTACIONAL E
RASPBERRY PI/OPENCV

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Aprovada em: 21 / 06 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Mario Viana Medeiros Filho (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Antônio Ítalo Rodrigues Pedrosa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Heinrich Hertz Silva
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Aos pais, amigos e professores.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, seja com ideias, apoio ou incentivo. Agradeço aos professores da instituição que me ensinaram e ajudaram a desenvolver as habilidades necessárias para a realização deste projeto. Agradeço também aos amigos e familiares que sempre me apoiaram e encorajaram durante todo o processo. E por fim, agradeço a todos os colegas que gentilmente dedicaram o seu tempo para fornecer informações valiosas para este trabalho.

“We live in a society exquisitely dependent
on science and technology, in which hardly
anyone knows anything about science and
technology.”

Carl Sagan

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema para inspecionar juntas soldadas em linhas de produção industrial de tubos e perfis. O sistema é baseado em técnicas de visão computacional e é capaz de detectar não conformidades em tempo real. Os resultados mostraram que, de 300 testes realizados, o sistema teve uma taxa de erro de 4,67%, indicando que ele pode identificar anomalias na maioria dos casos. No entanto, houve 14 erros do tipo dois, demonstrando que ainda há espaço para melhorias na redução desses erros. Além disso, os dados também mostraram que a maioria dos erros ocorreu em material galvanizado, seguido por material laminado a frio e a quente. Apesar de alcançar uma taxa de precisão de 95,33%, o sistema ainda apresenta uma vulnerabilidade, principalmente em materiais de tonalidade mais clara. Isso se deve à maior refletividade do material, o que pode causar dificuldades no reconhecimento, levando a falha. O potencial do sistema para uso em ambientes de difícil acesso, de modo a contribuir à segurança do pessoal operacional, também é destacado. Pesquisas futuras podem investigar métodos de detecção não baseados em tingimento, o que pode reduzir os custos operacionais, já que o processo de tingimento envolve um custo em tempo e dinheiro. Portanto, o sistema apresentado é uma solução promissora para detectar juntas soldadas em linhas de produção industrial, além de abrir margem para novas pesquisas.

Palavras-Chave: juntas soldadas; inspeção; tubos; perfis; automação.

ABSTRACT

This work presents a system for inspecting welded joints in industrial production lines of tubes and profiles. The system is based on computer vision techniques and is capable of detecting non-conforming products in real-time. The results showed that out of 300 tests performed, the system had an error rate of 4.67%, indicating that it can identify non-conforming products in most cases. However, there were 14 type-two errors, demonstrating that there is still room for improvement in reducing these errors. Furthermore, the data also showed that most errors occurred in galvanized material, followed by cold and hot-refined material. Despite achieving an accuracy rate of 95.33%, the system still has a vulnerability, mainly in lighter-toned materials. This is due to the higher reflectivity of the material, which can cause difficulties in recognition, leading to a test failure. The system's potential for use in difficult-to-reach environments, which can increase operational staff safety, is also highlighted. Future research can investigate non-dye-based detection methods, which can reduce operating costs, as the dyeing process involves a cost in time and money. Therefore, the presented system is a promising solution for detecting non-conforming products in industrial production lines, and the study opens up several avenues for future research.

Keywords: welded joints; inspection; pipes, steel profiles; automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Solda para reabastecimento.	19
Figura 2 - Chapas com e sem a pintura.	20
Figura 3 - Empacotadeira automática.	20
Figura 4 - Painel e chave de remoção de produto não conforme.....	21
Figura 5 - Garra para remoção de produto não conforme.	21
Figura 6 - Visão da câmera em perspectiva.	22
Figura 7 - Versão simplificada da disposição dos componentes.	23
Figura 8 - Corpos de prova utilizados.....	25
Figura 9 - Rastreio das posições ao longo dos frames.	266
Figura 10 – Configuração do ambiente de testes.....	27
Figura 11 – Gráfico da velocidade do corpo em função do tempo	278
Figura 12 – Sistema reconhecendo a junta soldada durante um dos testes	29
Figura 13 - Efeito do reflexo no sensor.	30
Figura 14 – Trecho do código que determina a área mínima	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos erros por matéria prima.....	29
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	15
2.2	VISÃO COMPUTACIONAL	15
2.3	RASPBERRY PI	16
2.4	OPENCV	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	DEFINIÇÃO DE PRODUTO NÃO CONFORME	19
3.2	PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PRODUTO NÃO CONFORME	20
3.3	DETERMINAÇÃO DOS COMPONENTES	21
3.4	DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES	22
3.5	ELABORAÇÃO DO CÓDIGO EM PYTHON	23
3.6	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	24
4	RESULTADOS	28
5	CONCLUSÃO	31
5.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA	32
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	32
	REFERÊNCIAS	33
	APÊNDICE A – ALGORITMO PARA TESTES	35
	APÊNDICE B – ALGORITMO DEFINITIVO	36

1 INTRODUÇÃO

A inspeção visual é uma técnica amplamente utilizada na avaliação de componentes e estruturas para detecção de anomalias superficiais e subsuperficiais que possam afetar o desempenho ou o uso do objeto inspecionado. Essa análise consiste em inspecionar o objeto com o uso do olho humano com ou sem o auxílio lentes de aumento para a detecção de anomalias. É considerado o método mais comum e fundamental para detecção de defeitos e descontinuidades (CHAKRABORTY, 2018; KUMAR, 2020).

O campo da visão computacional surgiu com o objetivo de replicar a visão humana e automatizar tarefas que exigem análise e compreensão visual. Essa área utiliza tecnologias para adquirir e digitalizar imagens ou vídeos de objetos ou cenas, por meio de câmeras, e extrair informações dessas imagens por meio de técnicas de processamento de imagem. A aplicação desses conceitos e métodos na indústria é conhecida como visão computacional, abrangendo qualquer uso de técnicas de visão para realizar tarefas industriais. A inspeção visual automatizada é a área mais desenvolvida da visão computacional, usada para verificar a qualidade de produtos fabricados (SZKILNYK, 2012; LEVINE, 1985).

O aumento da competitividade nas indústrias tem incentivado o desenvolvimento de estratégias para otimizar processos e cadeias de valor. Como resultado, a utilização da visão computacional na indústria vem crescendo nos últimos anos, abrangendo diversos campos. Isso ocorre porque métodos da visão computacional são usados como base para o desenvolvimento de tecnologias amplamente utilizadas, como mapeamento e localização visual simultânea, rastreamento de objetos e identificação de não conformidades, entre outras. Portanto, este trabalho propõe um sistema que utiliza ferramentas de visão computacional para aumentar a eficiência e confiabilidade do processo de inspeção visual em uma industrial local (MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017; KAKANI et al, 2020).

A soldagem é um processo inerente à fabricação de tubos e perfis de aço para realização do abastecimento da máquina. Entretanto, em diferentes circunstâncias, pode ser necessária a remoção dos produtos soldados. No caso dos perfis, eles são rejeitados por se tratarem de elementos estruturais. Já em relação aos tubos, a decisão de remover ou não os produtos soldados é deixada a critério do cliente, a fim de atender às suas necessidades específicas.

Para identificar e remover com precisão produtos soldados, é necessário que o operador esteja sempre atento, especialmente em linhas que operam em altas velocidades. Identificar produtos soldados em tais linhas pode se tornar uma atividade desafiadora. Uma vez que, a fadiga e a necessidade de agilidade podem comprometer a avaliação do operador. Com isso em mente, o projeto visa propor como alternativa um sistema para identificação de juntas soldadas de forma automática por meio do uso de visão computacional.

A identificação de juntas soldadas em tubos e perfis é um processo recorrente no dia a dia da indústria manufatureira. Atualmente, no Brasil é comum que muitos processos como esse sejam realizados de forma manual, o que pode levar a imprecisões e erros humanos. Além disso, o processo manual por vezes faz com que o operador tenha que se colocar em situações de risco, especialmente em linhas que operam em altas velocidades. Portanto, há uma necessidade de desenvolver alternativas eficientes e automatizadas para a identificação de juntas soldadas em tubos e perfis (YAMADA; MARTINS, 2019).

A visão computacional é uma tecnologia que vem ganhando popularidade em muitos setores industriais. Ela usa algoritmos de processamento de imagem para analisar e interpretar imagens digitais, tornando possível a detecção de objetos e a identificação de características específicas em uma imagem. Em particular, a aplicação da visão computacional na identificação de juntas soldadas em tubos e perfis pode melhorar significativamente a segurança, precisão e eficiência do processo de identificação. Além disso, a tecnologia pode ser implementada em um sistema automatizado, reduzindo o tempo e o custo do processo (MARTINS; JUNIOR, 2011).

Com base nesse contexto, o objetivo deste projeto é propor uma alternativa para a identificação de juntas soldadas em tubos e perfis utilizando visão computacional. O projeto visa explorar a aplicação da visão computacional na detecção de juntas soldadas em tubos e perfis, identificando os requisitos técnicos e operacionais para a implementação da tecnologia. Com o desenvolvimento de um sistema automatizado de processamento de imagem, espera-se melhorar a qualidade e a eficiência do processo de identificação de juntas soldadas, reduzindo os custos associados ao processo manual e aumentando a competitividade das empresas que atuam nesse mercado.

Diante dos problemas identificados, foram elaboradas hipóteses com o objetivo de compreendê-los, solucioná-los e comprovar ou refutar as suposições. Seguem abaixo as hipóteses formuladas:

- A realização da atividade de forma independente da ação humana pode aumentar a confiabilidade do processo.
- A eliminação da intervenção humana durante o processo pode proporcionar maior segurança para a equipe operacional.
- A redução da quantidade de falhas no processo pode converter o tempo perdido com retrabalhos em um aumento de produção.

1.1 OBJETIVO GERAL

Propor um sistema para a identificação de juntas soldadas em tubos e perfis utilizando visão computacional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um algoritmo de processamento de imagem adequado para a identificação de juntas soldadas;
- Testar e avaliar, através de simulação, a eficácia do sistema de processamento de imagem desenvolvido;
- Comparar os resultados obtidos com o sistema de processamento de imagem proposto com os métodos atuais de identificação de juntas soldadas;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

Automação industrial é um processo em que as operações são realizadas por meio de máquinas e equipamentos que são controlados por softwares avançados e sistemas inteligentes, tornando o processo de produção mais eficiente e menos dependente do trabalho humano. A partir dessa definição, fica claro que a automação industrial é um conceito que envolve o uso de tecnologias avançadas para melhorar a produtividade, a qualidade dos produtos e a competitividade das empresas. A indústria 4.0, que é um dos conceitos mais recentes de automação industrial, tem um grande impacto e uma ampla gama de mudanças nos processos de fabricação, nos resultados e nos modelos de negócios (BAHRIN et al, 2016).

A automação industrial é importante porque permite a produção em massa personalizada, aumentando a produtividade, a flexibilidade e a velocidade da produção e melhorando a qualidade do produto. Além disso, a automação industrial também encoraja a inovação, uma vez que protótipos ou novos produtos podem ser produzidos rapidamente sem a necessidade de reconfigurar as máquinas ou montar novas linhas de produção (BAHRIN et al, 2016). A integração do desenvolvimento de produtos com a produção digital e física tem sido associada a grandes melhorias na qualidade do produto e na redução significativa das taxas de erro. Além disso, a coleta e análise de dados por meio de técnicas de "big data" permitem identificar e resolver pequenos problemas em tempo real, aumentando a qualidade e reduzindo os custos (AZAMFIREI; PSAROMMATIS; LAGROSEN, 2023).

Isso requer que as empresas equilibrem fatores econômicos, sociais e ambientais. Além disso, gestão da qualidade é um aspecto crítico da fabricação, pois a baixa qualidade pode ter impactos financeiros, ambientais e sociais negativos. Processos automatizados são necessários para alcançar os níveis necessários de flexibilidade, velocidade e precisão necessários para atender às demandas dos clientes (MRUGALSKA; WYRWICKA, 2017).

2.2 VISÃO COMPUTACIONAL

A Visão Computacional é um campo da Inteligência Artificial (IA) que utiliza algoritmos para analisar imagens e vídeos e extrair informações relevantes a partir

deles (SILVA et al, 2018). A aplicação de Visão Computacional em inspeções industriais é uma forma de garantir a qualidade de produtos e processos, além de ser uma solução para tarefas que seriam difíceis ou impossíveis de serem executadas por um inspetor humano. A utilização de sistemas de Visão Computacional permite a detecção de defeitos em peças com alta precisão e velocidade, além de melhorar a eficiência do processo de produção (AZAMFIREI; PSAROMMATIS; LAGROSEN, 2023).

O Sistema de Visão Computacional consiste em uma combinação de hardware e software capaz de executar tarefas de inspeção visual. O hardware é composto por câmeras, iluminação e sistemas de controle de posicionamento para capturar imagens precisas e repetitivas do objeto em inspeção. Já o software é responsável por analisar as imagens e identificar defeitos ou variações em relação a um modelo de referência (LABUDZKI; LEGUTKO; RAOS, 2014). Para que o sistema funcione adequadamente, é necessário treinar o software com imagens de referência e ajustar os parâmetros de iluminação e câmera para cada caso específico (SILVA et al, 2018).

As aplicações da Visão Computacional em inspeções industriais são diversas, podendo ser utilizada em diferentes setores como o automotivo, eletrônico, alimentício, farmacêutico, entre outros. Na indústria automotiva, a Visão Computacional tem sido amplamente utilizada em tarefas como inspeção de pintura, detecção de peças defeituosas, reconhecimento de componentes e controle de qualidade em geral. A utilização de técnicas de IA, como redes neurais e aprendizado de máquina, tem permitido a melhoria contínua dos sistemas de Visão Computacional, tornando-os cada vez mais precisos e eficientes para a inspeção de produtos industriais (SILVA et al, 2018).

2.3 RASPBERRY PI

O Raspberry Pi é um mini-computador projetado com o objetivo de ajudar jovens a aprenderem os conceitos básicos da programação de computadores a um custo acessível. Desde sua criação em 2009 por pesquisadores da Universidade de Cambridge, o Raspberry Pi ganhou popularidade em todo o mundo. O dispositivo foi projetado para aumentar o número de estudantes que optam pela ciência da computação, fornecendo uma plataforma de aprendizado acessível e versátil (UPTON; HALFACREE, 2016).

Uma das maiores vantagens do Raspberry Pi é a sua ampla disponibilidade no mercado e baixo custo, tornando-o acessível para empresas de todos os tamanhos. Além disso, o Raspberry Pi oferece suporte a uma variedade de linguagens de programação, incluindo Python, C, C++, BASIC, Perl e Ruby, tornando-o uma plataforma flexível e personalizável para atender às necessidades de qualquer empresa (BHATTACHARYA; BHATTACHARYA, 2019).

Outra grande vantagem é o suporte para um grande número de periféricos, incluindo 26 pinos GPIO (General Purpose Input/Output), permitindo a conexão de vários dispositivos externos. Isso torna o Raspberry Pi uma ferramenta ideal para projetos de automação industrial, controle de processos, controle de acesso, segurança e muito mais (FONSECA; MACEDO, 2018).

Apesar de algumas limitações, como a falta de armazenamento interno, o Raspberry Pi é uma opção atraente para empresas que buscam uma solução de baixo custo para automação industrial e projetos de IoT (Internet das Coisas). Em resumo, o Raspberry Pi é uma ferramenta versátil e acessível que oferece uma infinidade de possibilidades para empresas de todos os setores. Seja para projetos de automação industrial, controle de processos ou IoT, o Raspberry Pi é uma opção de baixo custo e altamente personalizável que pode atender às necessidades da indústria (MATHE et al, 2022).

2.4 OPENCV

OpenCV é uma biblioteca de programação amplamente usada na criação de aplicações de visão computacional, com várias ferramentas para processamento de imagens e vídeos que possibilitam a criação de aplicações capazes de reconhecer padrões, rastrear objetos e executar outras tarefas que envolvem análise de dados visuais (ZHANG et al, 2017). Uma grande vantagem do OpenCV é sua natureza de código aberto, permitindo que desenvolvedores possam usar e modificar o código sem restrições de licenciamento.

Em ambientes industriais, as aplicações de visão computacional baseadas no OpenCV podem fornecer benefícios significativos. Essas aplicações podem ajudar a automatizar vários processos, como inspeção, classificação e montagem, levando a uma maior eficiência e economia de custos. Por exemplo, sistemas baseados em visão computacional podem ser usados para inspecionar produtos e detectar defeitos

em tempo real, eliminando a necessidade de inspeção manual e reduzindo o risco de erros. Além disso, os sistemas de visão computacional podem ser usados para rastrear e classificar produtos em uma linha de produção, garantindo que sejam entregues ao local correto de forma oportuna (BISWAS et al, 2018).

Apesar de suas muitas vantagens, há também algumas desvantagens em usar o OpenCV. Um dos principais desafios é a complexidade da biblioteca, o que pode dificultar o uso eficaz para desenvolvedores sem experiência extensiva em visão computacional. Além disso, o OpenCV pode ser intensivo em termos de processamento, exigindo poder de processamento significativo para analisar grandes volumes de dados visuais em tempo real. No entanto, com a expertise e recursos de hardware adequados, esses problemas podem ser resolvidos e os benefícios de usar o OpenCV em aplicações industriais podem ser realizados (SILVA et al, 2020).

O OpenCV é uma ferramenta poderosa que pode ser usada para desenvolver uma ampla gama de aplicações de visão computacional em ambientes industriais. A natureza de código aberto da biblioteca e as funcionalidades abrangentes a tornam uma escolha atraente para os desenvolvedores que procuram criar sistemas automatizados que possam analisar e processar dados visuais em tempo real. Embora haja alguns desafios associados ao uso do OpenCV, como sua complexidade e requisitos de processamento, esses podem ser resolvidos com a expertise e recursos adequados (SILVA et al, 2020).

3 METODOLOGIA

3.1 DEFINIÇÃO DE PRODUTO NÃO CONFORME

O conceito de produto não conforme é amplo e varia de acordo com o contexto em que é utilizado. Neste trabalho, considera-se como produto não conforme aquele que apresenta um cordão de solda proveniente da etapa de reabastecimento da máquina.

Durante o processo de reabastecimento, é necessário unir o material a ser inserido na máquina com o material remanescente do abastecimento anterior, por meio de solda. A figura 1 apresenta esse processo sendo realizado.

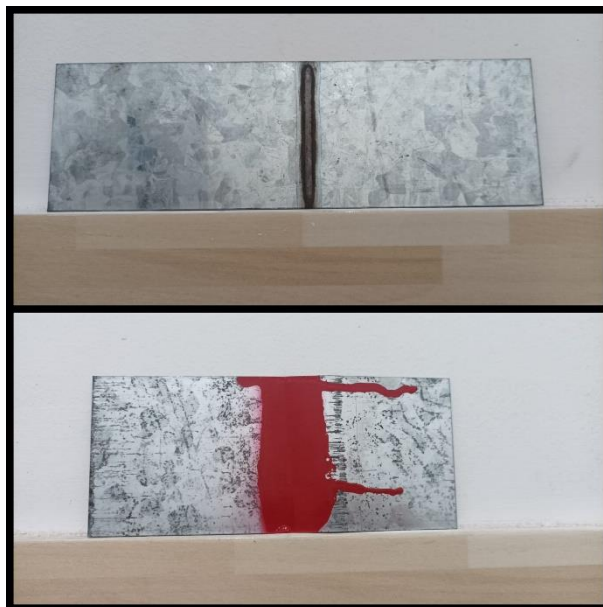
Figura 1 - Solda para reabastecimento.



Fonte: autoria própria.

Além disso, para facilitar a identificação do produto que apresenta o cordão de solda, é uma prática comum na empresa em que foi realizado o estudo que a área soldada seja tingida de vermelho (Figura 2).

Figura 2 - Chapas com e sem a pintura.



Fonte: autoria própria.

3.2 PROCESSO DE SEPARAÇÃO DE PRODUTO NÃO CONFORME

A etapa de separação ocorre durante o enfardamento, para o qual ambas as máquinas, formadora de tubos e perfiladeira, contam com um equipamento acoplado para formação de feixe e empacotamento de forma automática. Esse equipamento é fabricado pela empresa OMP, e pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Empacotadeira automática.



Fonte: autoria própria.

Entretanto, a identificação de produtos não conforme é um input que precisa ser indicado pelo operador da máquina, o que é feito por meio de uma chave que fica localizada no painel da empacotadeira, como pode ser observado na figura 4.

Figura 4 - Painel e chave de remoção de produto não conforme.



Fonte: autoria própria.

Após o acionamento da chave a remoção do produto se dá através da rotação de uma garra que redireciona o produto para fora da linha como é mostrado na figura 5.

Figura 5 - Garra para remoção de produto não conforme.



Fonte: autoria própria.

3.3 DETERMINAÇÃO DOS COMPONENTES

Com o objetivo de automatizar o processo de identificação de produtos não conforme, tornando-o independente da ação humana, realizou-se um levantamento dos componentes necessários. Considerando que o projeto se propõe como uma

alternativa de automação de baixo custo, priorizou-se a escolha de componentes alinhados a essa proposta, sem comprometer o padrão de confiabilidade em sua função.

Com base nas características apresentadas na seção 2.3 e na proposta descrita no parágrafo anterior, optou-se pelo Raspberry PI, uma plataforma de computação de baixo custo que pode ser facilmente integrada com outras tecnologias, tornando-se uma opção versátil para gerenciar a parte lógica do projeto. Para acompanhar o Raspberry PI, selecionou-se a "camera module 3", uma câmera compacta com sensor de 12 megapixels para a obtenção de imagens. Além disso, outros componentes eletrônicos também são necessários, como uma fonte de 5V para a alimentação do sistema, um relé para ativação da chave, um módulo de rádio frequência para permitir a comunicação do relé com o Raspberry PI e uma case para a montagem e proteção dos componentes

3.4 DISPOSIÇÃO DOS COMPONENTES

A disposição dos componentes é um fator crucial para garantir o desempenho adequado do sistema. Para tal, foi considerada a necessidade de proteger os componentes do sistema de fatores externos, como vibrações, choques mecânicos e a possibilidade de ser atingido por óleo solúvel. Nesse sentido, o melhor local para a instalação da câmera é na mesa de avanço da máquina uma vez que a mesma não corre risco de choque mecânico e nem de ser atingida por um jato de óleo solúvel, além disso o local proporciona maior área livre para a instalação, visão do produto sem obstáculos. A Figura 6 mostra a visão da câmera em perspectiva.

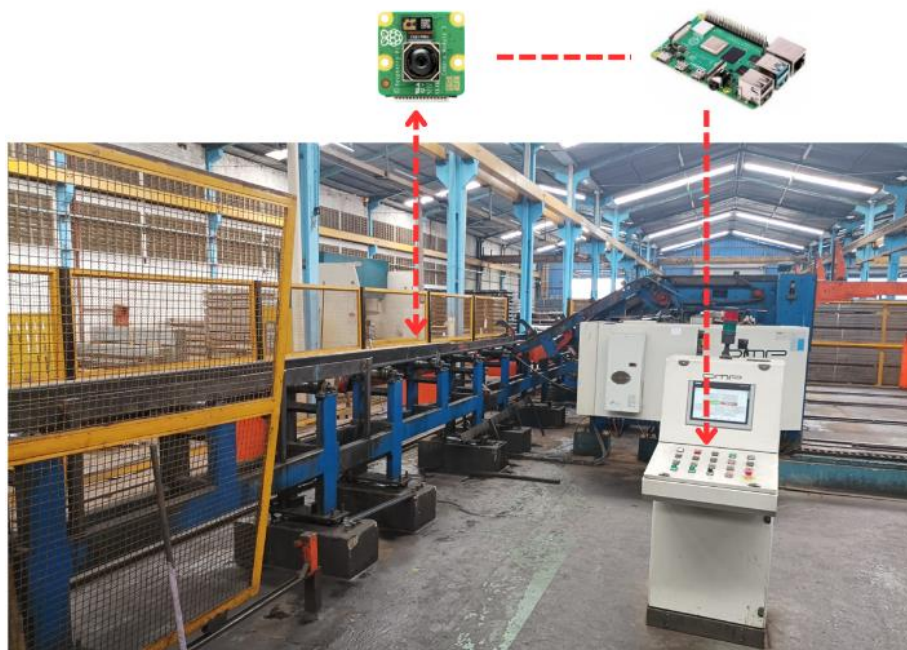
Figura 6 - Visão da câmera em perspectiva.



Fonte: autoria própria.

A figura 7 mostra a disposição dos componentes e uma versão simplificada do seu fluxo de trabalho.

Figura 7 - Versão simplificada da disposição dos componentes.



Fonte: autoria própria.

3.5 ELABORAÇÃO DO CÓDIGO EM PYTHON

Com o intuito de reduzir os custos associados à realização dos testes, foram desenvolvidos dois códigos similares, um com sua sintaxe voltada para o funcionamento em um Raspberry Pi e outro para um computador comum. Essa estratégia foi adotada com o objetivo de possibilitar que os testes fossem executados utilizando componentes já disponíveis, evitando assim a necessidade de investir em novos equipamentos. Nesse contexto, o presente trabalho foi conduzido através da análise do desempenho do sistema utilizando um laptop e a câmera de um smartphone. Ambos os códigos elaborados estão disponíveis (Apêndice A e B) com comentários que elucidam seu funcionamento.

Para fins comparativos, a câmera do smartphone é capaz de gravar vídeos em full HD a 30 quadros por segundo, enquanto que a câmera proposta para o projeto tem a capacidade de gravar em full HD a 50 quadros por segundo. Embora os resultados alcançados com os testes não possuam o mesmo nível de desempenho esperado para o sistema proposto, trata-se de uma condição bem semelhante,

permitindo inferir que os resultados obtidos podem ser reproduzidos utilizando os equipamentos indicados na seção anterior.

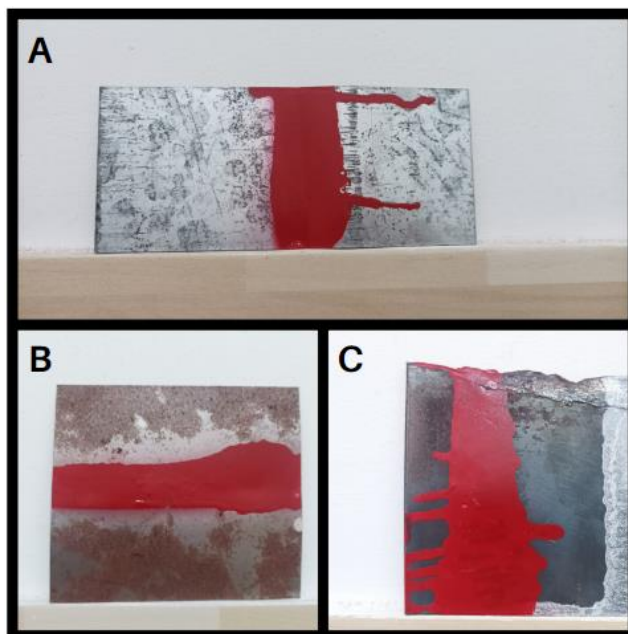
Com o intuito de permitir que o sistema pudesse identificar os produtos com o cordão de solda, foi elaborado um código que pudesse identificar a diferença de tonalidade na área soldada em relação ao restante do produto. Inicialmente, foi determinado que, caso o sistema identificasse tonalidades escuras, o produto deveria ser classificado como não conforme e descartado. A Figura 2 ilustra essa diferença de tonalidades na área soldada em relação à chapa de aço galvanizado. No entanto, durante os testes com outros tipos de aços, como o aço laminado a quente, que possui uma tonalidade mais escura devido ao processo de laminação, foram observados falsos positivos na identificação do cordão de solda.

Por isso, optou-se por adotar a estratégia já utilizada pela equipe operacional de pintar a área soldada (Figura 2) e reprogramar o código para identificar a cor vermelha, a fim de eliminar a presença de falsos positivos. Com essa nova estratégia, foi possível aumentar a confiabilidade dos resultados e tornar o sistema mais eficiente na detecção do cordão de solda nos produtos.

3.6 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

O trabalho foi desenvolvido por meio de testes em ambiente controlado, visando simular diferentes condições de trabalho. Para isso, foram realizados testes em três tipos de matéria-prima: galvanizado (A), laminado a frio (B) e laminado a quente (C) como pode ser observado na Figura 8. Essa escolha foi feita porque a coloração do produto varia dependendo do processo ao qual o aço foi submetido, logo, foi almejado observar se essas diferenças afetariam o processo de identificação do sistema.

Figura 8 - Corpos de prova utilizados.

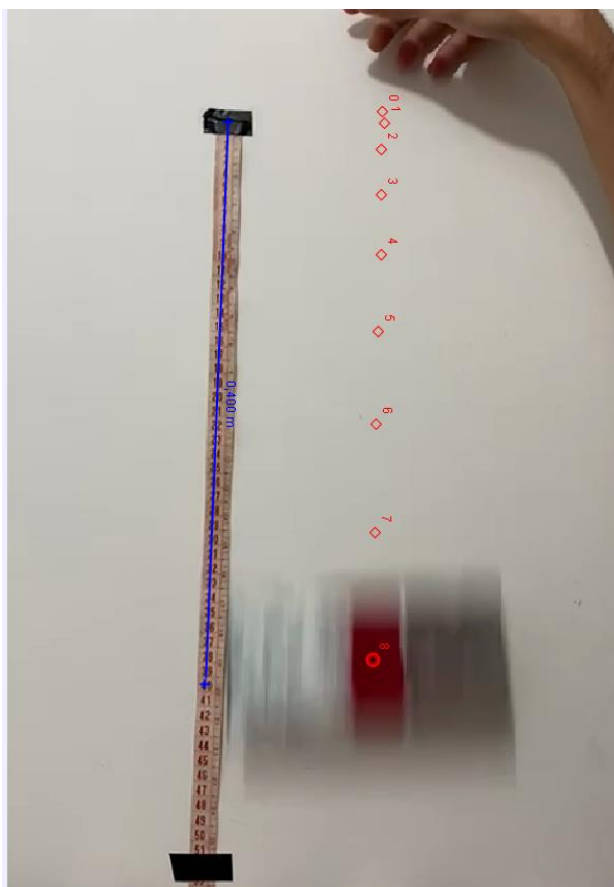


Fonte: autoria própria.

Para validar os resultados obtidos, é importante considerar as condições operacionais para garantir que a simulação seja precisa. Nesse sentido, a principal característica a ser avaliada é a velocidade da linha de produção, pois quanto maior a velocidade, maior a possibilidade do sistema não conseguir detectar o objeto em movimento. A perfiladeira e a formadora de tubos operam em velocidades distintas, entretanto, a formadora de tubos opera em velocidade superior. Logo, para efeito de análise, foi considerada a velocidade máxima alcançada pela formadora de tubos, uma vez que, se o sistema desempenhar de maneira satisfatória nessa configuração, é possível concluir que também é capaz de operar em velocidades inferiores.

A velocidade máxima de operação da máquina formadora de tubos na empresa em que o estudo foi realizado é de 145 metros por minuto. Para verificar se o sistema é capaz de identificar um produto não conforme se deslocando a essa velocidade, foi desenvolvido um ambiente de testes. A abordagem utilizada consistiu em abandonar o corpo em queda livre, de forma que, ao passar pelo campo de visão do sensor, o objeto já esteja se deslocando na velocidade desejada. Para assegurar isso, foi utilizado o Tracker, uma ferramenta gratuita de análise e modelagem de vídeo. Com o rastreamento das posições do corpo de prova ao longo dos frames (Figura 9), foi possível construir o gráfico da posição em função do tempo.

Figura 9 - Rastreio das posições ao longo dos frames.

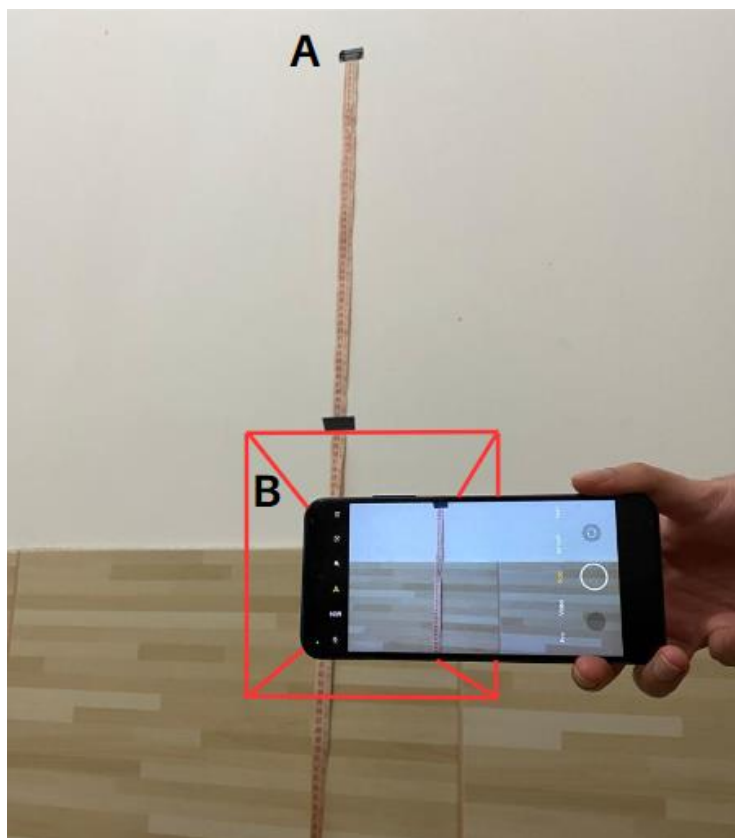


Fonte: autoria própria.

Além disso, para verificar se os resultados estavam dentro do esperado, foi realizada a regressão linear da curva do gráfico da velocidade em função do tempo. Uma vez que a fórmula que rege a queda livre é $v = g \cdot t$, onde v é a velocidade, g é a gravidade e t é o tempo, era esperado que a variância fosse baixa, ou seja, R^2 fosse um valor bem próximo de um.

A estrutura da bancada de testes pode ser observada na Figura 10, onde (A) diz respeito ao local onde o corpo de prova deve ser abandonado, e (B) é a área para qual a câmera está posicionada. Portanto, para que o teste seja bem sucedido, basta que o sistema possa identificar a junta soldada enquanto o objeto passa pela área monitorada.

Figura 10 – Configuração do ambiente de testes.

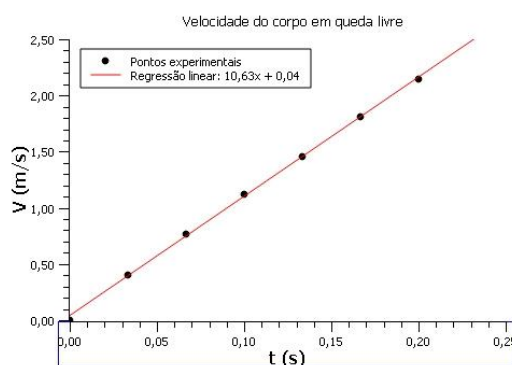


Fonte: autoria própria.

4 RESULTADOS

A Figura 11 apresenta o gráfico da velocidade em função do tempo para o corpo abandonado em queda livre. Para confirmar que o objeto alcançou a velocidade de 145 m/min (2,4 m/s), à priori, realizou-se a regressão linear e calculou-se a variância. O resultado obtido foi um coeficiente de determinação R^2 de 0,9998. Além disso, é possível notar que o resultado está de acordo com o esperado ao utilizar a fórmula da queda livre. Adotando 2,4 m/s na equação $v = g * t$, ambos os métodos apontam que a velocidade foi alcançada no instante $t = 0,24$ segundos, indicando que os dados empíricos foram consistentes com a teoria.

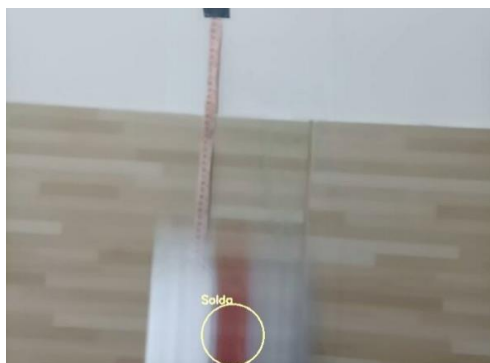
Figura 11 - Gráfico da velocidade do corpo em função do tempo.



Fonte: autoria própria.

No que diz respeito à classificação dos resultados, adotou-se a seguinte definição, se o sistema conseguir identificar a junta soldada o resultado será considerado um acerto. Em caso de falso positivo, o resultado será classificado como erro tipo 1, e se o sistema não conseguir identificar a junta soldada durante o teste, será classificado como erro tipo 2 (STALLARD; MACKENZIE; PETERS, 2018). Para maior clareza na identificação dos resultados durante os testes, o sistema foi programado para circunscrever a área na qual o cordão de solda se encontra. Esse processo ocorre em tempo real e pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Sistema reconhecendo a junta soldada durante um dos testes.



Fonte: autoria própria.

Foram executados um total de 300 ensaios, os quais foram distribuídos equitativamente entre os três tipos de aço em estudo: refinado a frio, refinado a quente e galvanizado. Como consequência, o sistema apresentou uma taxa de acerto de 95,33%, com apenas 14 ocorrências de erros do tipo 2 detectados, enquanto que não houve a ocorrência de erros do tipo 1. A distribuição dos erros entre os tipos de matéria prima pode ser visualizada na Tabela 1.

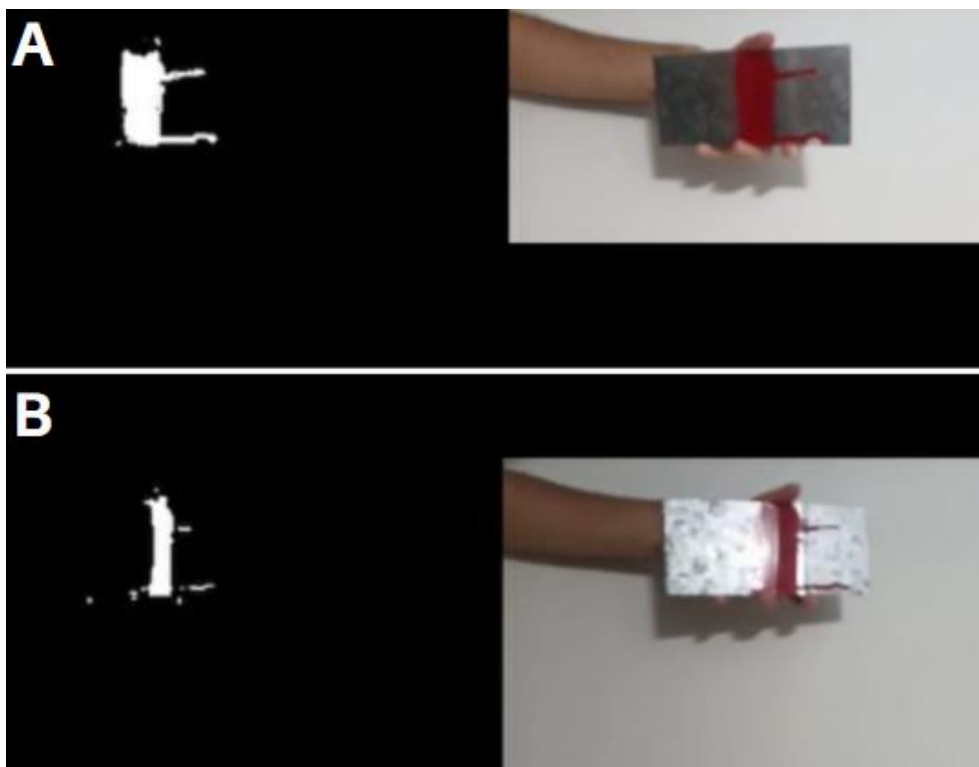
Tabela 1 - Distribuição dos erros por matéria prima.

	Galvanizado	Refinado a quente	Refinado a frio
Erro tipo 1	0	0	0
Erro tipo 2	9	1	4

Fonte: autoria própria.

Uma análise mais aprofundada revelou que o aço galvanizado apresentou uma concentração de falhas, possivelmente devido à sua elevada capacidade reflexiva. Para esclarecer tal comportamento, foram realizados novos testes e, como resultado, foi possível constatar a influência da reflexão em detrimento da identificação precisa da junta soldada pelo sistema. A Figura 13, por sua vez, ilustra como o sistema é afetado nesse cenário.

Figura 103 - Efeito do reflexo no sensor.



Fonte: autoria própria.

A região em branco na imagem simboliza a porção capturada pelo sensor antes da aplicação do processo de remoção de ruído por meio de erosões e dilatações. Percebe-se, de forma clara, uma diminuição da área identificada quando sob influência do reflexo. Esta redução é de grande relevância, uma vez que o sistema foi projetado para minimizar falsos positivos ao considerar um tamanho mínimo para a região detectada. Desse modo, a diminuição da área pode resultar em uma área identificada menor do que o tamanho mínimo estipulado pelo sistema, o que o levaria a classificá-la como ruído, ocasionando, assim, um erro. O trecho do código responsável por delimitar o tamanho mínimo está destacado na Figura 14.

Figura 114 - Trecho do código que determina a área mínima.

```
# Apenas prosseguir, se o raio do contorno possuir um tamanho mínimo.
# Ajustar conforme necessidade.
if radius > 5:
```

Fonte: autoria própria.

Sendo assim, a fim de solucionar esse entrave, sugere-se ajustar o valor conforme a necessidade específica, a fim de minimizar a probabilidade de ocorrência

desse tipo de falha. Vale destacar que o valor 5 é uma grandeza adimensional e, portanto, deve ser definido empiricamente para cada aplicação. Ademais, uma solução alternativa seria verificar, durante a instalação do equipamento, se há a possibilidade de ocorrência de reflexos e posicionar a câmera adequadamente para evitar tal problema.

5 CONCLUSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

Com base nas informações apresentadas, pode-se concluir que o sistema de inspeção de juntas soldadas é uma solução promissora para a detecção de produtos não conforme em linhas de produção industriais de tubos e perfis. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema é capaz de identificar a maioria dos produtos especificados, apresentando uma taxa de acerto de 95,33%. No entanto, ainda há margem para melhorias na redução dos erros do tipo dois, que ocorrem principalmente em materiais com maior capacidade reflexiva.

Além disso, é importante destacar que o sistema também apresenta potencial para ser utilizado em ambientes de difícil acesso, o que pode aumentar a segurança da equipe operacional. Por meio do uso de tecnologias avançadas, como a visão computacional, é possível automatizar processos de inspeção que antes demandavam tempo e esforço humano.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de métodos de detecção de juntas soldadas sem a necessidade de tingir a peça. Isso pode significar uma redução nos custos de operação, uma vez que o processo de tingimento apresenta um custo em tempo e dinheiro.

REFERÊNCIAS

- AZAMFIREI, V.; PSAROMMATIS, F.; LAGROSEN, Y. Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 67, p. 1-22, ISSN 0278-6125, 2023.
- BAHRIN, M. A. K. et al. Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, v. 78, n. 1-2, p. 6-13, 2016.
- CHAKRABORTY, S. et al. Non-destructive testing of composite materials: A review of techniques and applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 143, p. 172-197, 2018.
- GHAEL, D. H.; SOLANKI, L.; SAHU, G. A review paper on Raspberry Pi and its applications. **International journal of advances in engineering and management**, Pilani, v. 2, n. 12, p. 225-227, 2021.
- KUMAR, S. et al. A review on non-destructive testing of metallic materials for aerospace applications. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9244-9261, 2020.
- LABUDZKI, R.; LEGUTKO, S.; RAOS, P. The essence and applications of machine vision. **Tehnicki Vjesnik**, v. 21, n. 4, p. 903-909, 2014.
- MRUGALSKA, Beata; WYRWICKA, Magdalena K. Towards Lean Production in Industry 4.0. **Procedia Engineering**, v. 182, p. 466-473, ISSN 1877-7058, 2017.
- SILVA, R.L. et al. Machine Vision Systems for Industrial Quality Control Inspections. **Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0**, v. 540, p. 711-720, 2018.
- STALLARD, M; MACKENZIE, C; CAMERON, A. A probabilistic model to estimate visual inspection error for metalcastings given different training and judgment types, environmental and human factors, and percent of defects. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 48, p. 97-106, ISSN 0278-6125, 2018.
- SZKILNYK, G. **Vision-based fault detection in assembly automation**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Queen's University, Canadá, 2012.
- UPTON, E; HALFACREE, G. **Raspberry Pi User Guide**. John Wiley & Sons, 2016.
- BHATTACHARYA, A.; BHATTACHARYYA, S. A Comparative Study of Programming Languages in Raspberry Pi. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, v. 8, n. 6, p. 369-374, jun. 2019.
- FONSECA, J. F.; MACEDO, D. C. Raspberry Pi applied to industrial automation using a mobile device. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, n. 9, p. 2372-2378, 2018.

ZHANG, L. et al. OpenCV: A computer vision library for real-time processing. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 57, p. 3-13, 2017.

BISWAS, J. et al. Industrial applications of computer vision: state-of-the-art and challenges. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 48, p. 144-156, 2018.

SILVA, D. A. B. et al. Análise das vantagens e desvantagens do uso do OpenCV em inspeção visual automatizada. In: **Anais do IX Congresso Brasileiro de Inovação e Gestão de Desenvolvimento do Produto**. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia de Produto, p. 331-341, 2020.

LEVINE, M. D. **Vision in Man and Machine**. New York: McGraw-Hill College, 1985.

KAKANI V. et al. A critical review on computer vision and artificial intelligence in food industry. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, p. 4-5, 2020.

YAMADA, V. Y.; MARTINS, L. M. Indústria 4.0: um comparativo da indústria brasileira perante o mundo. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 34, n. esp., p. 95-109, 2019.

MARTINS, A. P.; JUNIOR, J. C. P. Inspeção de solda utilizando visão computacional. **Anais do 10º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente–X SBAI**, Minas gerais, p. 444-449, 2011.

MATHE, S. E. et al. A review on raspberry pi and its robotic applications. In: **2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)**. IEEE, 2022. p. 1-6.

APÊNDICE A – ALGORITMO PARA TESTES

```

import numpy as np
import imutils
import cv2

# Defina lower and upper boundaries da cor em que você pretende trabalhar em HSV
lower_boundary = (155, 93, 20)
upper_boundary = (179, 255, 255)

# Defina a cor do círculo de identificação do objeto em HSV
circle_color = (180, 255, 255)

camera = cv2.VideoCapture(0)

while True:
    # Read o vídeo em tempo real
    _, frame = camera.read()

    # Você pode redefinir o tamanho do frame alterando o valor de width
    frame = imutils.resize(frame, width=800)

    # Transformando de RGB para HSV
    hsv = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    # Construção de uma máscara com o objetivo de performar uma série de dilatações
    # e erosões para remover "ruídos" da imagem
    kernel = np.ones((9, 9), np.uint8)
    mask = cv2.inRange(hsv, lower_boundary, upper_boundary)
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

    # Encontrar os contornos do objeto na máscara criada anteriormente e preparação
    # para delimitação do centro do objeto
    cnts = cv2.findContours(mask.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)[-2]
    center = None

    # Apenas prosseguir se pelo menos um contorno for identificado
    if len(cnts) > 0:
        # Encontrar o maior contorno na máscara, em seguida computar o menor
        # círculo circunscrito e centroide
        c = max(cnts, key=cv2.contourArea)
        ((x, y), radius) = cv2.minEnclosingCircle(c)
        M = cv2.moments(c)
        center = (int(M["m10"] / M["m00"]), int(M["m01"] / M["m00"]))

        # Apenas prosseguir, se o raio do contorno possuir um tamanho mínimo.
        # Ajustar conforme necessidade.
        if radius > 5:
            # Desenha um círculo e adiciona uma legenda ao redor do contorno
            # identificado
            cv2.circle(frame, (int(x), int(y)), int(radius), circle_color, 2)
            cv2.putText(frame, "Solda", (int(x-radius), int(y - radius)),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, circle_color, 2)

            # Exibir o frame
            cv2.imshow("Frame", frame)

            key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
            # Encerra o loop ao pressionar a tecla especificada
            if key == ord("s"):
                break

camera.release()
cv2.destroyAllWindows()

```

APÊNDICE B – ALGORITMO DEFINITIVO

```

import numpy as np
import imutils
import cv2
import time
from rpi_rf import RFDevice

# Defina lower and upper boundaries da cor em que você pretende trabalhar em HSV
lower_boundary = (155, 93, 20)
upper_boundary = (179, 255, 255)

# Defina a cor do círculo de identificação do objeto
circle_color = (180, 255, 255)

# Configuração do módulo de RF
gpio_pin = 11 # GPIO que será utilizado para transmitir o sinal RF
rf_device = RFDevice(gpio_pin)
rf_device.enable_tx()

camera = cv2.VideoCapture(0)

while True:
    # Read o vídeo em tempo real
    _, frame = camera.read()

    # Você pode redefinir o tamanho do frame
    frame = imutils.resize(frame, width=800)

    # Transformando para HSV
    hsv = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2HSV)

    # Construção de uma máscara com o objetivo de performar uma série de dilatações
    # e erosões para remover "ruídos" da imagem
    kernel = np.ones((9, 9), np.uint8)
    mask = cv2.inRange(hsv, lower_boundary, upper_boundary)
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_OPEN, kernel)
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

    # Encontrar os contornos do objeto na máscara criada anteriormente e preparação
    # para delimitação do centro do objeto
    cnts = cv2.findContours(mask.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)[-2]
    center = None

    # Apenas prosseguir se pelo menos um contorno for identificado
    if len(cnts) > 0:
        # Encontrar o maior contorno na máscara, em seguida computar o menor
        # círculo circunscrito e centroide
        c = max(cnts, key=cv2.contourArea)
        ((x, y), radius) = cv2.minEnclosingCircle(c)
        M = cv2.moments(c)
        center = (int(M["m10"] / M["m00"]), int(M["m01"] / M["m00"]))

        # Apenas prosseguir, se o raio do contorno possuir um tamanho mínimo.
        # Ajustar conforme necessidade
        if radius > 50:
            # Desenha um círculo e adiciona uma legenda ao redor do contorno
            # identificado
            cv2.circle(frame, (int(x), int(y)), int(radius), circle_color, 2)
            cv2.putText(frame, "Solda", (int(x-radius), int(y - radius)),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, circle_color, 2)
            # Transmite um sinal RF
            rf_device.tx_code(123456, protocol=1, pulselength=350)
            time.sleep(5)

```

```
# Exibir o frame
cv2.imshow("Frame", frame)

key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
# Encerra o loop ao pressionar a tecla especificada
if key == ord("s"):
    break

rf_device.cleanup()
camera.release()
cv2.destroyAllWindows
```