



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E
COMPUTAÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Cecília Vargas Gonçalves

**Sensor de visão industrial para o controle de qualidade automatizado
na montagem de religadores automáticos**

Blumenau
2025

Cecília Vargas Gonçalves

**Sensor de visão industrial para o controle de qualidade automatizado
na montagem de religadores automáticos**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Orientador, Dr. Guilherme Brasil Pintarelli

Blumenau

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Gonçalves, Cecília Vargas

Sensor de visão industrial para o controle de qualidade
automatizado na montagem de religadores / Cecília Vargas
Gonçalves ; orientador, Guilherme Brasil Pintarelli, 2025.
90 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,
2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Visão
Computacional Industrial. 3. Controle de Qualidade
Industrial. 4. Inspeção Automatizada. 5. Montagem de
Religadores Automáticos. I. Pintarelli, Guilherme Brasil .
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Cecília Vargas Gonçalves

**Sensor de visão industrial para o controle de qualidade automatizado
na montagem de religadores automáticos**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 18 de julho de 2025.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Guilherme Brasil Pintarelli

Data: 04/08/2025 14:00:48-0300

CPF: ***,523.129-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Primeiro, Dr. Guilherme Brasil
Pintarelli
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Tiago Davi Curi Busarello

Data: 01/08/2025 17:23:57-0300

CPF: ***,950.098-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Tiago Davi Curi Busarello
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Ebrahim Samer El Youssef

Data: 01/08/2025 17:54:31-0300

CPF: ***,252.109-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Ebrahim Samer El Youssef
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais e minha irmã,
pelo amor incondicional; aos professores e colegas,
que compartilharam conhecimento e amizade ao
longo do caminho; ao meu companheiro de vida e
de faculdade, por ser meu apoio constante; e, em
especial, ao meu avô, que mesmo não estando mais
entre nós, permanece vivo em minhas memórias e
inspirações. Este trabalho carrega um pouco de
tudo que aprendi com vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, por sua paciência, orientação e incentivo constantes. Seu apoio foi fundamental em cada etapa deste projeto.

Agradeço imensamente aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando e me apoiando em cada passo. Sei que o esforço de vocês foi essencial para que eu chegasse até aqui, e sou eternamente grata por tudo.

À minha irmã, que, apesar de mais nova, tem sido uma fonte de inspiração e exemplo para mim. Seu apoio e carinho foram importantes durante toda essa caminhada.

Aos meus familiares, especialmente aos meus tios, que sempre contribuíram de alguma forma para minha educação e crescimento. Agradeço também às minhas avós e ao meu avô, que sempre foram uma presença importante em minha vida.

Um agradecimento especial aos meus avós de coração, que me acolheram durante minha estadia em Blumenau e foram fundamentais para que eu me sentisse em casa.

Aos meus colegas de faculdade, que me ensinaram tanto com suas trajetórias e histórias de vida. Cada um de vocês contribuiu para a minha formação e aprendizado.

Aos meus amigos, que fizeram essa caminhada mais leve e significativa. Mesmo que nossos caminhos sigam diferentes, a amizade de vocês é algo que sempre vou levar comigo.

Por fim, agradeço aos meus colegas de trabalho e ao meu gestor, por todo o suporte e compreensão durante o período de realização do TCC. Vocês foram essenciais para que eu pudesse conciliar o trabalho com meus estudos e alcançar esse objetivo.

"Não aceite o que vem fácil. Lute pelo que você acredita."

Marie Curie

RESUMO

Na área de controle de qualidade, a automação da inspeção visual é uma estratégia fundamental para garantir a conformidade e a rastreabilidade em processos de manufatura. Este trabalho tem como objetivo implementar e validar um sistema de visão computacional para a inspeção automatizada de elementos de vedação na montagem de religadores automáticos, abordando falhas que comprometem a estanqueidade do produto. Para isso, foi utilizada uma abordagem baseada em VC (Visão Computacional) com IA (Inteligência Artificial) embarcada, envolvendo o uso de um sensor de visão inteligente da série IV3 da Keyence, um CLP (Controlador Lógico Programável) e sua integração com o MES (*Manufacturing Execution System*) da fábrica. A metodologia incluiu a análise do processo de montagem das vedações via PFMEA (*Process Failure Mode and Effects Analysis*), a implementação da arquitetura física, a programação do *software* de visão com base em aprendizado de máquina e a criação da lógica de controle no CLP, com validação realizada por meio de testes de matriz de confusão, repetibilidade e intertravamento do processo. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema foi eficaz na identificação de peças conformes e com defeitos evidentes, embora tenha apresentado menor consistência na detecção de falhas limítrofes. O sistema apresentou acurácia superior a 85% e sensibilidade de 100% nos testes de validação, sendo capaz de intertravar o processo produtivo ao detectar não conformidades, funcionando como um *Poka-Yoke* digital que assegura que todas as peças sejam inspecionadas e registradas antes da próxima etapa do processo. A solução proposta tem potencial de aplicação em processos de controle de qualidade em montagens industriais e contribuições relevantes para a área da Qualidade 4.0, ao aplicar conceitos da Indústria 4.0 para otimizar a fabricação de equipamentos de proteção elétrica.

Palavras-chave: Visão Computacional; Inspeção automatizada; Integração MES-CLP; Inspeção de vedação; Fábrica inteligente; Detecção de defeitos

ABSTRACT

In the field of quality control, automating visual inspection is a key strategy to ensure conformity and traceability in manufacturing processes. This work aims to implement and validate a computer vision system for the automated inspection of sealing elements in the assembly of automatic reclosers, addressing failures that compromise the product's tightness. The proposed solution is based on embedded Artificial Intelligence (AI) and Computer Vision (CV), utilizing a Keyence IV3 smart vision sensor, a Programmable Logic Controller (PLC), and integrating it with the factory's Manufacturing Execution System (MES). The methodology included the analysis of the sealing assembly process using Process Failure Mode and Effects Analysis (PFMEA), physical architecture implementation, machine-learning-based vision software programming, and the development of control logic on the PLC. Validation was carried out through confusion matrix analysis, repeatability tests, and process interlock verification. The results demonstrated that the system was effective in identifying conforming parts and those with evident defects, although it showed lower consistency in detecting borderline failures. The system achieved an accuracy above 85% and 100% sensitivity in the validation tests and was able to interlock the production process when non-conformities were detected, functioning as a digital *Poka-Yoke*, ensuring that all parts are inspected and logged before advancing to the next stage of the process. The proposed solution has potential applications in quality control for industrial assemblies and offers relevant contributions to the Quality 4.0 field by applying Industry 4.0 concepts to optimize the manufacturing of electrical protection equipment.

Keywords: Computer Vision; Automated inspection; MES-PLC Integration; Sealing inspection; Smart factory; Defect detection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Religador automático instalado em poste.	19
Figura 2 – Religador trifásico a esquerda e monofásico a direita.	20
Figura 3 – Componentes principais do religador.	22
Figura 4 – Fluxo de montagem do religador.	23
Figura 5 – Etapas de construção do FMEA/PFMEA.	25
Figura 6 – Arquitetura típica de um sistema de visão insdustrial.	29
Figura 7 – Arquitetura típica de sistemas de automação industrial.	35
Figura 8 – Componentes avaliados pelo sistema de visão.	40
Figura 9 – Exemplificação da montagem completa do tanque com respira- dor e superfície de fixação.	41
Figura 10 – Componentes principais do sistema de visão computacional IV3 da Keyence.	43
Figura 11 – Componentes do sistema de controle utilizados na integração com a câmera.	43
Figura 12 – Ambiente de montagem e inspeção de vedação.	45
Figura 13 – Características físicas do ambiente de inspeção.	46
Figura 14 – Tabela de FOV da câmera utilizada.	47
Figura 15 – Diagrama dos componentes do sistema de detecção de vedação.	48
Figura 16 – Fluxo de dados do sistema implementado.	49
Figura 17 – Fluxo operacional do software IV3 Navigator.	51
Figura 18 – Passos de programação do <i>software IV3 Navigator</i>	52
Figura 19 – Imagens mestres salvas para seleção de programa no <i>software</i>	53
Figura 20 – Configuração do programa de seleção.	54
Figura 21 – Fluxograma para detecção dos componentes de vedação.	55
Figura 22 – Diagrama da Máquina de Estados do CLP para controle de inspeção.	60
Figura 23 – Posto de montagem e inspeção automatizada.	62
Figura 24 – Painel de controle do sistema de visão computacional.	63
Figura 25 – Amostras para validação da repetibilidade do tanque.	67
Figura 26 – Amostras para validação da repetibilidade do respirador.	68

Figura 27 – Amostras para validação da repetibilidade da placa de fixação de painel de controle.	69
Figura 28 – Gráfico de dispersão do tanque com pequeno defeito (borrachas 1 e 2).	73
Figura 29 – Gráfico de dispersão do tanque com pequeno defeito (borrachas 3 e 4).	74
Figura 30 – Gráfico de dispersão do tanque com defeito evidente (borrachas 1 e 2).	75
Figura 31 – Gráfico de dispersão do tanque com defeito evidente (borrachas 3 e 4).	76
Figura 32 – Gráfico de dispersão do tanque conforme (borrachas 1 e 2). . . .	77
Figura 33 – Gráfico de dispersão do tanque conforme (borrachas 3 e 4). . . .	78
Figura 34 – Gráfico de dispersão da placa de fixação com defeito limítrofe. .	79
Figura 35 – Gráfico de dispersão da placa de fixação com defeito evidente. .	80
Figura 36 – Gráfico de dispersão da placa de fixação conforme.	81
Figura 37 – Resultados da repetibilidade para os três cenários do respirador.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição inicial dos modos de falha identificados.	37
Tabela 2 – Análise do PFMEA antes e depois da implementação do sistema de visão computacional	38
Tabela 3 – Mapeamento de variáveis de comunicação Modbus (CLP – Com- putador)	56
Tabela 4 – Mapeamento de entradas e saídas digitais (CLP – câmera) . . .	57
Tabela 5 – Tabela de amostras de tanque com respirador	63
Tabela 6 – Matriz de Confusão do Programa do Tanque	64
Tabela 7 – Tabela de amostras de placas de unidade de controle	65
Tabela 8 – Matriz de Confusão do Programa da Placa de Controle	66
Tabela 9 – Resultados da validação do tanque com diferentes tipos de peça	70
Tabela 10 – Resultados da validação da superfície de fixação com diferentes tipos de peça	71
Tabela 11 – Resultados da validação do respirador com diferentes tipos de peça	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>
FOV	<i>Field of View</i>
FSM	<i>Finite State Machine</i>
IA	Inteligência Artificial
IHM	Interface Homem-Máquina
IoT	<i>Internet of Things</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
PFMEA	<i>Process Failure Mode and Effects Analysis</i>
RPN	<i>Risk Priority Number</i>
VC	Visão Computacional
VLAN	<i>Virtual Local Area Network</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	RELIGADORES AUTOMÁTICOS	18
2.1.1	Tipos de Religador	18
2.1.2	Componentes e Funcionamento	19
2.1.3	Contexto da Linha de Montagem de Religadores	21
2.2	GESTÃO DA QUALIDADE	24
2.2.1	Detecção de Falhas em Processos de Montagem e PFMEA	24
2.2.2	<i>Poka-Yoke</i>	26
2.3	FUNDAMENTOS DA VISÃO COMPUTACIONAL	27
2.3.1	Sistemas de Visão Computacional para Inspeção Industrial	28
2.3.1.1	<i>Módulo de Iluminação</i>	29
2.3.1.2	<i>Lente</i>	30
2.3.1.3	<i>Câmera (Módulo de Detecção)</i>	30
2.3.2	Aplicações e Benefícios na Indústria 4.0	30
2.4	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)	33
2.4.1	Partes do CLP	33
2.4.2	Lógica Ladder	34
2.4.3	Comunicação <i>Modbus</i>	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.0.1	Análise do PFMEA	36
3.0.2	Elementos Avaliados pelo Sistema de Visão	39
3.1	SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL	39
3.1.1	Sensor de Visão com IA Integrada da Série IV3	41
3.1.2	Controlador Lógico Programável (CLP) e Módulo de Expansão	42
3.1.3	Interfaces Homem-Máquina (IHM) e Sinalização	44
3.2	IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA	44

3.2.1	Descrição do Ambiente	44
3.2.2	Posição da Câmera	46
3.2.3	Arquitetura do Sistema	48
3.3	PROGRAMAÇÃO DA CÂMERA E CONTROLADOR	50
3.3.1	Programação da Câmera	50
3.3.2	Programação do Controlador	54
3.4	TESTES FUNCIONAIS E VALIDAÇÃO	58
3.4.1	Teste de Matriz de Confusão	58
3.4.2	Teste de Repetibilidade	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.0.1	Configuração do Sistema	61
4.1	RESULTADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO	62
4.2	RESULTADOS DO TESTE DE REPETIBILIDADE	66
5	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 marcou o começo da Quarta Revolução Industrial, transformando a produção e a automação industrial. Este novo paradigma, construído sobre o conceito de *Cyber-Physical Production Systems* (CPPS), permite que sistemas de produção tomem decisões inteligentes através da comunicação e cooperação em tempo real entre os elementos da manufatura. O resultado é a capacidade de produzir produtos personalizados de alta qualidade com a mesma eficiência da produção em massa, redefinindo as fronteiras da automação e da flexibilidade nas fábricas modernas (XU *et al.*, 2021).

No setor de distribuição de energia elétrica, essas transformações se refletem na adoção de dispositivos inteligentes de proteção, entre eles os religadores automáticos são fundamentais para a confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia. Sua função primordial é detectar e interromper correntes de falta (como curtos-circuitos) e, em seguida, religar o circuito para verificar se a falha foi eliminada. Isso ocorre pois a maioria das falhas em redes aéreas é transitória, então os religadores evitam longas interrupções para os consumidores e reduzem custos operacionais para a concessionária (GONEN, 2014).

Apesar dos avanços em automação nas linhas de produção, o controle de qualidade ainda representa um desafio relevante. Como destacado por Lins, Santos e Gaspar (2023), a variabilidade dos processos manuais e a ausência de rastreabilidade comprometem a confiabilidade dos produtos e motivam a adoção de ferramentas digitais para mitigação de falhas e redução de custos. O autor ainda destaca as medições manuais como um obstáculo, por ser um processo moroso e ainda acarreta na incerteza da medição em instrumentos analógicos e registro manual dos relatórios.

Neste contexto, emergem os conceitos da Qualidade 4.0, que unem os fundamentos clássicos da qualidade industrial e sistemas automatizados de inspeção (SADER; HUSTI; DAROCZI, 2022). Soluções que integram visão computacional e automação têm demonstrado bons resultados em diversas aplicações industriais. O trabalho de Mendes, Silva e Mello (2023), por exemplo, propõe um sistema mecatrônico com câmeras para montagem de componentes com encaixe do tipo pino-furo, mostrando ganhos expressivos em padronização e redução de erros. Con-

tudo, verifica-se na literatura uma lacuna quanto à aplicação dessas tecnologias na montagem de religadores, cujos requisitos técnicos são mais rigorosos devido à exposição a ambientes agressivos e à necessidade de estanqueidade.

Na *smart factory* onde este trabalho foi desenvolvido, através da análise do PFMEA (*Process Failure Mode and Effects Analysis*) da linha de montagem de religadores foram identificados riscos relacionados à falha de vedação, comprometendo a estanqueidade dos tanques. Esse requisito é estabelecido pela norma IEC 62271-111, que exige grau de proteção mínimo IPX5 contra a entrada de água e particulados (IEEE/IEC..., 2012). A falha nesse aspecto pode gerar infiltração de umidade nos componentes internos, resultando na degradação do sistema de isolamento. Estudos como o de Salem *et al.* (2022) evidenciam que contaminantes em superfícies poliméricas podem absorver umidade e formar películas condutivas, levando à ocorrência de correntes de fuga, aquecimento e eventual colapso do sistema isolante.

Propõe-se então a implementação de um sistema de VC (Visão Computacional) para inspeção automatizada de três elementos críticos à estanqueidade dos religadores: as borrachas de vedação do tanque, o conjunto do respirador e as borrachas da superfície de fixação da placa de controle. O sistema desenvolvido utiliza uma câmera com IA (Inteligência Artificial) embarcada, conectada a um CLP (Controlador Lógico Programável), responsável por intertravar o processo em caso de detecção de não conformidades. A solução também é integrada ao MES (*Manufacturing Execution System*) da fábrica, assegurando a rastreabilidade dos resultados de inspeção e contribuindo para o controle da qualidade no ambiente produtivo.

Portanto, o trabalho soluciona a vulnerabilidade no processo de vedação na montagem dos religadores, no qual falhas humanas ou de processo na fixação dos elementos de vedação podem levar ao comprometimento da estanqueidade e, consequentemente, ao colapso do sistema isolante em campo. Ao introduzir um sistema de inspeção automatizado e inteligente, a solução proposta elimina a subjetividade da verificação manual e garante, de forma objetiva e repetível, a correta montagem dos componentes citados.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Implementar e validar um sistema de visão computacional interligado ao processo produtivo de uma *smart factory* para inspeção automatizada da montagem de religadores automáticos, com foco na detecção de falhas nos elementos de vedação do tanque, respirador e da superfície de fixação da placa de controle, para controle da qualidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definição e análise da arquitetura do sistema de monitoramento a ser validado;
- Integração do controlador da câmera com o CLP da empresa;
- Integração do CLP da empresa com o sistema de gerenciamento da produção industrial (MES) para sincronização das etapas do processo produtivo;
- Promover a rastreabilidade e intertravamento da etapa de montagem tratada durante o trabalho;
- Implementar no software de VC, 3 programas de detecção dos seguintes itens:
 - Borrachas de vedação colocadas no tanque;
 - Respirador e espuma instalados no tanque;
 - Borrachas de vedação colocadas na superfície de fixação da placa de controle.
- Validar o sistema implementado e analisar o desempenho com testes práticos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura fundamental para o entendimento do escopo deste estudo. Serão explorados os principais conceitos e práticas relacionados à montagem industrial, contexto do produto apresentado pelo trabalho (religadores automáticos), à gestão da qualidade e às aplicações da VC nesse contexto. A discussão teórica será ancorada nas tecnologias centrais deste projeto, incluindo o uso de uma câmera inteligente com IA embarcada, um CLP e sua integração com um MES. A partir dessa base, discute-se como essa arquitetura contribui para a otimização de processos e para temas cruciais como rastreabilidade e prevenção de falhas, com foco em dispositivos de proteção elétrica, mais especificadamente em religadores produzidos em uma fábrica inteligente.

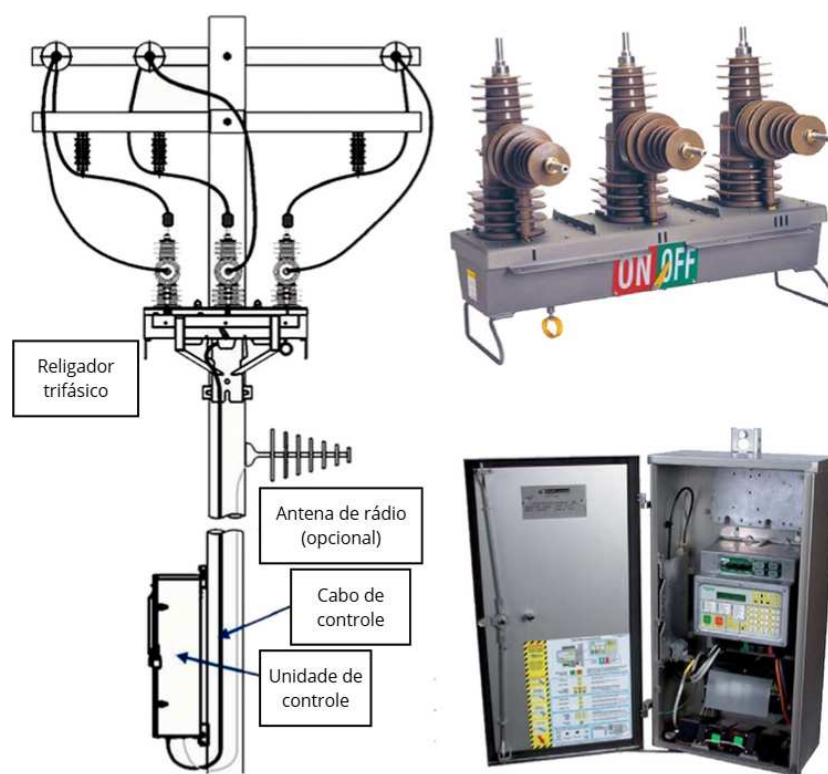
2.1 RELIGADORES AUTOMÁTICOS

Os religadores automáticos são dispositivos de manobra e proteção essenciais para a confiabilidade das redes de distribuição. A operação coordenada de religadores com outros equipamentos, como fusíveis e relés, é um método bem estabelecido para a proteção contra faltas, sejam elas transitórias ou permanentes (FILHO; MAMEDE, 2011). Sua principal função é interromper circuitos sob condições de falta de corrente e realizar religamentos automáticos para restabelecer o serviço, partindo do princípio de que a grande maioria das faltas em redes aéreas (80% a 95%) é de natureza transitória e se extingue em um curto intervalo de tempo (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2008). Os dispositivos são regulamentados por normas internacionais, como a IEEE C37.60 (IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, 2008), e são projetados para operar em redes com tensão nominal de até 38 kV. A Figura 1 ilustra a instalação típica de um religador em campo.

2.1.1 Tipos de Religador

Existem duas configurações principais, como mostradas na Figura 2: trifásica (à esquerda) e monofásica (à direita). Religadores monofásicos operam cada fase de maneira independente, o que os torna ideais para áreas rurais onde faltas geralmente afetam apenas uma fase. Já os trifásicos operam com os três polos interligados,

Figura 1 – Religador automático instalado em poste.



Fonte: Adaptado de [ICP DAS \(2022\)](#)

desligando todas as fases simultaneamente, sendo mais comuns em áreas urbanas (EATON, 2024). Muitos modelos modernos oferecem flexibilidade para operar em ambos os modos.

2.1.2 Componentes e Funcionamento

Um religador moderno é um equipamento compacto que integra diversos componentes para realizar suas funções de proteção e manobra de forma autônoma. Como descrito em Filho e Mamede (2011) seus principais componentes são:

- **Unidade de controle:** é a parte inteligente do equipamento, que abriga as funções de proteção e comando. Contém os relés de sobrecorrente e o relé de religamento. Nos religadores digitais, esta unidade permite a programação de múltiplas curvas de atuação (rápidas e lentas), tempos de religamento, contagem de operações e comunicação remota.

Figura 2 – Religador trifásico a esquerda e monofásico a direita.



Fonte: [Mesh Engenharia \(2023\)](#).

- **Transformadores de corrente (TCs):** são sensores que medem a corrente que flui pelo alimentador. Geralmente são do tipo "bucha", ou seja, integrados à estrutura isolante do polo do religador, de onde enviam os sinais para a unidade de controle.
- **Câmara de extinção de arco:** este é o componente onde ocorre a interrupção física da corrente de falta. Quando os contatos internos se separam, um arco elétrico é formado, e o meio isolante dentro da câmara atua para extingui-lo.
- **Bobina de operação:** é um atuador que recebe o sinal da unidade de controle para realizar o movimento mecânico de abrir ou fechar os contatos principais do religador. Os religadores frequentemente utilizam uma bobina de operação em série.
- **Isoladores (buchas):** são os componentes que isolam as partes energizadas do religador da sua estrutura metálica e do poste. É onde os cabos da rede são conectados.

O ciclo de operação de um religador é programado para maximizar a continuidade do serviço e consiste, tipicamente, nas seguintes etapas (GONEN, 2014): ao detectar uma sobrecorrente, o religador abre seus contatos rapidamente para interromper o circuito; permanece aberto por um tempo pré-definido para permitir que a falta se dissipe; e realiza tentativas de religamento. Caso a falta persista após

o número programado de tentativas, entra em bloqueio (*lockout*).

Vale destacar a forma utilizada pelo religador para interromper a corrente com base no princípio de extinção do arco elétrico. Esse arco é uma descarga de plasma gerada durante a abertura dos contatos e pode causar danos térmicos e mecânicos se não for eliminado rapidamente. Os dispositivos de interrupção atualmente utilizam tecnologia a vácuo, que permite a extinção do arco no ponto de corrente zero da onda alternada, com recuperação rápida da rigidez dielétrica (FILHO; MAMEDE, 2011). A ampola a vácuo abriga os contatos fixo e móvel, e a interrupção ocorre em ambiente selado, evitando oxidação e prolongando a vida útil do dispositivo.

Ainda sobre a unidade de controle do religador, antes eram utilizados sistemas de controle hidráulico, no qual a própria corrente de falta era usada para alimentar o mecanismo de operação. Composto por uma bobina em série, localizada dentro do tanque do religador, quando ocorre uma sobrecorrente, essa bobina puxa um êmbolo, que por sua vez abre os contatos principais e carrega uma mola de fechamento. O número de operações é determinado por um sistema de contagem mecânico imerso em óleo. E pela sua limitação em programar a quantidade e tempo de operação, esse modelo se tornou obsoleto (EATON, 2024).

Por sua vez, a evolução da eletrônica de potência possibilitou o surgimento de um método de controle que utiliza microprocessadores para oferecer uma ampla gama de funcionalidades de proteção e automação. Essas unidades de controle eletrônicas, são compostas por sensores de corrente e tensão, integrados ao religador, que enviam medições para um controle microprocessado externo, semelhante ao que mostra a Figura 1. Este controle analisa os dados e, se detectar uma falta, envia um sinal de *trip* para a bobina de abertura do religador.

2.1.3 Contexto da Linha de Montagem de Religadores

Para o referido trabalho, trataremos do equipamento como composto por três subconjuntos principais: **polos**, **tanque** e **cubículo**. E para a implementação da solução, concentra-se exclusivamente no tanque (Figura 3a), que abriga os elementos mecânicos do religador e os componentes eletrônicos responsáveis pelo controle do equipamento (Figura 3b).

Figura 3 – Componentes principais do religador.

(a) Tanque com polos montados.



(b) Cubículo com unidade de controle.



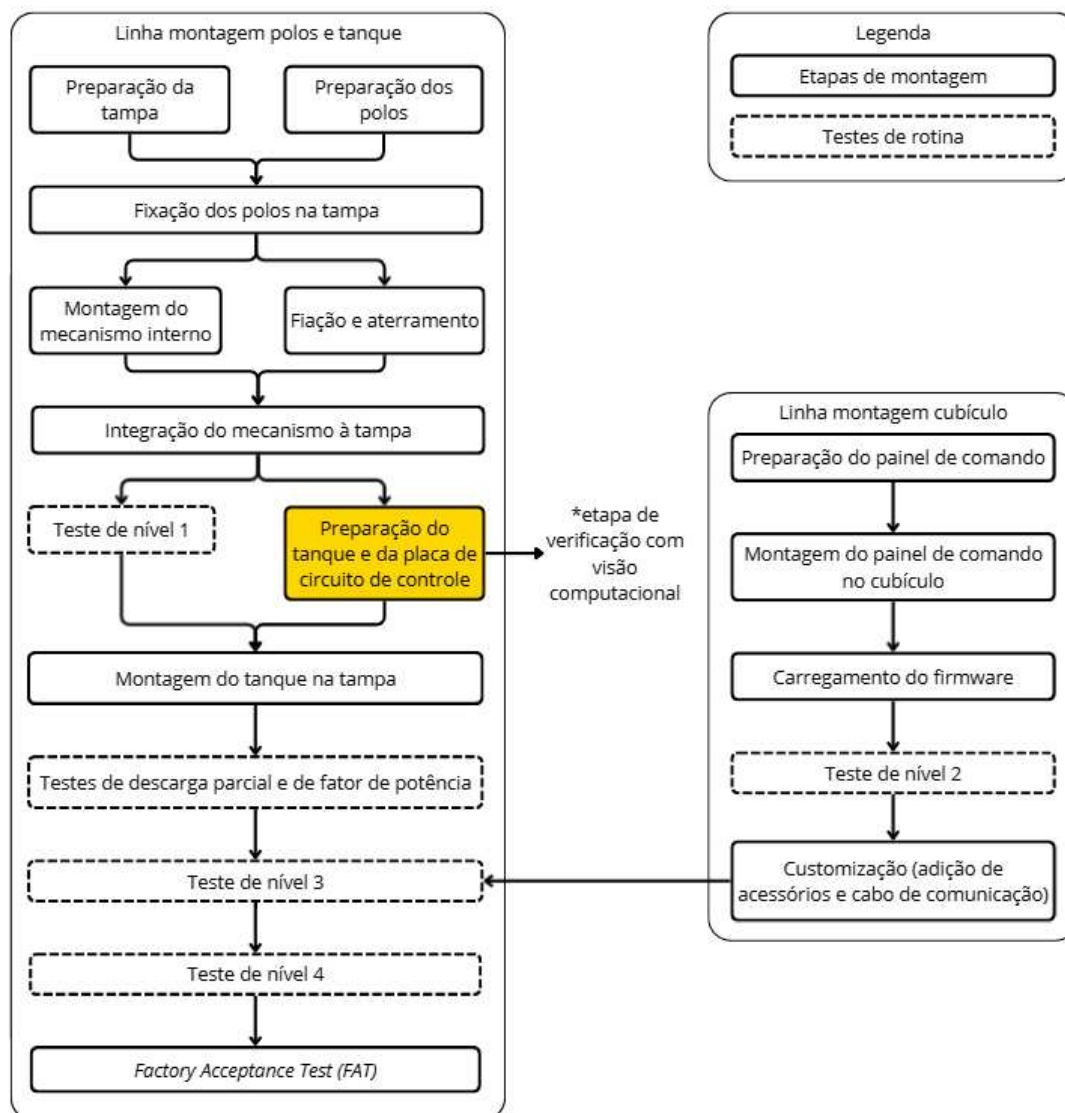
Fonte: Adaptado de (ELECTRIC, 2025).

A linha de montagem segue um fluxo estruturado e a Figura 4 apresenta essa sequência, com destaque para o posto de inspeção por VC, responsável por verificar os elementos de vedação. A inspeção ocorre em uma única estação, por onde obrigatoriamente todas as peças passam, funcionando como um ponto de controle que garante rastreabilidade e padronização do processo.

As etapas relevantes para este estudo, no que diz respeito à montagem e inspeção dos elementos de vedação, são descritas a seguir:

- **Instalação das borrachas laterais do tanque:** realizada em uma das primeiras etapas após a preparação do corpo metálico. Essas borrachas são fundamentais para a vedação da tampa superior do religador.
- **Montagem do respirador:** após a fixação da tampa, o conjunto de respiro (espuma + placa perfurada) é instalado na parte superior do tanque. Ele garante a equalização de pressão sem comprometer a vedação.

Figura 4 – Fluxo de montagem do religador.



Fonte: A autora.

- **Fixação da placa da unidade de controle:** na parte inferior do tanque, é realizada a instalação da base metálica que recebe o cubículo. Nessa etapa, são aplicadas borrachas de vedação no perímetro da superfície de fixação.
- **Inspeção por visão computacional:** após a montagem dos três elementos acima, o religador será direcionado para a estação de inspeção

automatizada. A câmera realiza a verificação da presença e posicionamento correto das borrachas do tanque, do respirador e da vedação da placa de controle. O resultado dessa análise é transmitido ao CLP, que determina a continuidade (ou não) do processo produtivo via sistema de intertravamento.

2.2 GESTÃO DA QUALIDADE

A gestão da qualidade é uma função estratégica essencial para assegurar a conformidade de produtos e processos com requisitos previamente estabelecidos, sendo crítica em setores industriais onde falhas representam riscos significativos, como o automotivo, aeroespacial e de dispositivos médicos (SADER; HUSTI; DAROCZI, 2022). Mas o conceito evoluiu e atualmente atinge sua quarta fase, denominada Qualidade 4.0 e representa a integração de tecnologias digitais como IA, IoT, *Big Data* e sistemas ciberfísicos às práticas clássicas de controle e garantia da qualidade.

Essa nova abordagem permite o monitoramento contínuo do processo produtivo e a tomada de decisão em tempo real, elevando o nível de rastreabilidade e confiabilidade na fabricação. E no contexto industrial, a aplicação de sistemas inteligentes de inspeção, como os baseados em VC está entre os principais exemplos de Qualidade 4.0 como mostrado no trabalho de Sader, Husti e Daroczi (2022). Esses sistemas são capazes de detectar defeitos automaticamente e comunicar os resultados a sistemas superiores, como o MES, eliminando a necessidade de inspeção e registro manual. A combinação de análise preditiva e intertravamento do processo, como proposto neste trabalho, está alinhada às práticas modernas de qualidade.

2.2.1 Detecção de Falhas em Processos de Montagem e PFMEA

Para antecipação de falhas na produção e garantia de que produtos finais sem defeitos cheguem ao mercado, uma metodologia consolidada é o PFMEA, que na verdade é a aplicação da ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) especificamente ao ambiente produtivo. Seu objetivo é antecipar riscos por meio da avaliação dos modos de falha, suas causas e consequências em cada etapa do

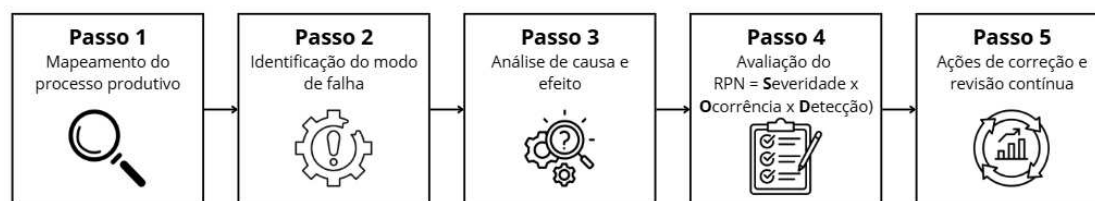
processo produtivo, possibilitando ações preventivas mais eficazes e garantindo maior confiabilidade da produção ao reduzir ineficiências que não eram vistas (KILARI, 2023).

O método baseia-se na avaliação sistemática de cada etapa do processo, classificando os riscos conforme três parâmetros principais: severidade (impacto da falha), ocorrência (probabilidade de acontecer) e detecção (capacidade de identificar a falha antes de afetar o cliente). A combinação desses fatores resulta no cálculo do RPN, indicador que orienta a priorização de falhas e define quais pontos exigem ações corretivas ou preventivas imediatas (KÖK; YILDIZ, 2023).

O PFMEA segue um fluxo lógico de aplicação que é apresentado na Figura 5. Inicialmente, o processo produtivo é mapeado em detalhes, com a identificação de cada etapa relevante. Para cada uma, são analisados os possíveis modos de falha, suas causas prováveis e os efeitos que podem gerar. Em seguida, os riscos são quantificados com base nos critérios mencionados e ordenados conforme seu RPN. A partir disso, são planejadas e executadas ações para reduzir os riscos mais críticos, seja por meio da melhoria do processo, da inclusão de controles adicionais ou de mudanças nos ciclos de operações. Por fim, o documento deve ser atualizado conforme houver modificações no processo ou quando novos dados indicarem a necessidade de revisão (KILARI, 2023).

Por sua abordagem preventiva e sistemática, o PFMEA é especialmente eficaz em ambientes industriais com exigência elevada de confiabilidade, como os setores automotivo, eletroeletrônico e de dispositivos médicos. Nessas áreas, a antecipação de falhas permite não apenas evitar prejuízos operacionais, mas também proteger a reputação da marca e garantir a segurança dos usuários finais.

Figura 5 – Etapas de construção do FMEA/PFMEA.



Fonte: Adaptado de (KILARI, 2023).

O estudo de Kök e Yıldız (2023) valida o uso prático do PFMEA na indústria

automotiva ao aplicá-lo em um processo de revestimento manual em um fornecedor que sofria com falhas recorrentes. A análise dos modos de falha e seus efeitos apontou a automação do processo como a principal ação corretiva para mitigar os riscos identificados. Após a implementação da automação, uma nova avaliação demonstrou uma redução de 69,8% no RPN total do processo.

E retornando ao contexto deste trabalho, a metodologia PFMEA é adotada na empresa onde o sistema foi desenvolvido, sendo aplicada de forma sistemática para mapear riscos de não qualidade e orientar decisões para implementar soluções. Um exemplo relevante dessa aplicação é o estudo de Ribeiro (2023), que foi realizado na mesma empresa do presente trabalho, mas em outra linha de montagem, a de painéis elétricos de média tensão. Na ocasião, foram identificados 89 modos de falha com base no PFMEA, e através da análise da causa, implementadas ações corretivas, com sistemas automatizados como o pick to light, que resultaram na redução do RPN de 64 modos de falha. Portanto, seguindo essa mesma abordagem, o sistema de visão computacional proposto neste trabalho foi desenvolvido com base nas falhas mapeadas no PFMEA da linha de montagem de religadores.

2.2.2 *Poka-Yoke*

O termo *Poka-Yoke* foi introduzido por Shigeo Shingo, engenheiro industrial no Sistema Toyota de Produção. A ferramenta, que significa "à prova de erros", se refere a mecanismos ou dispositivos incorporados ao processo de produção com o objetivo de prevenir falhas humanas, garantir a montagem correta de componentes ou alertar operadores sobre possíveis equívocos (SHINGO, 1986). Para Shingo (1986), o princípio fundamental do *Poka-Yoke* é evitar a ocorrência de defeitos em vez de apenas detectá-los posteriormente, baseando-se na inspeção na fonte e na ação imediata sempre que uma anomalia é detectada.

Com o avanço da Indústria 4.0, o conceito foi expandido para incluir soluções digitais, também denominadas de *Poka-Yoke* digitais (STADNICKA; ANTONELLI, 2024). Esses sistemas utilizam sensores, automação, e análise de dados em tempo real para prevenir as falhas. Em vez de um pino físico que impede a montagem incorreta, por exemplo, um sistema de visão computacional pode verificar automaticamente se uma peça está posicionada corretamente antes de permitir a

continuidade do processo. E no presente trabalho o sistema de visão é intertravado ao sistema produtivo MES, o caracterizando como *Poka-Yoke* digital.

2.3 FUNDAMENTOS DA VISÃO COMPUTACIONAL

A visão computacional é um campo interdisciplinar que desenvolve algoritmos e modelos capazes de interpretar o mundo tridimensional a partir de dados visuais (imagens e vídeos). Conforme explicado por Szeliski (2010), ela busca recuperar propriedades físicas de uma cena, como forma, posição, cor e iluminação, a partir de projeções bidimensionais capturadas por sensores de imagem. Trata-se de um problema inverso, no qual se estima a causa (a cena real) a partir do efeito observado (a imagem). Para isso, utiliza-se uma combinação de modelos geométricos, estatísticos e de aprendizado de máquina.

O processamento de imagens é um componente central da visão computacional. Ele envolve desde operações pontuais simples, como ajuste de brilho ou contraste, até técnicas avançadas de filtragem, segmentação e correspondência de características. Tarefas como a detecção de cantos (por exemplo, com o detector de Harris), extração de descritores robustos como o *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) e segmentação baseada em cortes de grafo ou contornos ativos são fundamentais em aplicações que exigem precisão, como inspeção industrial ou reconstrução 3D (SZELISKI, 2010).

O reconhecimento de padrões visuais na visão computacional busca identificar objetos ou classes de objetos em imagens, enfrentando desafios como variação de pose, iluminação, oclusões e alta variabilidade intra-classe. Para lidar com esses fatores, os sistemas modernos evitam comparações diretas entre imagens e, em vez disso, extraem representações mais robustas e invariantes por meio de aprendizado de máquina (SZELISKI, 2010). Um modelo clássico para reconhecimento de categorias é o *bag of features*, que segue o fluxo:

1. **Extração de características e vocabulário visual:** primeiramente, o sistema detecta características locais invariantes (como SIFT) em um conjunto de imagens de treinamento. Esses descritores são agrupados por algoritmos de clusterização, formando um vocabulário visual onde cada centro de grupo representa uma "palavra visual".

2. **Representação da imagem:** as imagens são então convertidas em histogramas que quantificam a frequência de ocorrência dessas palavras visuais, formando vetores de alta dimensão que representam o conteúdo visual.
3. **Classificação:** esses vetores são usados como entrada para classificadores, como Máquinas de Vetores de Suporte (SVMs), que aprendem a separar categorias, por exemplo, peças boas e defeituosas, com base em padrões estatísticos.

Essa abordagem é útil em aplicações industriais porque não depende da posição exata das características na imagem, tornando o sistema mais tolerante a deformações e oclusões parciais, comuns em ambientes produtivos.

2.3.1 Sistemas de Visão Computacional para Inspeção Industrial

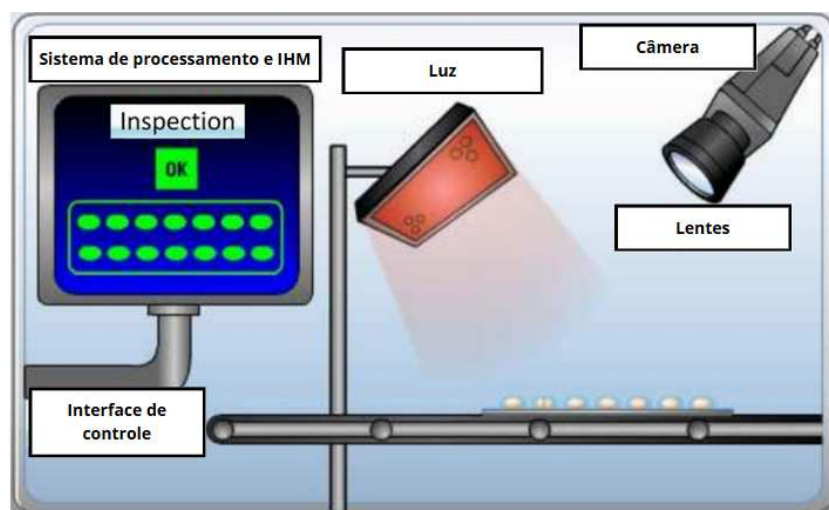
Quando aplicadas à indústria, essas técnicas passam a compor sistemas conhecidos como *Vision-Based Measurement Systems* (VBM), ou sistemas de medição e inspeção baseados em visão. De acordo com Lins, Santos e Gaspar (2023), tais sistemas desempenham um papel essencial na garantia da qualidade de processos produtivos, oferecendo recursos como inspeção dimensional sem contato, verificação da presença e posicionamento de componentes, detecção de defeitos superficiais e rastreabilidade de peças.

A arquitetura de um sistema de visão industrial geralmente é composta pelos componentes mostrados na Figura 6 e são:

- Unidade óptica (câmera, lente e iluminação), responsável pela aquisição da imagem;
- Sistema de processamento, que executa algoritmos de pré-processamento e inferência;
- Interfaces de controle e comunicação, que integram o sistema à automação industrial, como CLP e MES.

A qualidade das imagens obtidas está diretamente ligada à escolha da lente (frequentemente telecêntrica em aplicações metrológicas), à iluminação (uniforme e controlada), à resolução do sensor e à calibração precisa do sistema óptico (LINS;

Figura 6 – Arquitetura típica de um sistema de visão industrial.



Fonte: adaptado de (LINS; SANTOS; GASPARG, 2023).

SANTOS; GASPARG, 2023). Falhas nesses aspectos comprometem diretamente a precisão do sistema e elevam a taxa de falsos positivos ou negativos na linha de produção.

2.3.1.1 Módulo de Iluminação

A iluminação é um dos componentes de um sistema de visão, sendo responsável por fornecer a luz adequada para que a câmera possa criar uma imagem nítida e útil. Sistemas industriais quase sempre utilizam iluminação projetada para minimizar a influência da luz ambiente e garantir a consistência dos resultados (WEST, 2021). Ainda segundo West (2021), as técnicas de iluminação podem ser diferenciadas das seguintes formas:

- Frontal ou traseira (*backlight*): na iluminação frontal, a fonte de luz e a câmera estão do mesmo lado do objeto, enquanto na iluminação traseira, a fonte está no lado oposto, criando uma silhueta do objeto.
- Campo claro (*brightfield*) e campo Escuro (*darkfield*): a iluminação de campo claro é aquela a ser refletida diretamente para a lente da câmera, enquanto a de campo escuro é posicionada em um ângulo que não entra diretamente na lente, sendo útil para destacar defeitos em superfícies.

- Direta ou difusa: a iluminação direta lança sombras fortes e realça texturas, enquanto a iluminação difusa produz pouca ou nenhuma sombra, sendo ideal para eliminar reflexos e obter uma imagem mais homogênea.

2.3.1.2 Lente

A lente é um componente crítico que atua em conjunto com o sensor da câmera para determinar o campo de visão (a área da cena a ser gerada) e a distância de trabalho. Sua função é formar a imagem óptica sobre o sensor. Segundo (WEST, 2021), existem diferentes tipos de lentes para aplicações específicas: entrocêntricas, que são as mais comuns; lentes macro, projetadas para altas magnificações em curtas distâncias; e as lentes telecêntricas, que eliminam a distorção de perspectiva e mantêm a magnificação constante mesmo com pequenas variações na altura do objeto, sendo ideais para medições de precisão.

2.3.1.3 Câmera (Módulo de Detecção)

A câmera é o dispositivo que captura a imagem óptica formada pela lente e a converte em uma imagem digital para ser processada. Seu principal componente é o sensor de imagem, que define muitas das suas características mais importantes. O sensor é composto por um arranjo de elementos fotossensíveis (*pixels*) que convertem os fótons (luz) incidentes em cargas elétricas, gerando os valores numéricos que compõem a imagem digital (WEST, 2021). As imagens mais comuns são as de escala de cinza, mas também existem sistemas que utilizam imagens coloridas ou 3D.

2.3.2 Aplicações e Benefícios na Indústria 4.0

No contexto da Indústria 4.0, a visão computacional é uma das tecnologias habilitadoras mais relevantes para a Qualidade 4.0, pois permite inspeção 100% automatizada de produtos, reduzindo a subjetividade associada à inspeção manual e possibilitando análises em tempo real (LINS; SANTOS; GASPAR, 2023).

Essencialmente, a VC converte dados visuais não processados em informações úteis, possibilitando assim que sistemas ciber-físicos realizem a tomada de decisão em tempo real (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). A crescente

demanda por precisão, velocidade e confiabilidade em setores como automotivo, eletrônico, farmacêutico e agrícola impulsionou o uso de sistemas de visão para além de uma ferramenta de nicho, considerando-se um componente indispensável da automação industrial (GHOBAKHLOO *et al.*, 2021).

Contudo, a implementação desta tecnologia no chão de fábrica se difere de seu uso em ambientes controlados de laboratório ou de aplicações comerciais. O ambiente industrial é mais complexo e muitas vezes hostil para sistemas sensíveis a variações. Desafios como iluminação sem padronização, reflexos em superfícies metálicas ou de vidro, obstruções parciais por outros objetos ou pela própria máquina, presença de sujeira, e vibrações constantes, são extremamente comuns nestes ambientes (LINS; SANTOS; GASPAR, 2023).

Por isso algoritmos de IA, como *machine learning* supervisionado ou *deep learning*, têm sido incorporados a esses sistemas para lidar com variabilidades de defeitos, iluminação e formas complexas. Como destaca Szeliski (2010), o uso de extração automática de características permite que modelos aprendam padrões diretamente dos dados, tornando-os mais robustos e adaptáveis a variações do processo.

Um exemplo sobre a interferência dos reflexos no processamento de imagens, é a inspeção de qualidade de impressões em garrafas de vidro. A forma das garrafas pode apresentar pequenas variações decorrentes do processo de fabricação, fazendo com que os reflexos da iluminação do ambiente se concentrem em diferentes pontos das garrafas. Isso torna ineficazes os métodos tradicionais de comparação com uma imagem de referência, pois o sistema precisa entender se é um reflexo ou uma rachadura (BUNDSCHERER; SCHMITT; BOCKLET, 2023). Outro exemplo é a inspeção de placas de circuito eletrônico. A detecção de falhas minúsculas ou a ausência de componentes muito pequenos pode ser um desafio para sistemas de VC convencionais, como mostra o projeto do mestrando Silvio da Cruz na Inatel (2021).

Como já citado algumas vezes neste trabalho, o avanço da indústria 4.0 gerou o aumento de velocidade das linhas de produção, o que impõe desafios à inspeção manual, que frequentemente não consegue acompanhar o ritmo nem garantir a precisão exigida nos processos de controle de qualidade. Nesse contexto, a automação baseada em VC tem se consolidado como uma alternativa eficaz para

cobrir essas limitações operacionais.

Um caso que demonstra isso foi o desenvolvimento de um sistema para o ajuste e correção de trajetórias de robôs industriais. Em processos como soldagem ou corte, a robotização tradicional exige que as peças estejam fixadas em gabaritos em posições extremamente padronizadas, onde qualquer deslocamento pode gerar falhas. Para superar o obstáculo, um sistema de visão computacional foi aplicado para definir a trajetória de um robô industrial seguindo o contorno de peças. O sistema utiliza uma câmera para obter e tratar as imagens e um CLP para controlar o processo e comandar o robô para realizar a operação. Isso permite que a trajetória do robô seja alterada em tempo real para se adaptar a variações de posição e ângulo da peça. Após uma fase de calibração e ajustes, o sistema foi validado demonstrando a viabilidade de substituir a programação manual e o uso de gabaritos físicos (NASCIMENTO MIURA, 2023).

De maneira semelhante, outro exemplo de aplicação no ambiente industrial é o desenvolvimento de um sistema automatizado para a realização de costuras utilizando máquinas *overlock*. Tradicionalmente, esse processo depende do posicionamento manual de bolsos em gabaritos e da operação contínua de costureiras, o que gera variabilidade e cansaço físico. Para superar essas limitações, foi aplicado um sistema de visão computacional embarcado em um robô colaborativo capaz de identificar a posição do bolso na mesa de costura e ajustar sua trajetória em tempo real. A câmera integrada capta a imagem do bolso, e os dados processados orientam os movimentos do robô, que conduz o tecido até a máquina de costura. Além disso, um Arduino foi utilizado para simular eletronicamente os comandos do pedal, permitindo o controle do processo sem a intervenção humana. Após a calibração do sistema e validação em ambiente fabril, o projeto demonstrou ser capaz de substituir o processo manual com ganhos em padronização e ergonomia (FERNANDES, 2024).

Então, pode-se afirmar que refrações em garrafas de vidro, variações de iluminação, acúmulo de sujeira e diferenças no posicionamento das peças são condições frequentemente encontradas em ambientes industriais e representam desafios significativos para a aplicação de VC. Essas variabilidades, presentes tanto em processos de inspeção de embalagens quanto em operações de costura automatizada, exigem que o sistema seja projetado para lidar com contextos imprevisíveis e

não padronizados, (BUNDSCHERER; SCHMITT; BOCKLET, 2023) e (FERNANDES, 2024). Nesses casos, o desempenho não depende exclusivamente da escolha de um algoritmo específico, mas do desenvolvimento de uma cadeia completa de processamento, que compreende desde estratégias de aquisição e pré-processamento de imagens até a tomada de decisão final.

2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)

Os CLPs são definidos como computadores industriais robustos, sendo sua função principal o controle de máquinas e processos de manufatura (GROOVER, 2021). Diferentemente de computadores de uso geral, o CLP é projetado para operar em ambientes industriais, suportando variações de temperatura, umidade, ruído elétrico e vibração. Sua arquitetura modular e programação flexível o tornaram um substituto natural para os antigos painéis de relés e lógica cabeada, oferecendo maior confiabilidade, menor custo em aplicações complexas e a capacidade de alterar a lógica de operação sem modificar a fiação física (CAPELLI, 2022).

2.4.1 Partes do CLP

É um sistema modular, e sua arquitetura é projetada para ser escalável, permitindo a aplicação desde projetos simples como o acionamento de um exaustor com base em temperaturas a aplicações complexas, como controle de um motor com controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Conforme detalhado por Petruzella (2022), a sua estrutura básica é composta por quatro elementos:

- CPU (*Central Processing Unit*): realiza operações que envolvem a leitura do estado das entradas, o processamento da lógica programada e a atualização do estado das saídas. Internamente, a CPU é composta por um microprocessador que realiza os cálculos lógicos e aritméticos e um sistema de memórias, divididas em memória de programa e memória de dados.
- Fonte de alimentação: a fonte de alimentação é o componente responsável por converter a tensão da rede elétrica urbana, geralmente alternada,

para as tensões contínuas necessárias para alimentar a CPU e os módulos de entradas e saídas.

- Módulos de entradas e saídas (I/O): a interface com o processo físico. Conforme descrito por, ambas podem ser discretas (sinais digitais, *on/off*) ou analógicas (sinais variáveis, como faixas de corrente ou tensão elétrica, para medir temperatura, pressão, nível, entre outros).
- Interface ou módulo de comunicação: permite a interação com outros dispositivos e sistemas como IHM (Interface Homem-Máquina).

2.4.2 Lógica Ladder

A Lógica *Ladder*, ou Diagrama de Contatos, é a linguagem de programação mais tradicional e difundida para CLPs. Sua popularidade deriva da sua semelhança visual com os diagramas de circuitos elétricos a relés, o que a torna intuitiva para eletricistas. A programação em *Ladder* consiste em *networks* ou linhas de lógica, onde combinações de contatos (representando as entradas ou condições) determinam se uma bobina (representando uma saída ou ação) deve ser energizada. Além das instruções básicas, a linguagem inclui blocos funcionais para operações mais complexas, como temporizadores, contadores e manipulação de dados (PETRUZELLA, 2022; WANG, 2021).

Para facilitar a programação, pode ser utilizada a técnica de Máquinas de Estados Finitos, que modela processos como um conjunto de estados — etapas bem definidas — e transições — condições que causam a mudança de um estado para outro. Programar em Máquinas de Estados permite uma visualização clara e estruturada do fluxo do processo, facilitando desde o desenvolvimento até a depuração do código (WANG, 2021).

2.4.3 Comunicação Modbus

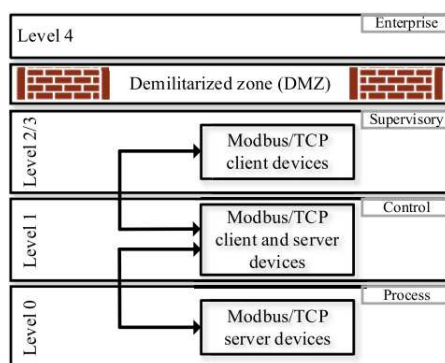
O *Modbus* é um dos protocolos de comunicação mais antigos utilizados em projetos industriais com CLP, desenvolvido em 1999 pela empresa *Modicon*, é valorizado principalmente por ser um padrão aberto. Ele opera em um modelo mestre-escravo ou cliente-servidor em sua versão *Transmission Control Protocol/Internet*

Protocol (TCP/IP), onde um dispositivo mestre solicita dados ou envia comandos para dispositivos escravos na rede (KATULIĆ *et al.*, 2023).

A Figura 7 representa uma arquitetura típica de sistemas de automação industrial baseada no modelo de referência *Purdue*, que organiza os componentes do sistema em níveis hierárquicos de operação. Essa estrutura visa segmentar as funções de controle, supervisão e gerenciamento empresarial.

- Nível 0: compreende os dispositivos *Modbus*/TCP do tipo servidor, como sensores e atuadores.
- Nível 1: os dispositivos que atuam como clientes (mestres) e servidores *Modbus*/TCP, como CLP, responsáveis pelo controle direto dos equipamentos do processo.
- Nível 2/3: sistemas de supervisão e IHM, atuando como clientes *Modbus*/TCP (escravos), que solicitam dados e comandos para monitoramento e operação.
- Nível 4: Representa o nível corporativo da organização, onde estão os sistemas de planejamento e gestão (ERP, MES). A comunicação entre esse nível e os demais é controlada por uma Zona Desmilitarizada (DMZ), com *firewalls* que garantem a segurança na troca de informações entre o ambiente operacional e o ambiente de TI.

Figura 7 – Arquitetura típica de sistemas de automação industrial.



Fonte: (KATULIĆ *et al.*, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo detalha a metodologia empregada no desenvolvimento e validação do sistema de visão computacional proposto para o controle de qualidade na montagem de religadores. Este trabalho configura-se como um estudo de caso aplicado em ambiente industrial real, com foco na implementação prática e na avaliação da eficácia da solução.

A abordagem metodológica inicia-se com o levantamento de requisitos específicos do processo produtivo. Em sequência, são descritos os materiais utilizados e os sistemas periféricos selecionados, com ênfase na sua adequação aos desafios identificados. Detalha-se a integração do sistema de visão com o CLP e deste com o MES, cuja arquitetura geral e o fluxo de processamento serão ilustrados por meio de diagramas de sistema e de blocos. Por fim, são delineados os procedimentos para os testes experimentais, incluindo a definição do volume de peças a serem inspecionadas e os métodos para a coleta empírica de dados em linha, visando validar a funcionalidade, o desempenho e a viabilidade da solução proposta no contexto real da produção.

3.0.1 Análise do PFMEA

A criticidade da etapa de vedação do tanque foi identificada por meio da análise do PFMEA aplicada à linha de montagem dos religadores. Esta etapa apresentou um elevado RPN (*Risk Priority Number*), principalmente devido à alta severidade associada às consequências de uma falha nesse ponto do processo. Como exigência da metodologia, o PFMEA deve apresentar um plano de ação que possibilite a redução do RPN para, no máximo, 112 pontos. Com base nesse requisito, definiu-se a implementação de um sistema de inspeção automatizado por câmera inteligente.

A Tabela 1 apresenta os modos de falha identificados, com base em registros históricos e na análise de potenciais lacunas no processo. As notas de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D) foram atribuídas com base no manual FMEA AIAG-VDA, (AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG); VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA), 2019), uma publicação desenvolvida em colaboração por duas associações da indústria automotiva do mundo: a norte-americana

Automotive Industry Action Group (AIAG) e a alemã *Verband der Automobilindustrie* (VDA). No entanto, a aplicação desses critérios foi adaptada para refletir a realidade específica dos processos da fábrica onde o trabalho foi desenvolvido, garantindo que a análise de risco seja relevante para a implementação do PFMEA.

Tabela 1 – Descrição inicial dos modos de falha identificados.

ID	Etapas	Potencial modo de falha	Potencial efeito final
1	Preparação do tanque	Esquecer de montar a borracha no tanque	A entrada de umidade causa falha de PD e, com o tempo, leva à falha total
2	Preparação do respirador	Esquecer de montar o respirador e a espuma no tanque	A entrada de umidade dentro do tanque causa curto-circuito no circuito da placa de controle, levando à falha das operações
3	Preparação da placa de controle	Esquecer de montar a borracha no suporte da placa de controle	A entrada de água nos componentes da placa causará falha nas operações

Fonte: A autora.

A nota de severidade foi definida com base na gravidade do efeito final de cada falha. No caso da falta de vedação do tanque, o risco de comprometimento da segurança do usuário justifica a atribuição da nota máxima. Para os demais casos, nos quais a falha compromete apenas o funcionamento do equipamento, foi atribuída uma nota inferior.

A ocorrência foi avaliada considerando o histórico de falhas registradas e o tipo de controle atualmente empregado. Como todas as etapas envolvem montagem manual controlada apenas por instruções de trabalho e treinamentos operacionais, e há registros de falhas associadas, a ocorrência foi classificada com nota elevada.

Quanto à detecção, a nota foi atribuída com base nas escalas de classificação de controles de processo, que consideram a eficácia do método em identificar a falha. Métodos como a inspeção visual realizada pelo operador, por dependerem totalmente da atenção humana, são classificados como de baixa eficácia nas diretrizes de PFMEA. Entretanto, o método está complementado por uma instrução de trabalho padronizada que auxilia o operador, impedindo que a nota alcance o

valor máximo neste critério. Portanto, a atribuição da nota 7 representa a aplicação dessa orientação ao processo, indicando uma capacidade de detecção considerada baixa pela equipe que avaliou.

Na Tabela 2 é apresentado o novo cenário com a implementação da câmera inteligente, a severidade permanece inalterada, pois os impactos potenciais da falha continuam os mesmos. A ocorrência também não foi alterada, uma vez que a operação segue sendo manual e a introdução de dispositivos físicos para garantir o acerto na montagem não foi considerada viável, dado o baixo tempo de ciclo. No entanto, a detecção foi significativamente aprimorada com a automação da inspeção, que agora atua como um sistema de intertravamento digital no processo produtivo. Essa solução configura um *Poka-Yoke* digital, capaz de detectar falhas com alta confiabilidade e impedir o avanço da peça defeituosa na linha. Com isso, a nota de detecção foi reduzida ao mínimo (1), resultando na queda do RPN de 490 e 343 para 70 e 49, valores dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pela empresa.

Tabela 2 – Análise do PFMEA antes e depois da implementação do sistema de visão computacional

ID	Etapa		S	O	D	Modo de detecção	RPN
Situação Inicial							
1	Preparação tanque	do	10	7	7	Inspeção visual	490
2	Preparação tanque	do	7	7	7	Inspeção visual	343
3	Preparação placa de controle	da	7	7	7	Inspeção visual	343
Situação Final							
1	Preparação tanque	do	10	7	1	Inspeção automática com intertravamento MES	70
2	Preparação tanque	do	7	7	1	Inspeção automática com intertravamento MES	49
3	Preparação placa de controle	da	7	7	1	Inspeção automática com intertravamento MES	49

Fonte: A autora.

3.0.2 Elementos Avaliados pelo Sistema de Visão

O sistema de visão computacional desenvolvido neste trabalho realiza a inspeção automatizada de três componentes críticos relacionados à estanqueidade do religador:

1. **Vedação lateral do tanque:** duas borrachas elastoméricas, instaladas nas laterais da tampa superior do tanque, responsáveis por garantir a vedação do corpo que armazena o mecanismo de funcionamento do polo, como mostra a Figura 8a.
2. **Conjunto do respirador:** composto por uma espuma filtrante e uma placa metálica perfurada, como mostra a Figura 8b, instalada na parte superior do tanque. Este conjunto atua no controle da pressão interna sem comprometer a estanqueidade.
3. **Vedação da superfície de fixação da placa de controle:** borrachas instaladas na base onde a unidade de controle do religador é montada, assegurando a vedação da cavidade que abriga os componentes eletrônicos (Figura 8c).

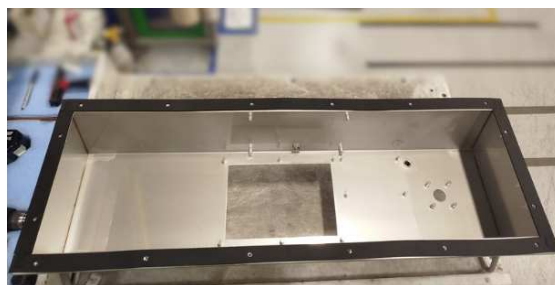
Apesar de comporem uma montagem completa, vide Figura 9, esses três elementos foram tratados como etapas independentes de inspeção no sistema de visão, sendo cada um avaliado por um programa específico treinado por aprendizagem supervisionada no software da câmera.

3.1 SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL

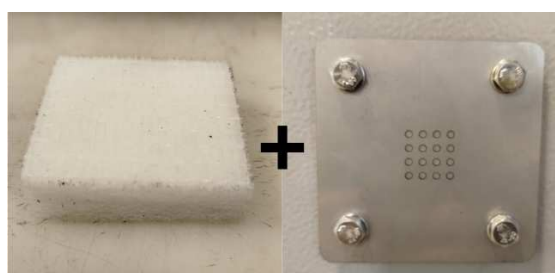
O componente central da detecção dos componentes citados no capítulo anterior, é o sistema de visão computacional. A escolha dos elementos que compõem esse sistema foi delimitada pela necessidade de robustez, por se tratar de um ambiente industrial, capacidade de processamento embarcado e facilidade de integração com os demais componentes. Este sistema é composto por uma câmera, amplificador do sensor, software de configuração e o acessório de iluminação.

Figura 8 – Componentes avaliados pelo sistema de visão.

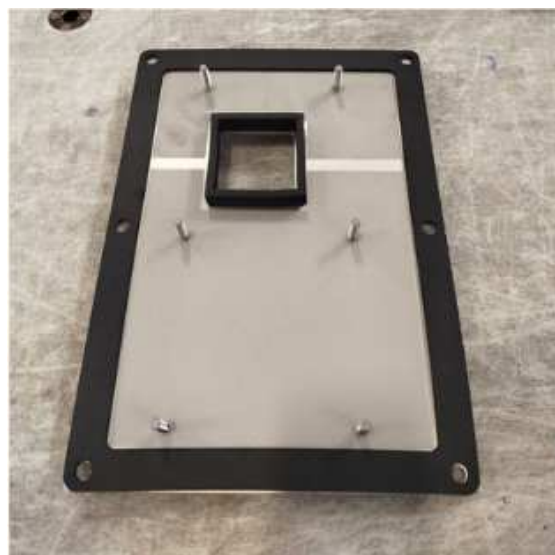
(a) Borrachas de vedação do tanque.



(b) Conjunto do respirador.

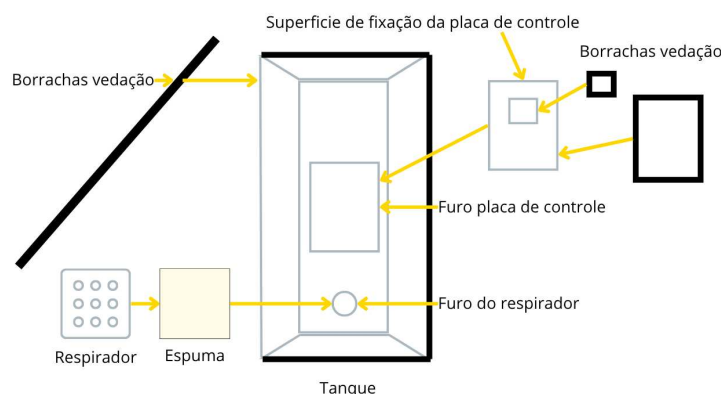


(c) Borrachas da superfície de fixação da placa de controle.



Fonte: A autora.

Figura 9 – Exemplificação da montagem completa do tanque com respirador e superfície de fixação.



Fonte: A autora.

3.1.1 Sensor de Visão com IA Integrada da Série IV3

Para a aquisição e processamento das imagens, optou-se pela câmera da série IV3 da Keyence. A escolha deste equipamento se justifica por seu custo-benefício e pela confiabilidade da marca, já utilizada com desempenho satisfatório em outras fábricas. Especificamente, o sistema utiliza o amplificador/controlador modelo IV3-G120, o equipamento possui a vantagem de permitir o processamento integrado e uma variedade de interfaces de comunicação.

De acordo com o manual do fabricante (KEYENCE CORPORATION, 2021a), as características do sistema IV3 relevantes para esta aplicação incluem:

- **Câmera inteligente:** a cabeça sensora utilizada é do modelo IV3-500GCA (Figura 10a), equipada com um sensor CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) colorido de 1/2,9" (polegadas), com resolução de 1280×960 pixels. Essa resolução é adequada para inspeções detalhadas, permitindo a detecção de pequenas variações na montagem de peças.

- **Iluminação integrada:** A unidade de iluminação utilizada é o modelo IV3-LG5C (Figura 10b), composta por LEDs brancos de alta intensidade e controle automático de brilho e métodos de ajuste por meio de IA. Esse ajuste garante imagens padronizadas mesmo com variações de iluminação ambiente e cor ou textura na superfície das peças.
- **Processamento embarcado:** O controlador IV3-G120 (Figura 10c) realiza o processamento diretamente no dispositivo, sem necessidade de um computador externo. Ele permite configurar e executar ferramentas de inspeção baseadas em IA, com capacidade de aprendizado automático e operação em tempo real.

Além disso, o sistema permite a execução de múltiplas ferramentas simultaneamente, como verificação de contorno, presença ou ausência, cor e forma. Também é possível configurar o procedimento de alternância automática de programas para vários processos utilizando a mesma câmera.

- **Interfaces de comunicação:** O sistema oferece suporte a diversos protocolos de comunicação industrial, como EtherNet/IP, Profinet, TCP/IP, FTP/SFTP e 8 Entradas/Saídas (E/S) digitais configuráveis. Nesta aplicação, foi adotada a comunicação via E/S digitais com o CLP.
- **Durabilidade e facilidade na montagem:** Todos os componentes do sistema possuem grau de proteção IP67, sendo projetados para ambientes industriais com exposição a poeira, umidade, vibração e variações térmicas.

A instalação da câmera foi realizada utilizando o suporte ajustável OP-88639, que permite posicionamento articulado e preciso do conjunto óptico. Esse suporte facilita a regulação do ângulo e da distância focal, garantindo a estabilidade do enquadramento.

3.1.2 Controlador Lógico Programável (CLP) e Módulo de Expansão

O componente responsável pelo funcionamento do gerenciamento da comunicação entre os dispositivos e a implementação da lógica de intertravamento é um

Figura 10 – Componentes principais do sistema de visão computacional IV3 da Keyence.



Fonte: (KEYENCE CORPORATION, 2021a).

CLP de modelo Modicon TM251MESE (Figura 11a). A seleção deste controlador específico atendeu a uma exigência da empresa, que o adota como padrão devido às suas capacidades de comunicação e processamento, adequadas às demandas do projeto.

Para a interface com os dispositivos de entrada e saída discretos, como o botão físico e a sinaleira, o CLP está equipado com o módulo de expansão digital TM3DM8R (Figura 11b), que oferece as entradas e saídas necessárias para essas interações.

Figura 11 – Componentes do sistema de controle utilizados na integração com a câmera.



Fonte: (SCHNEIDER ELECTRIC, 2019).

A utilização do M251 é fundamental para a comunicação segura com o amplificador da câmera e para segurança operacional da linha por meio do intertravamento lógico do MES.

3.1.3 Interfaces Homem-Máquina (IHM) e Sinalização

Para disparar a câmera, o operador pode usar um botão físico instalado na bancada, ligado direto ao amplificador da câmera, ou um botão digital disponível na tela do sistema de produção. Quando o botão é acionado, um sinal é enviado ao CLP, que comanda a câmera para capturar e processar a imagem.

O resultado da inspeção feita pela câmera é mostrado ao operador de duas formas. A primeira é por meio de um sinaleiro (torre de luz), que indica o resultado de forma rápida e visual: luz verde significa que a peça está aprovada e pode seguir na linha, e luz vermelha indica que a peça está reprovada e deve ser retida. E a segunda forma é pela tela do computador. Depois que o CLP recebe o resultado da câmera, ele envia essa informação para o MES, que mostra na tela se o operador deve repetir a montagem ou seguir para a próxima etapa.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA DO SISTEMA

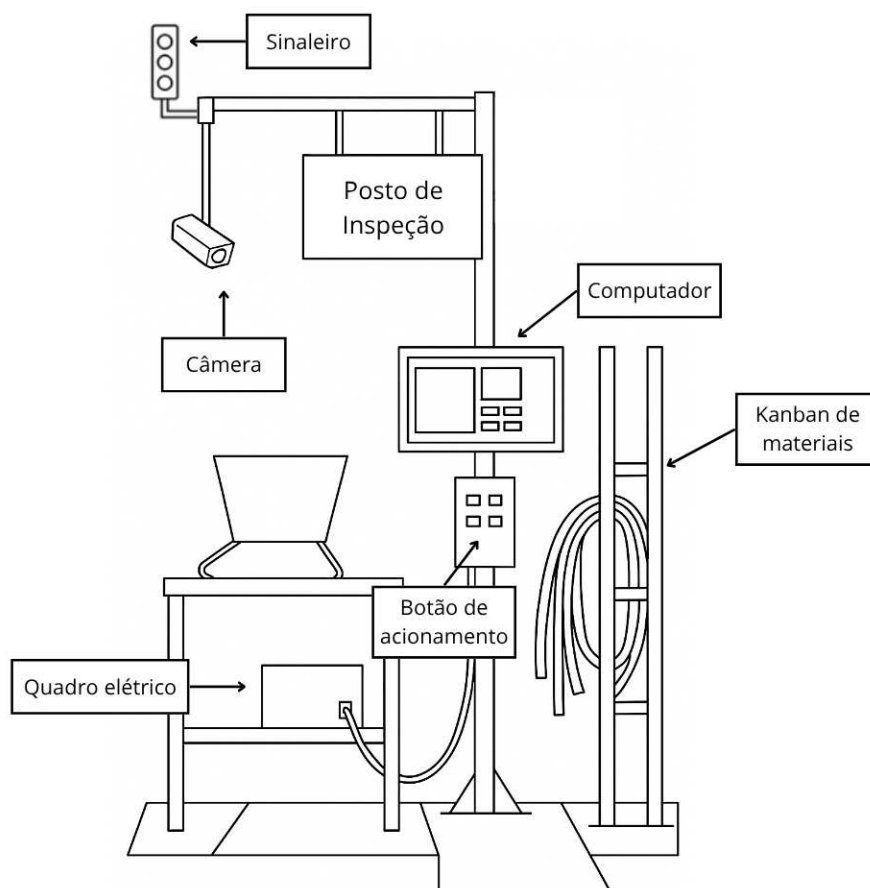
Este capítulo descreve as etapas práticas da implementação do sistema de visão computacional desenvolvido para inspeção de qualidade na linha de montagem dos religadores. Foram abordadas as particularidades do ambiente físico de produção, o posicionamento estratégico da câmera, a interligação com o CLP e a comunicação com o sistema CLP da fábrica. Além disso, este capítulo apresenta os critérios adotados para o posicionamento da câmera em relação à peça inspecionada, as dimensões relevantes das peças de montagem e a disposição dos equipamentos no posto de trabalho.

3.2.1 Descrição do Ambiente

O espaço onde acontecem as sub-montagens dos itens apresentados está simplificada no desenho da Figura 12. Com os materiais dispostos em *kanbans* próximos da bancada onde são anexadas as borrachas e o respirador. A tela de

computador ficam próximos da bancada também, facilitando acionamento da câmera e visualização dos resultados.

Figura 12 – Ambiente de montagem e inspeção de vedação.



Fonte: A autora, adaptado de .

Como trata-se de um ambiente fabril, o espaço é caracterizado pela movimentação constante de peças, operadores e equipamentos auxiliares. Tal dinâmica exige que todos os componentes do sistema de visão, especialmente a câmera e seus suportes, sejam instalados de forma robusta e com fixação adequada para resistir a vibrações e garantir a estabilidade do posicionamento ao longo do tempo, minimizando a necessidade de recalibrações frequentes.

3.2.2 Posição da Câmera

Para determinar a altura de instalação da câmera, foi utilizada a peça de maior dimensional inspecionada, o tanque. Como pode ser visto na Figura 13a, as dimensões de inspeção são de aproximadamente 990 mm x 310 mm.

Figura 13 – Características físicas do ambiente de inspeção.



(a) Dimensões do tanque onde são montadas as borrachas inspecionadas.

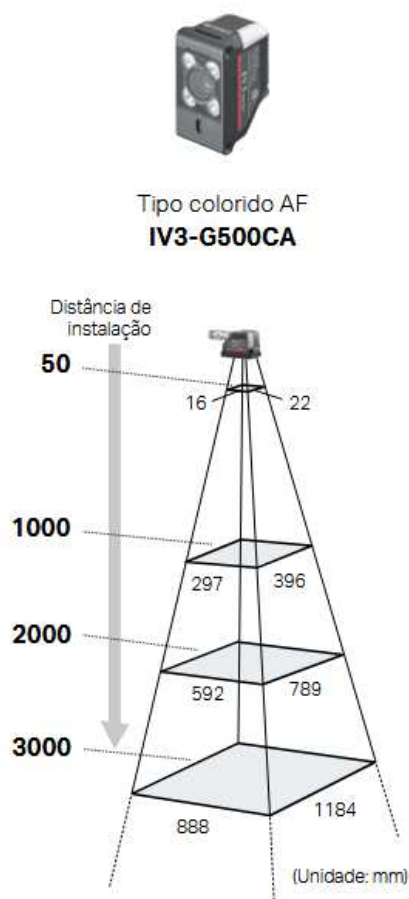
(b) Altura da mesa de trabalho com peça e altura de instalação da câmera.

Fonte: A autora.

O fabricante fornece uma tabela de FOV (*Field of View*) associada a diferentes distâncias de trabalho, conforme mostra a Figura 14. Isso se deve ao fato de que, por utilizar uma lente líquida com foco automático, a câmera não possui uma distância focal fixa para utilizar em cálculos ópticos tradicionais. Fazendo uma

aproximação a partir dos valores da já conhecidos da tabela, a câmera deveria ser instalada a pelo menos 2.5 m de distância do alvo que tem 30 cm de altura e se encontra sobre uma mesa de 100cm de altura, representadas na Figura 13b).

Figura 14 – Tabela de FOV da câmera utilizada.



Fonte: (KEYENCE CORPORATION, 2021a).

Contudo, a instalação da câmera encontrou uma limitação prática no posto de montagem do tanque: uma talha instalada acima da área de trabalho, utilizada para a movimentação do tanque devido a sua elevada massa, que ultrapassa os limites permitidos pelas normas ergonômicas. Essa talha restringe o espaço disponível na vertical, impossibilitando a instalação na altura inicialmente planejada.

Diante desse obstáculo, foi necessário adotar uma solução alternativa para garantir o enquadramento completo da peça. Utilizou-se a inclinação do suporte articulado fornecido pelo fabricante, que permite ajustar o ângulo da câmera sem

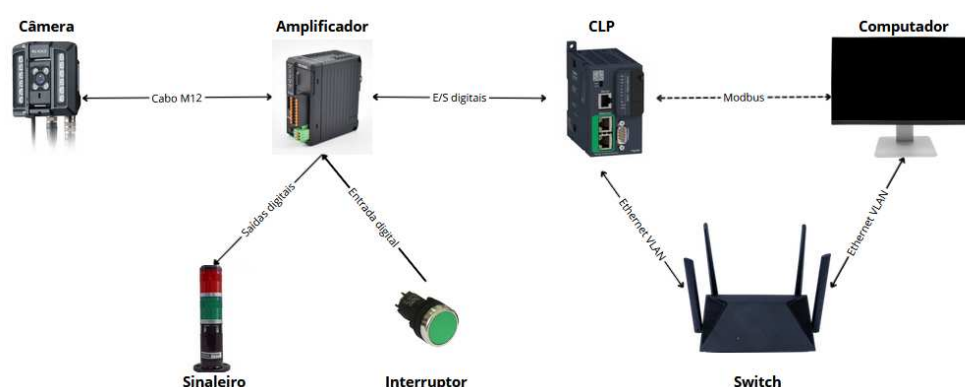
comprometer sua fixação. Dessa forma, mesmo com a limitação de altura, foi possível obter um campo de visão adequado para captar toda a região de interesse da peça de maior dimensional.

Para a fixação da câmera, utilizou-se um suporte articulado da própria *Keyence*. Este suporte foi instalado em uma estrutura de metal que, por sua vez, está fixada na lateral da bancada de montagem, em uma posição que minimiza a interferência com o fluxo de trabalho do operador.

3.2.3 Arquitetura do Sistema

Esta seção apresenta a arquitetura implementada para o sistema de inspeção, detalhando a interligação entre os componentes de hardware, os fluxos de dados e as funções de controle envolvidas na verificação de vedação dos religadores. A Figura 15 ilustra o diagrama funcional dos principais elementos do sistema.

Figura 15 – Diagrama dos componentes do sistema de detecção de vedação.



Fonte: A autora.

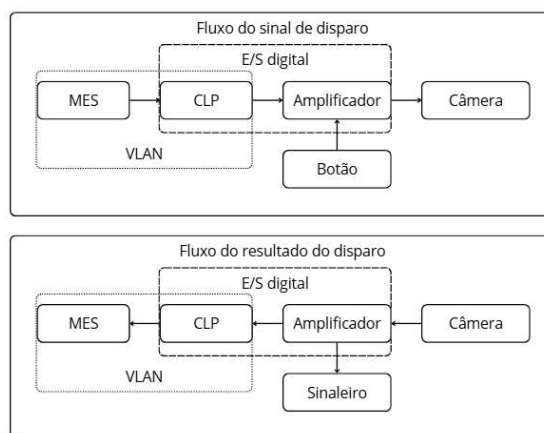
A câmera inteligente é responsável pela aquisição da imagem da peça e pelo processamento embarcado para identificação da presença ou ausência da vedação no tanque do religador. O disparo da captura pode ser acionado tanto por um botão físico instalado na bancada quanto por um comando enviado pelo sistema da fábrica. Em ambos os casos, o sinal é transmitido ao amplificador da câmera por meio de uma entrada digital dedicada (*trigger in*).

O resultado da inspeção (OK ou NOK) é enviado pelo amplificador à entrada digital do CLP, que atua como o nó central de controle da estação. O CLP interpreta

esse sinal e registra o status da peça correspondente, integrando essas informações ao sistema de intertravamento da linha. Caso a vedação não seja detectada, a ordem de produção não pode ser finalizada no posto atual, o que impede que ela avance para o próximo estágio. Essa abordagem evita falhas em campo, assegurando a conformidade do produto sem a necessidade de bloqueios físicos.

Adicionalmente, o CLP se comunica com o sistema de gerenciamento de produção (MES) via protocolo Modbus TCP, por meio de rede Ethernet industrial. Ambos os dispositivos estão configurados dentro da mesma VLAN da linha de produção, assegurando segmentação lógica e proteção cibernética adequada. Essa comunicação permite que o resultado de cada inspeção seja vinculado ao número de série da peça e armazenado no banco de dados do sistema MES, garantindo rastreabilidade completa. O fluxo de comunicação pode ser visto na Figura 16 para simplificação do entendimento.

Figura 16 – Fluxo de dados do sistema implementado.



Fonte: A autora.

Por motivos de segurança cibernética, a câmera permanece isolada da rede industrial, sendo conectada apenas ao amplificador, que por sua vez se comunica com o CLP por meio de sinais digitais. O controlador funciona como intermediário seguro para a transmissão dos dados de inspeção ao ambiente da rede da fábrica.

3.3 PROGRAMAÇÃO DA CÂMERA E CONTROLADOR

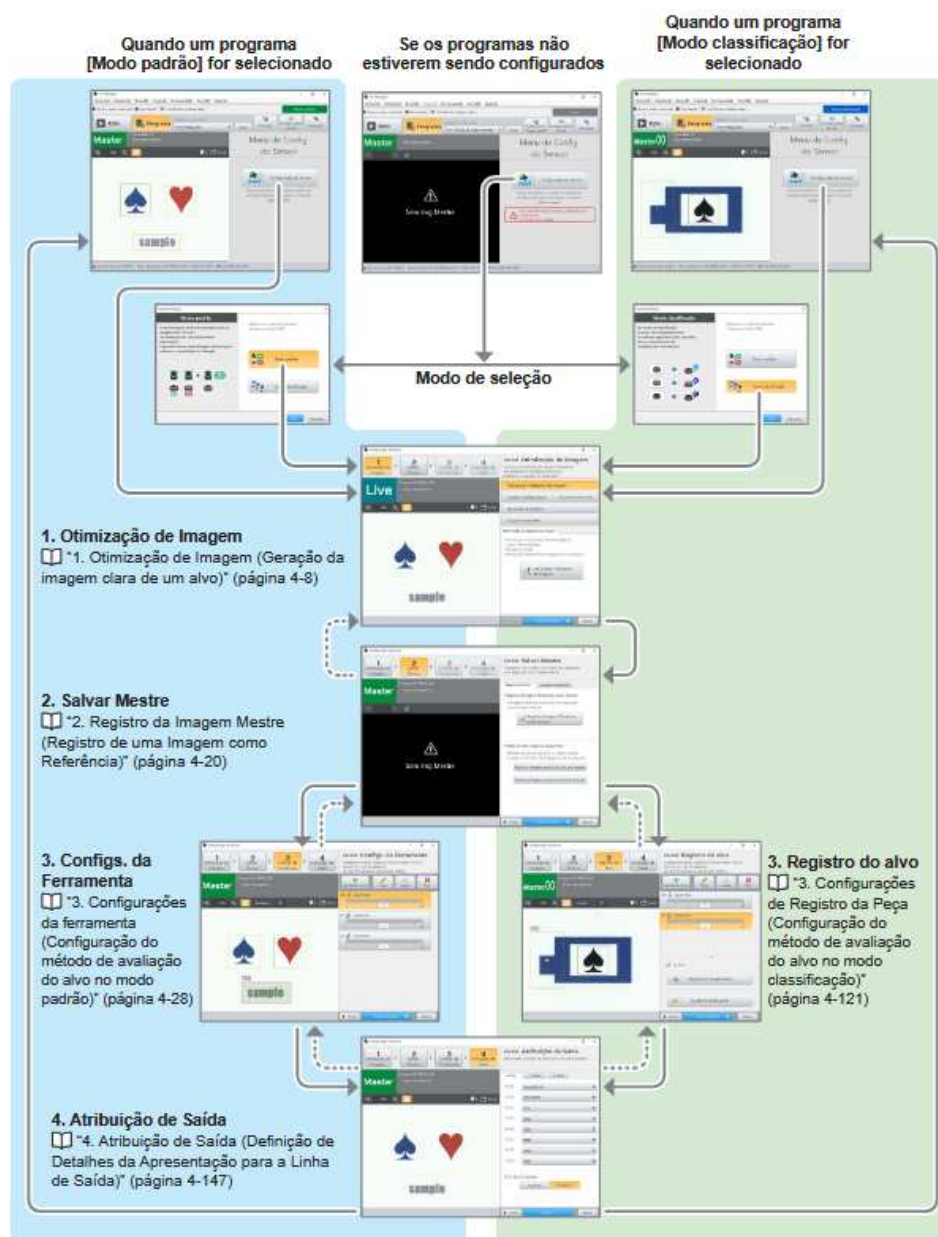
3.3.1 Programação da Câmera

A configuração do algoritmo de inspeção visual são realizadas através do *software* IV3 *Navigator* utilizado neste trabalho, conforme manual H03BR (KEYENCE CORPORATION, 2021b). Ele oferece uma interface gráfica intuitiva, e o fluxo de programação da câmera pode ser observado na Figura 17, e ele permite ao usuário:

- Configurar os parâmetros de aquisição de imagem: ajustes como tempo de exposição, ganho, foco e modo de iluminação da câmera para otimizar a visualização da peça e da borracha.
- Definir a Região de Interesse/*Region of Interest* (ROI): delimitar a área específica na imagem capturada onde a presença da borracha crítica será verificada.
- Selecionar e parametrizar ferramentas de inspeção: é possível escolher e ajustar as ferramentas de análise visual (busca de padrões, detecção de área, contorno, cor) mais adequadas para a solução desejada. O sistema IV3 permite a instalação de até 65 ferramentas em um programa.
- Desenvolver a lógica de decisão: estabelecer os critérios para que o sistema decida pela aprovação ou reprovação da peça, com os resultados fornecidos pelas ferramentas de inspeção.
- Gerenciar imagens mestre: registrar imagens de referência que servirão de base para o algoritmo de comparação e detecção.
- Testar e otimizar o algoritmo: realizar testes com imagens capturadas pela câmera em tempo real, permitindo ajustes finos nos parâmetros e na lógica para maximizar a acurácia da detecção.
- Monitorar e ajustar em tempo real: visualizar os resultados da inspeção, estatísticas de desempenho e realizar ajustes durante a operação.

Com o FOV da câmera configurado para capturar todo o perímetro superior do tanque, procedeu-se para a configuração dos programas propostos. Seguindo os passos mostrados na Figura 18, primeiro são feitos ajustes na iluminação e no

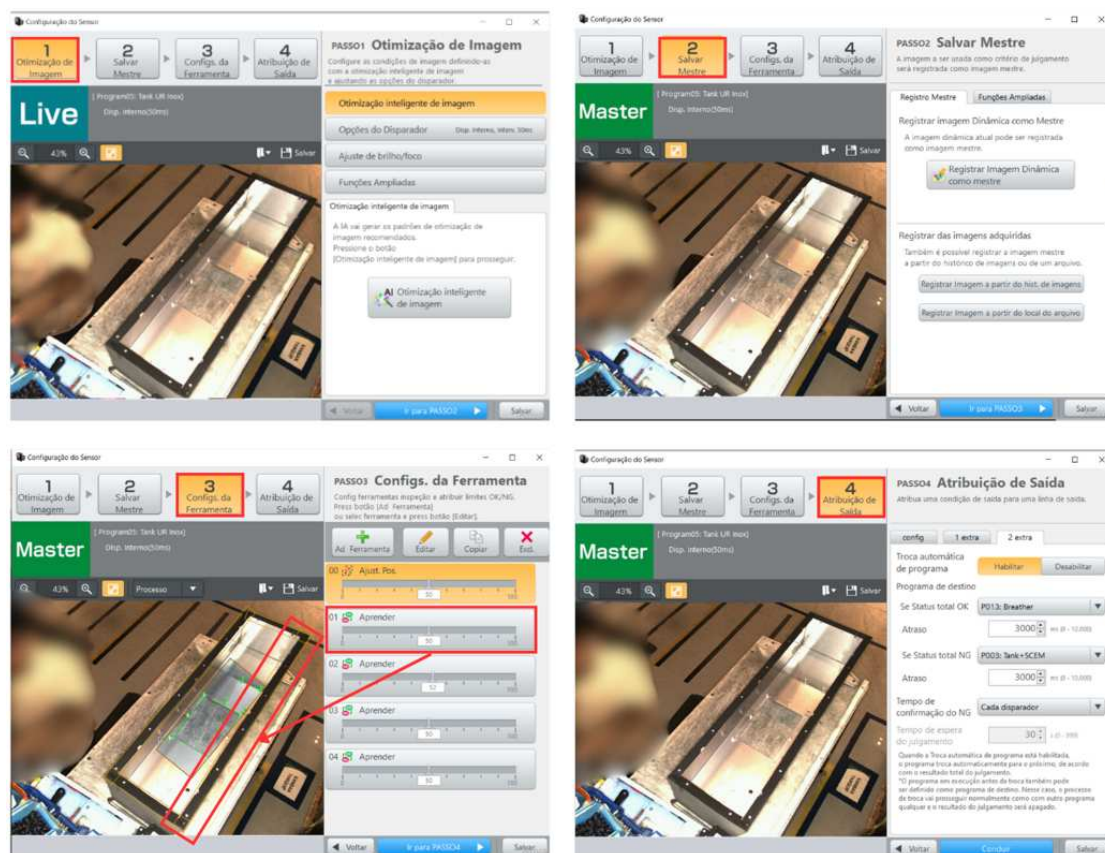
Figura 17 – Fluxo operacional do software IV3 Navigator.



Fonte: (KEYENCE CORPORATION, 2021b).

foco, além de selecionar o disparador interno (automático) para os programas de inspeção e externo (botão) para o programa de seleção.

O segundo passo é salvar a imagem mestre para cada programa, ela será a imagem conforme usada para seleção dos pontos de inspeção. Para cada tipo de

Figura 18 – Passos de programação do *software* IV3 Navigator.

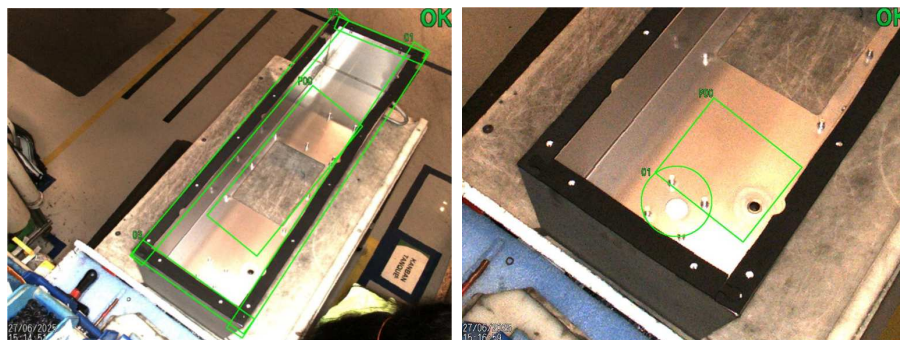
Fonte: A autora.

tanque inspecionado na linha de produção (inox 304, inox 305 e pintado) foram capturadas amostras representativas. Também foram obtidas imagens do respirador montado no tanque e do suporte de fixação da placa de controle. As imagens de referência utilizadas para a seleção de programas no *software* estão ilustradas na Figura 19.

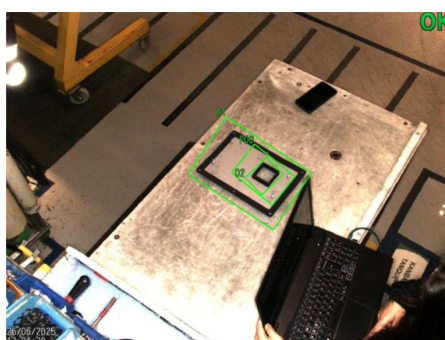
Próximo passo é a configuração das ferramentas de inspeção e seleção das áreas de interesse dessas ferramentas, como mostra a Figura 18. Para os programas individuais de inspeção, foi adotada a funcionalidade de avaliação por aprendizagem oferecida pelo *software* da câmera. Nessa modalidade, o sistema é treinado a partir de imagens previamente classificadas como "OK" e "NOK" pelo programador, permitindo que o algoritmo aprenda padrões de conformidade e não conformidade.

Por último são configuradas as saídas do programa da câmera, para quando

Figura 19 – Imagens mestres salvas para seleção de programa no *software*.



(a) Imagem mestre para o tanque pintado. (b) Imagem mestre para o respirador.



(c) Imagem mestre para a placa.

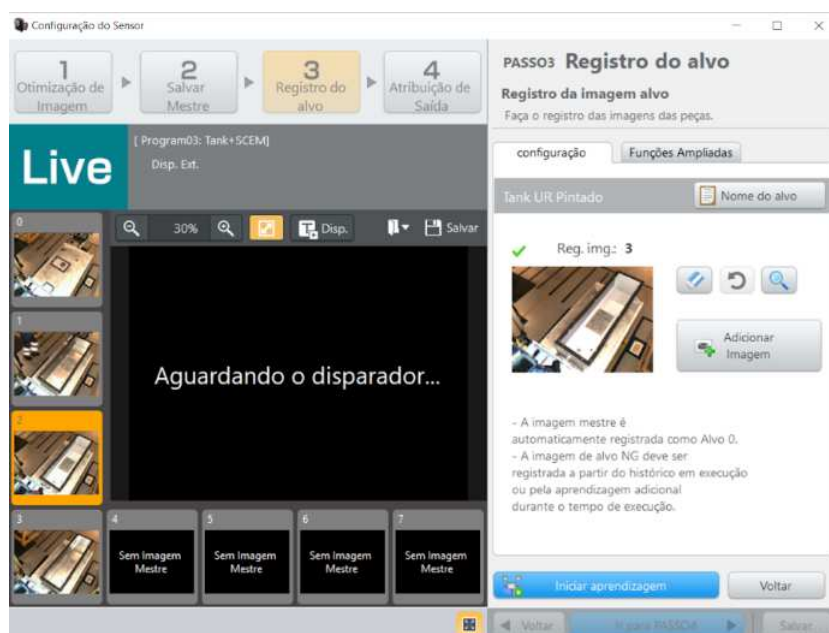
Fonte: A autora.

os casos são conformes e não conformes. Para o exemplo da Figura 18, quando a peça for aprovada, sua saída leva ao programa do respirador para outra inspeção e se reprovada o programa é reiniciado para aguardar novo acionamento.

Adicionalmente foi criado um programa do tipo seleção que será o responsável pela primeira parte da inspeção e irá verificar qual peça está sendo inspecionada. O programa de seleção guarda a imagem mestre de cada peça que deve ser verificada no posto, como mostra a Figura 20.

Portanto a estrutura dos programas foi organizada em dois níveis, que são apresentados no fluxograma da Figura 21. O primeiro disparo ativa o programa de seleção, que identifica o tipo de item com base na imagem mestre capturada. De acordo com essa análise, o sistema aciona automaticamente o programa correspondente: tanque ou suporte de fixação.

Figura 20 – Configuração do programa de seleção.



Fonte: A autora.

Se o item for classificado como um tanque e for aprovado na inspeção, o sistema prossegue para uma segunda etapa: a verificação da presença e conformidade do respirador. Caso ocorra reprovação em qualquer uma das etapas, o sistema retorna automaticamente ao programa de seleção de item, reiniciando o ciclo de verificação.

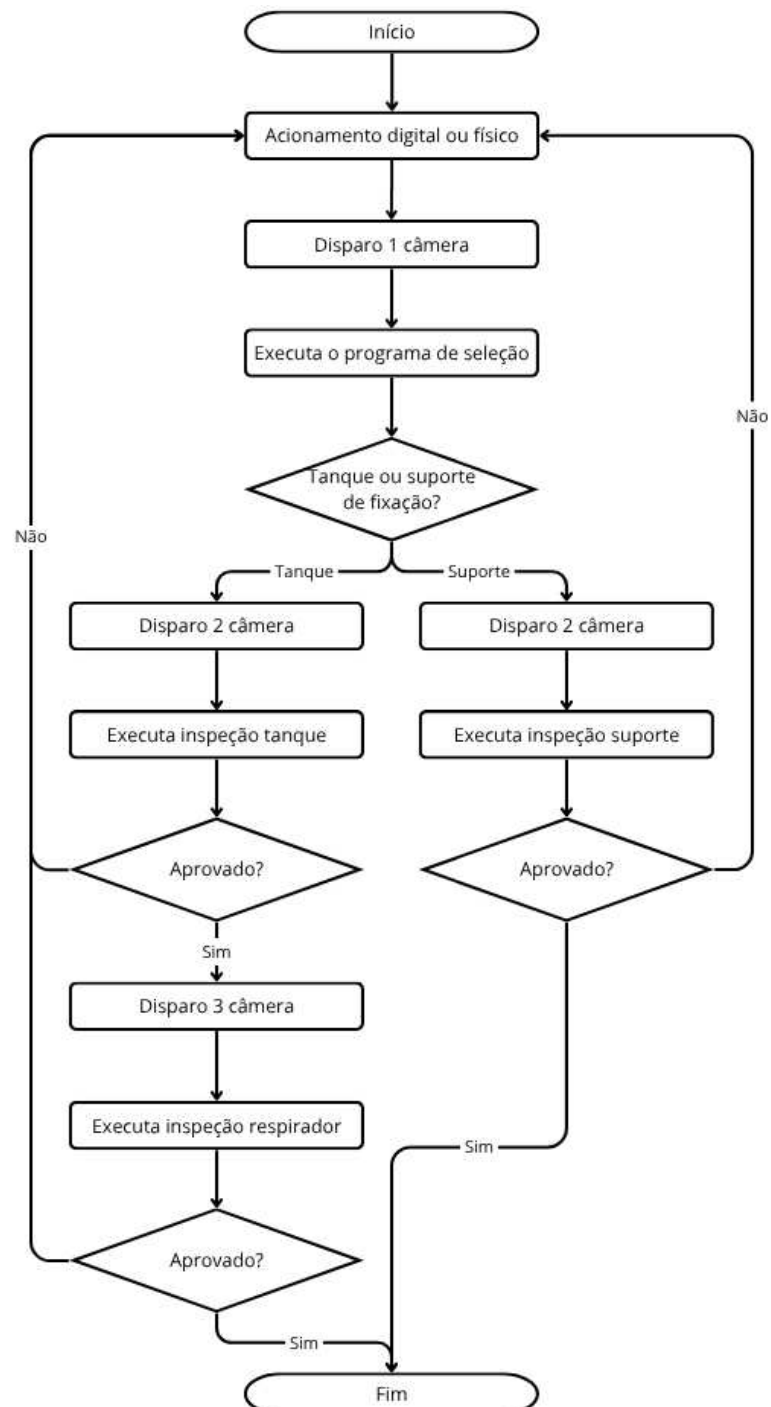
3.3.2 Programação do Controlador

A lógica de controle do sistema de inspeção foi estruturada utilizando o modelo de FSM (*Finite State Machine*), uma abordagem amplamente aplicada em sistemas sequenciais. Neste contexto, o controlador alterna entre diferentes estados definidos de operação, guiado por eventos externos (como sinais da câmera e do MES) e internos (como temporizadores).

A Tabela 3 descreve os registradores utilizados para a troca de informações entre o CLP e a IHM, através dos módulos de entradas e saídas digitais.

Da mesma forma a Tabela 4 descreve os registradores e bits utilizados para transferir os dados entre o CLP e o sistema de VC.

Figura 21 – Fluxograma para detecção dos componentes de vedação.



Fonte: A autora.

Tabela 3 – Mapeamento de variáveis de comunicação Modbus (CLP – Computador)

Endereço bus	Mod-	Variável	Descrição da função
Dados enviados pelo computador ao CLP			
%MX100.0		PC_START_INSPECAO	Bit de comando (gatilho) para iniciar o ciclo de inspeção.
%MW101		PC_TIPO_ITEM	Registrador que define o tipo de peça a ser inspecionada (0 = A, 1 = B).
Dados enviados pelo CLP ao computador			
%MX110.0		CLP_CICLO_ATIVO	Bit de status que informa que o CLP está executando o ciclo.
%MX111.0		CLP_RESULT_OK	Bit de status indicando que a peça foi aprovada na inspeção.
%MX112.0		CLP_RESULT_NOK	Bit de status indicando que a peça foi reprovada.
%MW113		CLP_CODIGO_RESULT	Registrador com um código numérico para diagnóstico detalhado do resultado (ex: 10 = OK, 20 = Falha Borracha).

Fonte: A autora.

A variável *iStep* atua como registrador de estado, determinando em qual etapa do ciclo de inspeção o sistema se encontra. E a Figura 22 ilustra a lógica da FSM implementada.

A seguir, são descritos os principais estados da FSM:

- Estado 0 – ocioso: o sistema encontra-se em repouso, aguardando o comando de início enviado pelo computador (PC_START_INSPECAO $\bar{\text{TRUE}}$). Nenhuma saída está ativa nesse momento.
- Estado 10 – selecionar Programa: com base na variável PC_TIPO_ITEM, o CLP seleciona o programa de inspeção adequado, configurando a saída SELECT_ITEM_B para a câmera.
- Estado 20 – iniciar pulso de *trigger*: o sinal de disparo é ativado (TRIG_CAMERA $\bar{\text{TRUE}}$), iniciando a aquisição de imagem pela câmera.
- Estado 30 – finalizar pulso e iniciar *timeout*: o temporizador (tonPulse) garante que o pulso de *trigger* seja mantido por um tempo mínimo. Após sua expiração, o *trigger* é desativado e inicia-se o tonTimeout para

Tabela 4 – Mapeamento de entradas e saídas digitais (CLP – câmera)

Endereço físico	Variável	Descrição da função
Saídas do CLP (sinais de controle para a câmera)		
%QX0.0	TRIG_CAMERA	Gera um pulso de 24V para disparar a captura de imagem da câmera.
%QX0.1	SELECT_ITEM_B	Sinal de seleção de programa: 0V (FALSE) para Item A, 24V (TRUE) para Item B.
Entradas do CLP (sinais de status da câmera)		
%IX0.0	CAM_RESULTADO_OK	Sinaliza que a inspeção foi concluída com sucesso (peça aprovada).
%IX0.1	CAM_OCUPADA	Informa que a câmera está em processo de análise da imagem.
%IX0.2	CAM_FALHA_IDENTIFICACAO	Indica que a peça inspecionada não corresponde ao tipo esperado.
%IX0.3	CAM_FALHA_BORRACHA	Indica que a peça foi identificada, mas houve falha na verificação da presença da borracha.

Fonte: A autora.

aguardar o retorno da inspeção.

- Estado 40 – aguardar resposta: CLP monitora as entradas digitais conectadas ao amplificador da câmera. Caso a resposta seja recebida antes do *timeout*, transita-se para o estado 50. Caso contrário, vai para o estado 99 (erro de *timeout*).
- Estado 50 – processar resultado: CLP interpreta qual entrada foi ativada e atualiza as variáveis de resultado: CLP_RESULT_OK, CLP_RESULT_NOK e CLP_CODIGO_RESULT.
- Estado 60 – fim do ciclo: o resultado permanece disponível até que o computador desative o sinal de início (PC_START_INSPECAO = FALSE). Em seguida, o CLP encerra o ciclo, reseta as variáveis e retorna ao estado inicial.
- Estado 99 – erro de Timeout: se a câmera não retornar o resultado em tempo hábil, o CLP assume falha e define o código de erro como 98, sinalizando CLP_RESULT_NOK.

Essa arquitetura de estados garante previsibilidade e robustez ao processo, permitindo que o controlador trate de forma clara eventos como falhas de comunicação, tempo excedido ou resultados inválidos. Além disso, a separação por etapas facilita o diagnóstico de falhas e a manutenção do sistema, contribuindo para a rastreabilidade e a confiabilidade da aplicação.

3.4 TESTES FUNCIONAIS E VALIDAÇÃO

3.4.1 Teste de Matriz de Confusão

Para avaliar o desempenho do sistema de VC, foi aplicada uma abordagem baseada em classificação binária, utilizando uma matriz de confusão. Essa matriz permite visualizar e quantificar o desempenho do sistema ao classificar peças como conformes (OK) ou não conformes (NOK), comparando os resultados obtidos com as condições previamente conhecidas das peças testadas.

Foram utilizados dois conjuntos de dados: um com 21 tanques com respirador montado e outro com 18 superfícies de fixação da placa de controle. Todos os itens foram previamente classificados manualmente, com base em três categorias: peças com defeitos evidentes, peças com defeitos sutis (limítrofes) e peças sem defeitos. Cada peça foi inspecionada uma única vez pelo sistema, e os resultados foram comparados com a classificação esperada.

Neste trabalho, considera-se como classe positiva a ausência da borracha, pois o sistema de visão computacional foi desenvolvido com o propósito de detectar essa falha e impedir a continuidade da montagem de peças defeituosas. Assim, um verdadeiro positivo corresponde a um caso em que a falha está realmente presente e foi corretamente identificada pelo sistema.

A partir dos dados obtidos, foram construídas as matrizes de confusão correspondentes e calculadas as seguintes métricas de desempenho:

- **Acurácia:** percentual de classificações corretas (acertos de presença e ausência) em relação ao total de inspeções.
- **Precisão:** entre todas as vezes que o sistema sinalizou uma falha, quantas eram realmente falhas.

- **Sensibilidade (*Recall*)**: entre todas as peças que realmente estavam com falha, quantas o sistema conseguiu detectar corretamente.
- **Especificidade**: proporção de peças boas corretamente classificadas.
- **F1-score**: média harmônica entre precisão e sensibilidade.

3.4.2 Teste de Repetibilidade

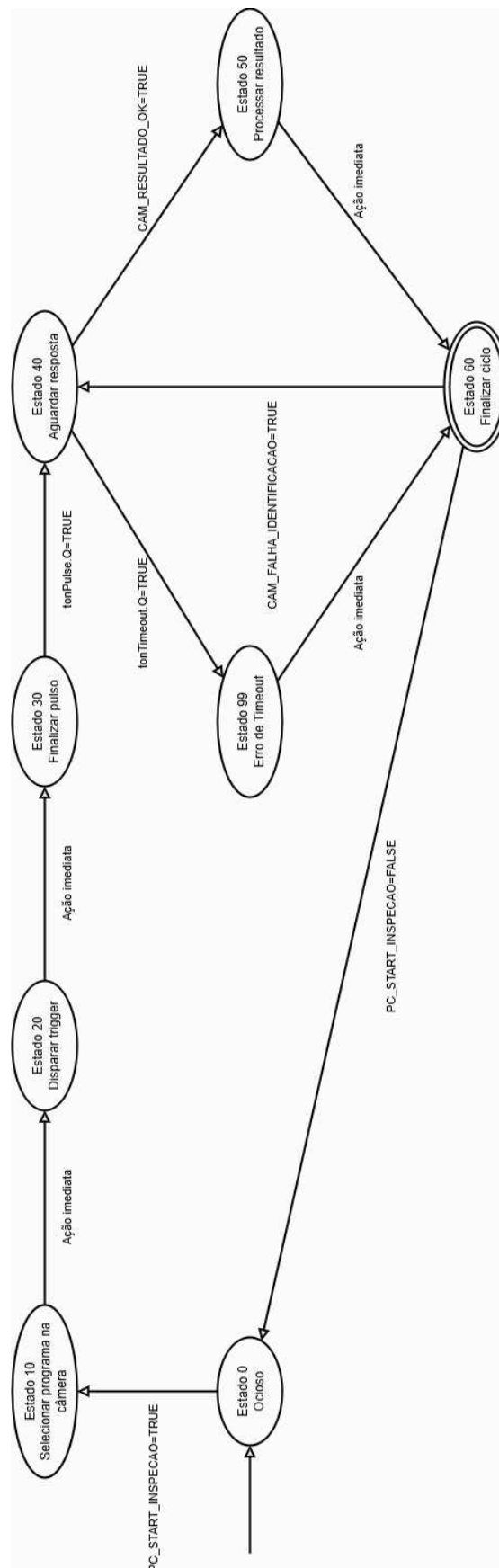
Para complementar os testes de validação e avaliar a consistência e a estabilidade dos resultados fornecidos pelo sistema, foi realizada uma análise de repetibilidade com foco na Porcentagem de Correspondência(%) entre a imagem da peça testada e a imagem de referência (mestre) utilizada durante o treinamento do sistema. Essa métrica permite entender o quão consistente é o sistema ao repetir o reconhecimento de peças do mesmo tipo sob as mesmas condições. Gráficos de dispersão foram utilizados para avaliar essa variabilidade, contemplando os três componentes inspecionados: tanque, superfície de fixação e respirador.

A interpretação dos gráficos valores próximos de 100% indicam alta similaridade com a peça conforme, e valores próximos de 0% representam uma grande diferença em relação ao modelo de referência. O limiar de aceitação adotado para o teste foi de 50%.

Para isso, foram selecionadas três amostras distintas para cada um dos elementos avaliados, tanque, respirador e superfície de fixação da placa de controle, totalizando 9 amostras. Em cada grupo, foi utilizada uma peça sem falhas aparentes (classificada como conforme), uma peça com falha evidente (como a ausência total da borracha ou da espuma) e uma peça com defeito limítrofe, ou seja, com imperfeições sutis.

Cada amostra foi submetida a 50 execuções consecutivas do sistema, mantendo todas as variáveis constantes, como iluminação, foco e posicionamento, a fim de validar a estabilidade do algoritmo em condições controladas. A comparação dos resultados foi feita com base na imagem mestre salva previamente durante a configuração do sistema, representando o padrão esperado da peça conforme. Os dados obtidos foram analisados por meio de estatísticas descritivas e gráficos de dispersão, permitindo uma avaliação quantitativa da precisão e da repetibilidade da classificação realizada pela câmera.

Figura 22 – Diagrama da Máquina de Estados do CLP para controle de inspeção.



Fonte: A autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a implementação e validação do sistema de inspeção automatizada baseado em visão computacional. Inicialmente, descreve-se o resultado físico do sistema no ambiente fabril. Em seguida, são discutidos os resultados obtidos a partir dos testes de matriz de confusão, que permitiram avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições de operação.

4.0.1 Configuração do Sistema

O sistema de inspeção, mostrado na Figura 23, é composto por uma câmera de visão artificial Keyence IV3 e um CLP Schneider TM251, que atua como intermediário entre a câmera e o sistema de produção. A câmera foi posicionada em um suporte fixo sobre uma mesa, com altura máxima definida pelas limitações físicas do ambiente e angulação ajustada para capturar toda a peça em uma única imagem. A iluminação, o ângulo e o posicionamento da peça foram mantidos constantes ao longo de todos os testes. O sistema pode ser acionado por botão físico ou por comando digital via computador, e o tempo médio de processamento para cada inspeção é de aproximadamente 280 ms.

O resultado do quadro elétrico dedicado pode ser visto na Figura 24, este localiza-se próximo ao posto de inspeção e contempla:

- CLP: instalado na parte inferior esquerda do painel.
- Amplificador da câmera: localizado à direita do CLP.
- Fonte de alimentação 24V: fixada na parte superior central, trata-se de uma fonte chaveada com carcaça metálica ventilada.
- Disjuntor DIN: posicionado acima da fonte, responsável pela proteção do circuito principal.
- Bloco de terminais: no canto superior esquerdo, organiza a distribuição de condutores de fase, neutro e terra.

Figura 23 – Posto de montagem e inspeção automatizada.



Fonte: A autora.

4.1 RESULTADOS DA MATRIZ DE CONFUSÃO

A partir das amostras inspecionadas, foram construídas duas matrizes de confusão comparando os resultados obtidos pelo sistema com os resultados reais observados. Essas matrizes possibilitaram a identificação da quantidade de verdadeiros positivos (VP), falsos positivos (FP), verdadeiros negativos (VN) e falsos negativos (FN), servindo de base para o cálculo de cinco métricas fundamentais de avaliação.

O conjunto de amostragem utilizado para testes com os tanques e o respirador está descrito na Tabela 5.

Figura 24 – Painel de controle do sistema de visão computacional.



Fonte: A autora.

Tabela 5 – Tabela de amostras de tanque com respirador

Nº	Tipo da Peça	Defeito Simulado	Resultado Esperado	Resultado da Câmera
1	Boa	Nenhum	OK	OK
2	Boa	Nenhum	OK	OK
3	Boa	Nenhum	OK	OK
4	Boa	Nenhum	OK	OK
5	Boa	Nenhum	OK	OK
6	Boa	Nenhum	OK	OK
7	Boa	Nenhum	OK	OK
8	Boa	Nenhum	OK	OK
9	Boa	Nenhum	OK	OK
10	Boa	Nenhum	OK	OK

Tabela 5 – continuação da página anterior

Nº	Tipo da Peça	Defeito Simulado	Resultado Esperado	Resultado da Câmera
11	Ruim	Sem borrachas	NOK	NOK
12	Ruim	Borracha 1 ausente	NOK	NOK
13	Ruim	Borracha 2 ausente	NOK	NOK
14	Ruim	Borracha 3 ausente	NOK	NOK
15	Ruim	Borracha 4 ausente	NOK	NOK
16	Limítrofe	Sem respirador	NOK	NOK
17	Limítrofe	Borracha 1 com defeito	NOK	OK
18	Limítrofe	Borracha 2 com defeito	NOK	OK
19	Limítrofe	Borracha 3 com defeito	NOK	OK
20	Limítrofe	Borracha 4 com defeito	NOK	NOK
21	Limítrofe	Sem a espuma no respirador	NOK	NOK

E na Tabela 6 é apresentada a matriz de confusão correspondente ao conjunto de amostragem do tanque com respirador.

Tabela 6 – Matriz de Confusão do Programa do Tanque

		Real	
		NOK	OK
Esperado	NOK	VP = 8	FP = 0
	OK	FN = 3	VN = 10

Com base nos dados obtidos, a acurácia do sistema na validação do tanque foi de aproximadamente 85,7%, indicando que o sistema acertou a classificação na maior parte dos casos. A precisão foi de 100%, o que revela que todas as peças classificadas como defeituosas realmente apresentavam algum problema. A sensibilidade alcançou 72,7%, indicando que pouco mais de 70% das peças defeituosas foram corretamente reprovadas. Já a especificidade foi de 100%, demonstrando que todas as peças boas foram corretamente aprovadas, sem gerar falsos positivos. Por fim, o F1-score foi de aproximadamente 84,1%, refletindo um bom equilíbrio entre precisão e sensibilidade, mesmo diante dos desafios impostos pelas peças limítrofes.

De forma similar, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na validação do sistema de inspeção da placa de controle, enquanto a Tabela 8 mostra sua respectiva matriz de confusão.

Tabela 7 – Tabela de amostras de placas de unidade de controle

Nº	Tipo da Peça	Defeito Simulado	Resultado Esperado	Resultado da Câmera
1	Boa	Nenhum	OK	OK
2	Boa	Nenhum	OK	OK
3	Boa	Nenhum	OK	OK
4	Boa	Nenhum	OK	OK
5	Boa	Nenhum	OK	OK
6	Boa	Nenhum	OK	OK
7	Boa	Nenhum	OK	OK
8	Boa	Nenhum	OK	OK
9	Boa	Nenhum	OK	OK
10	Boa	Nenhum	OK	OK
11	Ruim	Borracha interna ausente	NOK	NOK
12	Ruim	Borracha externa ausente	NOK	NOK
13	Ruim	Borracha interna mal posicio- nada	NOK	NOK
14	Ruim	Borracha externa mal posicio- nada	NOK	NOK
15	Limítrofe	Borracha interna deslocada	NOK	OK
16	Limítrofe	Borracha externa deslocada	NOK	OK
17	Limítrofe	Borracha interna com deforma- ção	NOK	NOK
18	Limítrofe	Borracha externa com deforma- ção	NOK	NOK

Neste caso, a acurácia foi de aproximadamente 88,8%, com uma precisão de 100%. A sensibilidade foi de 75%, o que demonstra que o sistema identificou corretamente três em cada quatro peças defeituosas. A especificidade ficou em

Tabela 8 – Matriz de Confusão do Programa da Placa de Controle

		Real	
		NOK	OK
Esperado	NOK	VP = 6	FP = 0
	OK	FN = 2	VN = 10

100%, indicando que todas as peças boas foram corretamente aprovadas. O F1-score atingiu 85,7%, reforçando o desempenho equilibrado do sistema frente a condições limítrofes de defeito.

Embora os dois sistemas tenham apresentado 100% de precisão e especificidade, as métricas de sensibilidade e, conseqüentemente, de F1-score, não foram tão satisfatórias. Esse comportamento é atribuído principalmente à presença de peças com defeitos limítrofes, nos quais as falhas eram sutis. Tanto no programa de inspeção do tanque com respirador quanto na análise da placa de controle, os falsos negativos ocorreram em situações nas quais os defeitos estavam em regiões menos evidentes, deformados de forma leve ou parcialmente ocultos devido o posicionamento lateralizado da câmera.

Além disso, fatores como a posição da câmera e as condições de iluminação podem ter contribuído para a perda de informação visual em regiões críticas, interferindo na correta identificação por parte do sistema de visão computacional. Esses resultados indicam que, apesar da eficácia representada na precisão encontrada, os sistemas ainda apresentam limitações frente a defeitos marginais, apontando a necessidade de ajustes no posicionamento dos equipamentos, ampliação do conjunto de dados de treinamento do programa de visão e ajuste nos critérios de decisão (limites de aceitação) utilizados pelos algoritmos.

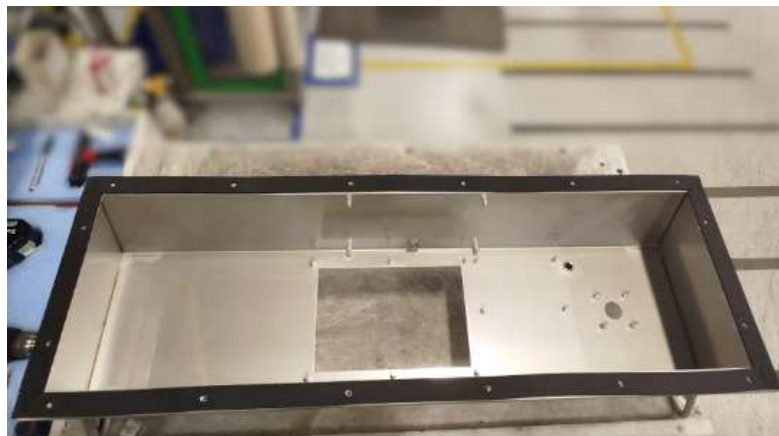
4.2 RESULTADOS DO TESTE DE REPETIBILIDADE

Esta seção apresenta os resultados dos testes de repetibilidade. Foram utilizadas três variações das peças: uma peça com defeito evidente, uma peça conforme e uma peça considerada limítrofe. Cada peça foi submetida a 50 repetições consecutivas para avaliar a consistência das respostas do sistema.

As três variações de cada uma das 3 peças podem ser vistas nas Figuras 25 (tanque), 26 (superfície de fixação) e 27 (respirador):

Figura 25 – Amostras para validação da repetibilidade do tanque.

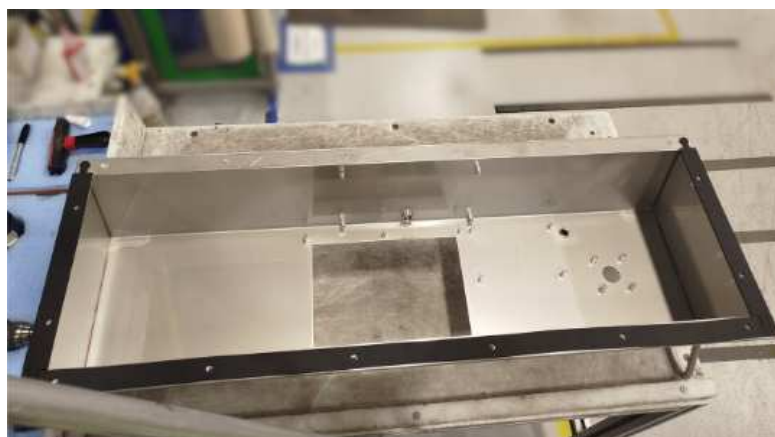
(a) Tanque com todas as borrachas sem defeito.



(b) Tanque com uma borracha defeituosa.



(c) Tanque sem uma das borrachas.



Fonte: A autora.

Figura 26 – Amostras para validação da repetibilidade do respirador.

- (a) Tanque com respirador e espuma. (b) Tanque com respirador e sem espuma.



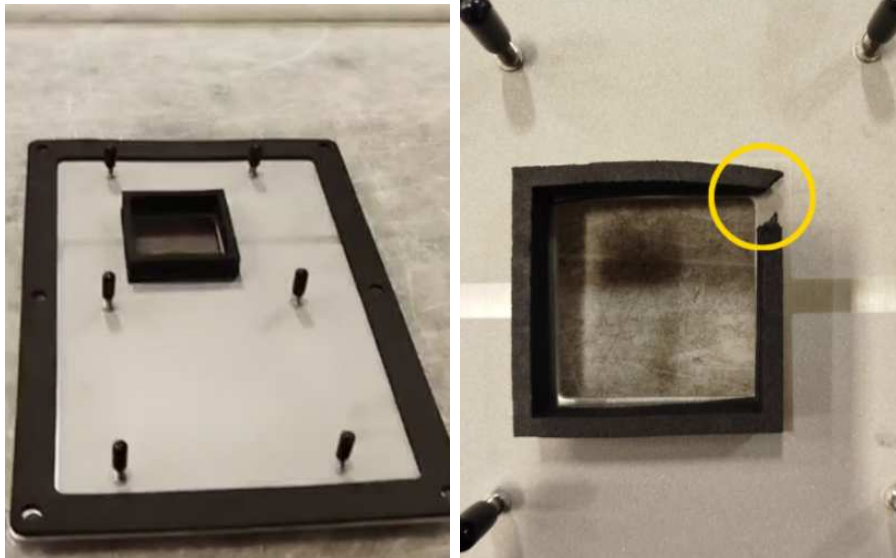
- (c) Tanque sem respirador e sem espuma.



Fonte: A autora.

Figura 27 – Amostras para validação da repetibilidade da placa de fixação de painel de controle.

- (a) Placa de fixação com todas as borrachas sem defeito. (b) Placa de fixação com borracha interna defeituosa.



- (c) Placa de fixação sem a borracha interna.



Fonte: A autora.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos na avaliação das vedações do tanque. A peça considerada limítrofe (Peça A) obteve 70% de acertos, indicando que em 30% das vezes o sistema classificou erroneamente como conforme um defeito sutil. Já a peça claramente não conforme (Peça B) obteve 100% de acerto, e a peça conforme (Peça C), 98%.

O desempenho reduzido na classificação da Peça A (70%), pode ser atribuído ao mesmo fator observado na teste anterior com menor desempenho. Nessas situações, a deformação da borracha foi discreta, tornando as diferenças visuais entre a peça conforme e a defeituosa pouco perceptíveis para o algoritmo de classificação. Além disso, os fatores como o posicionamento da câmera e a variação na iluminação novamente se enquadram na perda de informação nas imagens obtidas. Esses 30% de classificações incorretas ressaltam a baixa sensibilidade encontrada anteriormente.

Tabela 9 – Resultados da validação do tanque com diferentes tipos de peça

Tipo de peça	Resultado espe-	Resultado encon-	Taxa de acerto
	rado	trado	(%)
Peça A (limítrofe)	50 peças NOK	35 peças NOK	70,00
Peça B (não conforme)	50 peças NOK	50 peças NOK	100,00
Peça C (conforme)	50 peças OK	49 peças OK	98,00

Fonte: A autora.

Esses resultados demonstram que o sistema possui alto desempenho na identificação de casos claramente conformes ou não conformes. No entanto, o desempenho inferior da Peça A indica sensibilidade reduzida a defeitos limítrofes. Esse comportamento pode estar relacionado a fatores como o posicionamento da iluminação ou à necessidade de mais imagens de treinamento que representem variações marginais.

A Tabela 10 apresenta os resultados da validação do ponto de inspeção da superfície de fixação da placa de controle. As duas peças com defeitos (limítrofe e não conforme) atingiram 100% de acerto, demonstrando excelente capacidade de detecção de falhas nesse ponto. Já a peça considerada conforme obteve 94% de acerto, apresentando duas classificações incorretas como NOK.

Nesse caso, o erro ocorre ao classificar peças boas como defeituosas, indicando uma possível rigidez excessiva nos critérios de detecção definidos na ferra-

Tabela 10 – Resultados da validação da superfície de fixação com diferentes tipos de peça

Tipo de peça	Resultado espe-	Resultado encon-	Taxa de acerto
	rado	trado	(%)
Peça A (limítrofe)	50 peças NOK	50 peças NOK	100,00
Peça B (não conforme)	50 peças NOK	50 peças NOK	100,00
Peça C (conforme)	50 peças OK	47 peças OK	94,00

Fonte: A autora.

menta de aprendizagem. Pode ser necessário ajustar os limites de tolerância ou incluir mais exemplos de peças boas com pequenas variações visuais.

Por fim, a Tabela 11 apresenta os resultados dos testes aplicados ao ponto de inspeção do respirador. Todos os tipos de peça testados apresentaram taxas de acerto superiores a 90%, com destaque para a peça claramente defeituosa, que foi corretamente classificada em 100% das repetições.

Tabela 11 – Resultados da validação do respirador com diferentes tipos de peça

Tipo de peça	Resultado espe-	Resultado encon-	Taxa de acerto
	rado	trado	(%)
Peça A (limítrofe)	50 peças NOK	46 peças NOK	92,00
Peça B (não conforme)	50 peças NOK	50 peças NOK	100,00
Peça C (conforme)	50 peças OK	49 peças OK	98,00

Fonte: A autora.

Os resultados indicam que o sistema apresenta desempenho estável e confiável na detecção de falhas no respirador, mesmo nos casos limítrofes.

De modo geral, os testes demonstraram que o sistema de inspeção automatizada apresenta precisão em condições reais de operação, principalmente em peças com defeitos evidentes. Os pequenos desvios observados em peças limítrofes ou conformes sugerem que ainda há espaço para aprimoramento na qualidade do treinamento das ferramentas de aprendizagem, especialmente no equilíbrio entre sensibilidade e especificidade. Fatores como iluminação, número de amostras utilizadas na aprendizagem e variações visuais sutis devem ser investigados em novos ciclos de validação.

Os resultados do teste também serão apresentados em forma de gráfico de dispersão. Os dados utilizados correspondem aos mesmos componentes da validação das 50 repetições das peças (vide Tabelas 9, 10 e 11). Cada gráfico explora três

condições distintas: peça conforme, peça com defeito limítrofe e peça com defeito evidente.

Primeiro apresentando o tanque. A Figura 28 apresenta os resultados da repetibilidade para o tanque com pequeno defeito (borrachas 1 e 2), a Figura 29 apresenta as borrachas 3 e 4.

A Figura 30 mostra o gráfico do tanque com defeito evidente seguindo a mesma ordem, e a Figura 32, para o tanque conforme.

O sistema demonstrou alto nível de repetibilidade para peças conformes e com defeitos evidentes. Nestes dois extremos, os resultados se mantiveram agrupados com baixa variabilidade, próximos de 100% para as peças OK e próximos de 0% para as peças NOK, validando a confiabilidade do sistema nessas situações.

Por outro lado, ao analisar o tanque com defeito limítrofe, observou-se uma maior dispersão dos dados, indicando instabilidade na tomada de decisão. Essa oscilação representa um risco de reprovação incorreta (falso negativo) ou aprovação indevida (falso positivo), especialmente relevante em um ambiente de produção.

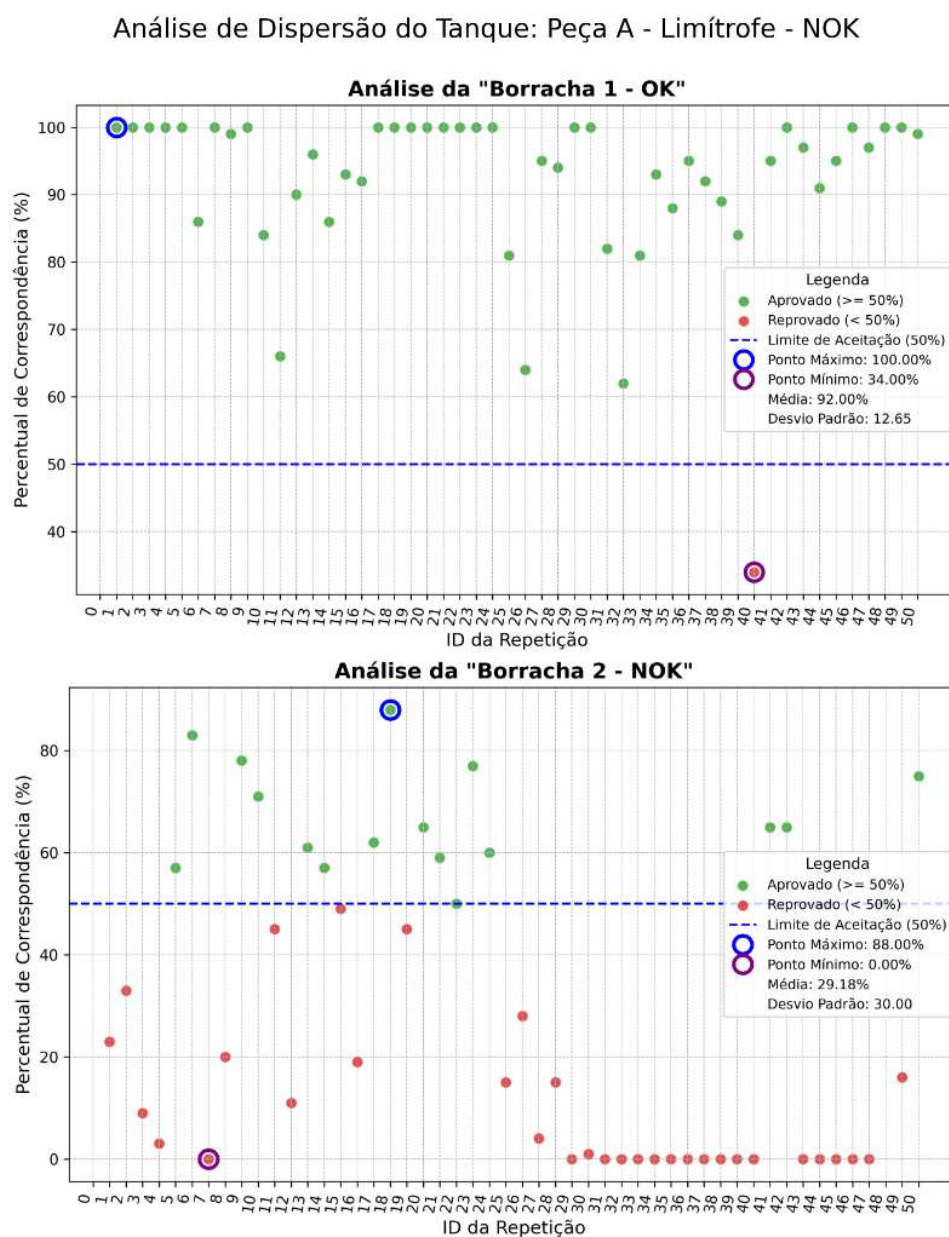
Os resultados da repetibilidade para a placa de fixação são apresentados nas Figuras 34, 35 e 36, correspondendo, respectivamente, aos casos de defeito limítrofe, defeito evidente e peça conforme.

Ao contrário do tanque, a superfície de fixação apresentou maior instabilidade mesmo em defeitos evidentes, com dispersão significativa dos valores. Isso indica uma deficiência do sistema para reprovar corretamente peças com falhas claras, tornando o controle de qualidade menos confiável nesse ponto.

Já para as peças boas, a repetibilidade foi satisfatória, com resultados próximos de 100%, reforçando a consistência do sistema na aprovação de componentes conformes. Entretanto, mesmo neste caso foi registrada uma pequena variabilidade, que merece atenção para evitar falsas rejeições. As Figuras 37a, 37b e 37c trazem os resultados para os três cenários do respirador: ausência da espuma (defeito limítrofe), ausência total do respirador (defeito evidente) e montagem completa (conforme).

Esse foi o componente com maior contraste entre os extremos. Para defeitos evidentes, o sistema foi extremamente eficaz: as leituras se concentraram próximas a 0%, com alta repetibilidade nas 50 repetições. Já para peças boas, os valores ficaram estáveis em torno de 100%, com apenas uma exceção, indicando um falso negativo

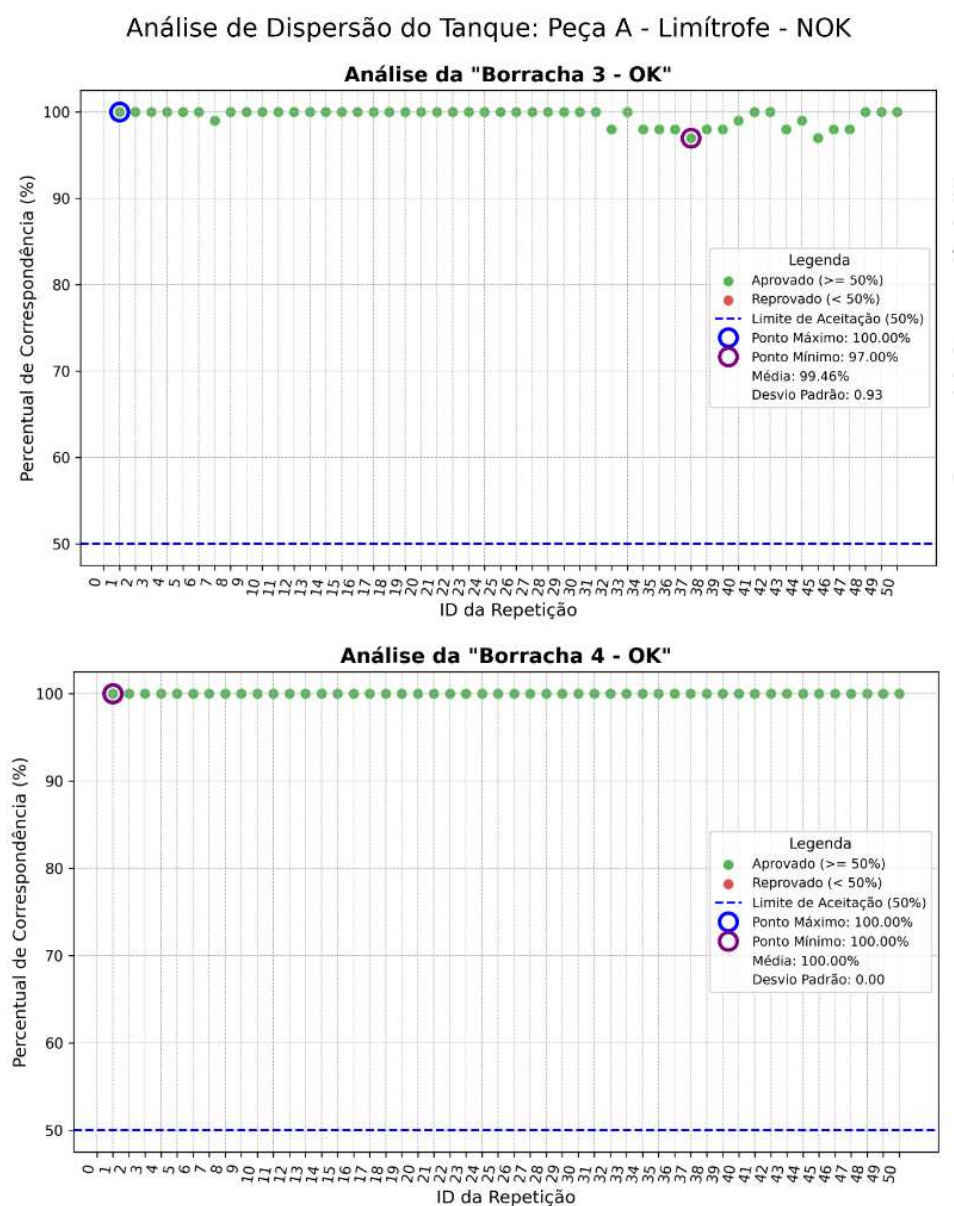
Figura 28 – Gráfico de dispersão do tanque com pequeno defeito (borrachas 1 e 2).



Fonte: A autora.

isolado. Entretanto, no cenário limítrofe (respirador sem espuma), a variabilidade foi significativa. Em algumas execuções, o sistema aprovou a peça; em outras,

Figura 29 – Gráfico de dispersão do tanque com pequeno defeito (borrachas 3 e 4).

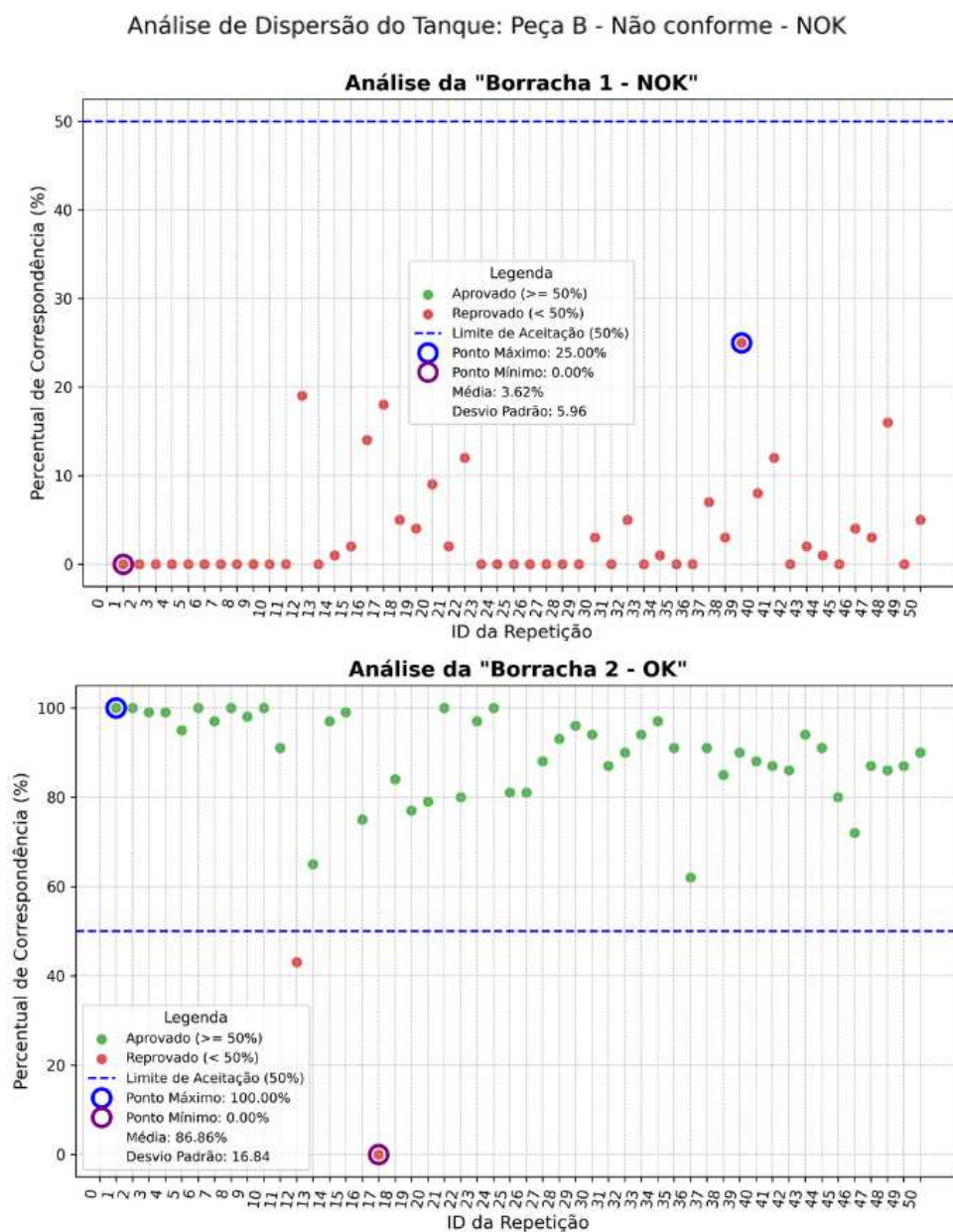


Fonte: A autora.

reprovou, o que evidencia sua dificuldade de lidar com falhas sutis.

Analizando os testes de forma geral, apesar das limitações observadas em alguns casos limítrofes, é importante destacar que o principal objetivo do sistema

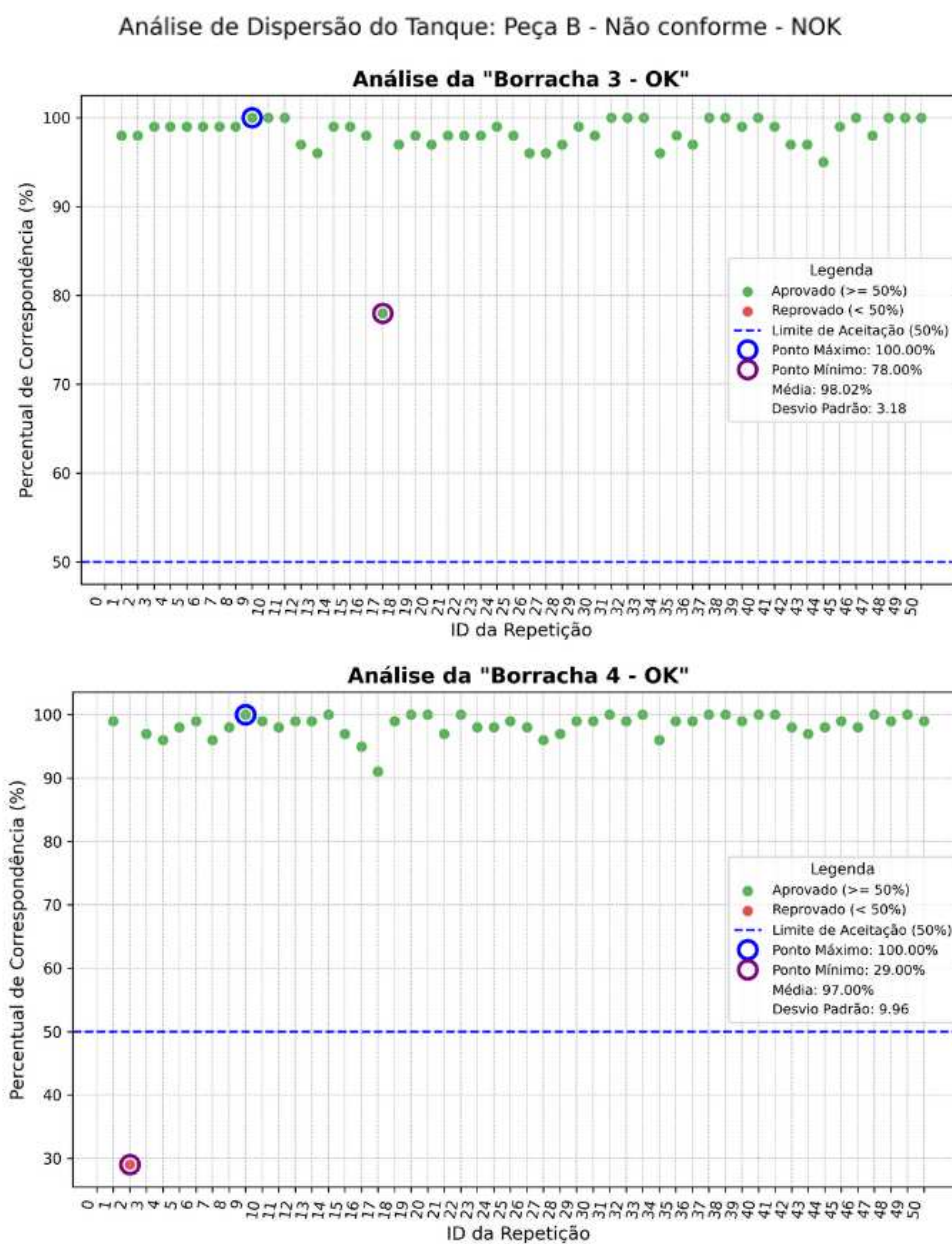
Figura 30 – Gráfico de dispersão do tanque com defeito evidente (borrachas 1 e 2).



Fonte: A autora.

é garantir a detecção de peças que estejam completamente sem a borracha ou respirador, uma falha crítica com impacto direto na funcionalidade do produto. Na prática da montagem, não há histórico de recebimento de borrachas com defeitos

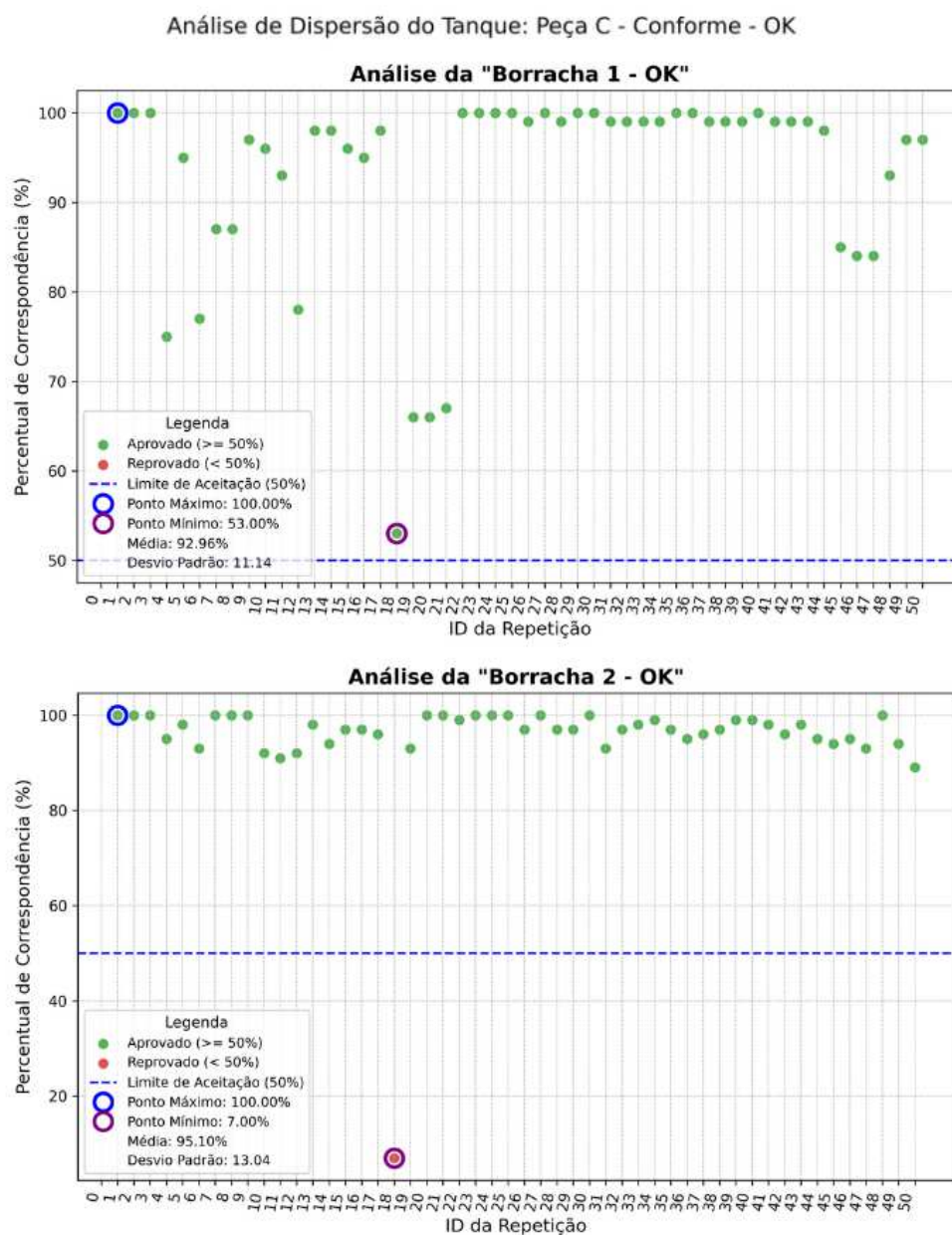
Figura 31 – Gráfico de dispersão do tanque com defeito evidente (borrachas 3 e 4).



Fonte: A autora.

leves de fabricação, e pequenos deslocamentos laterais durante a instalação não comprometem a vedação, pois o projeto da peça prevê uma margem de tolerância para o encaixe. Portanto, mesmo com a sensibilidade abaixo do ideal em alguns

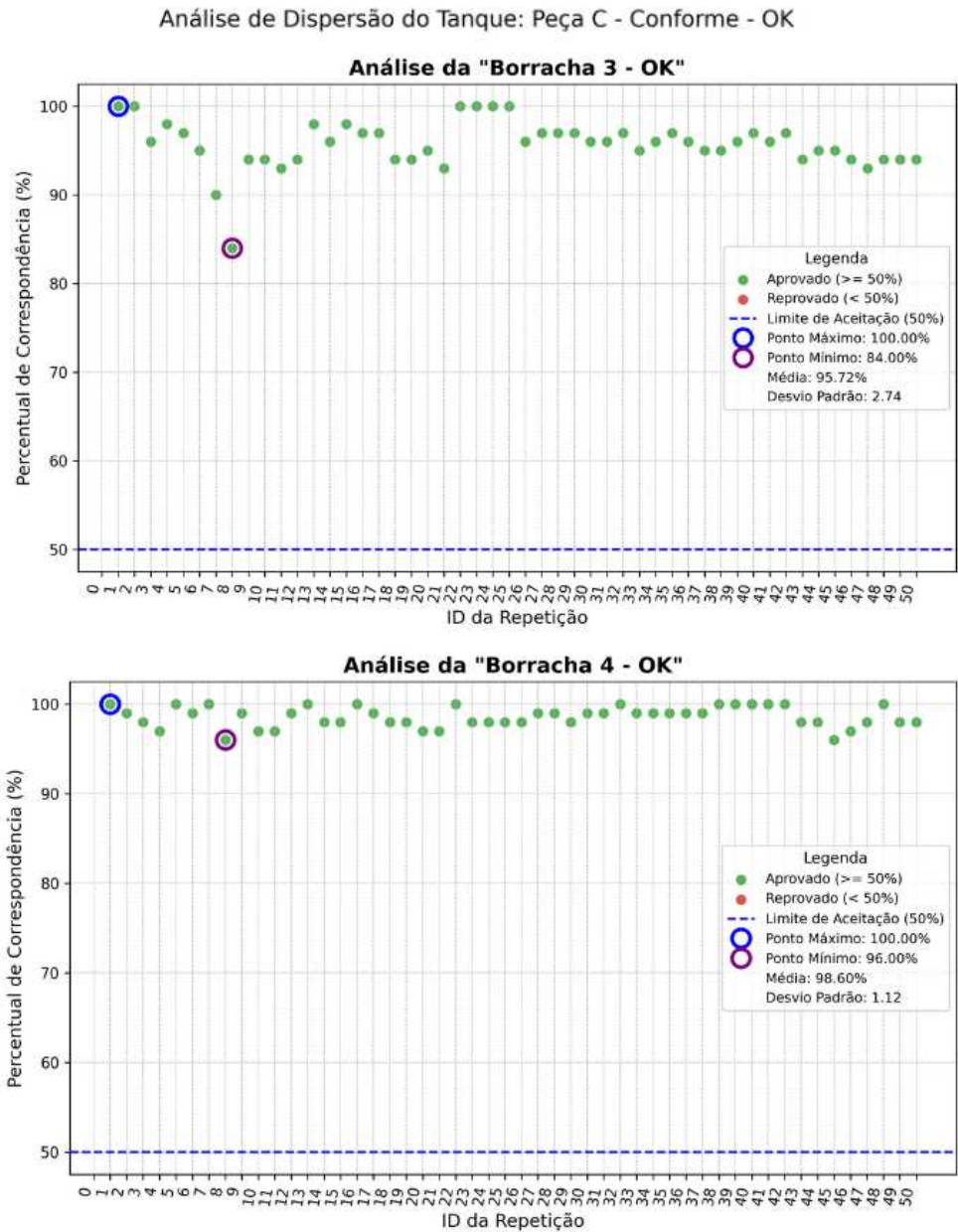
Figura 32 – Gráfico de dispersão do tanque conforme (borrachas 1 e 2).



Fonte: A autora.

testes, o sistema atende ao seu propósito principal ao identificar corretamente as situações que realmente representam um risco de não conformidade no processo produtivo.

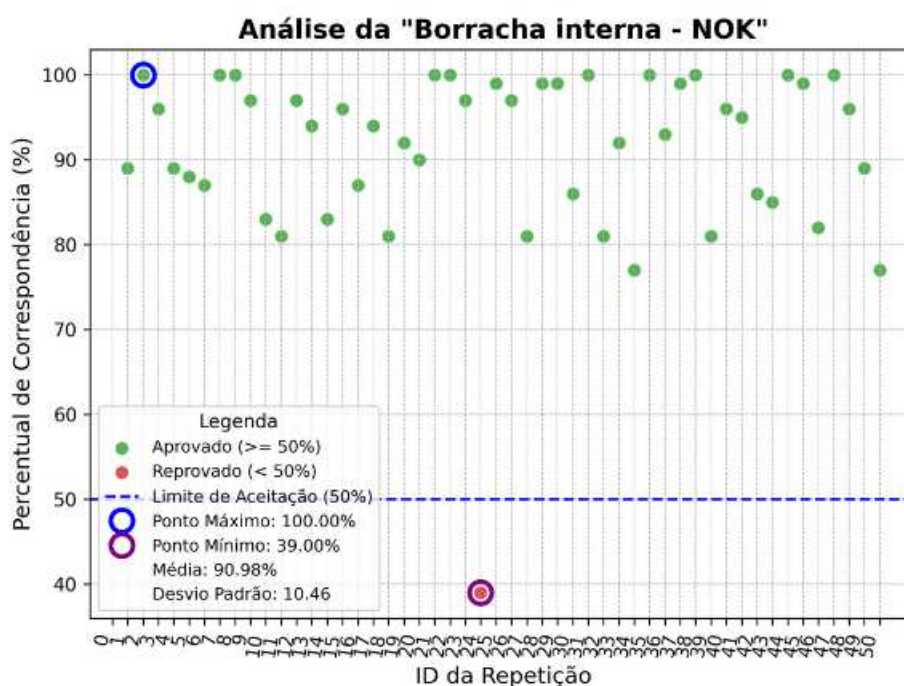
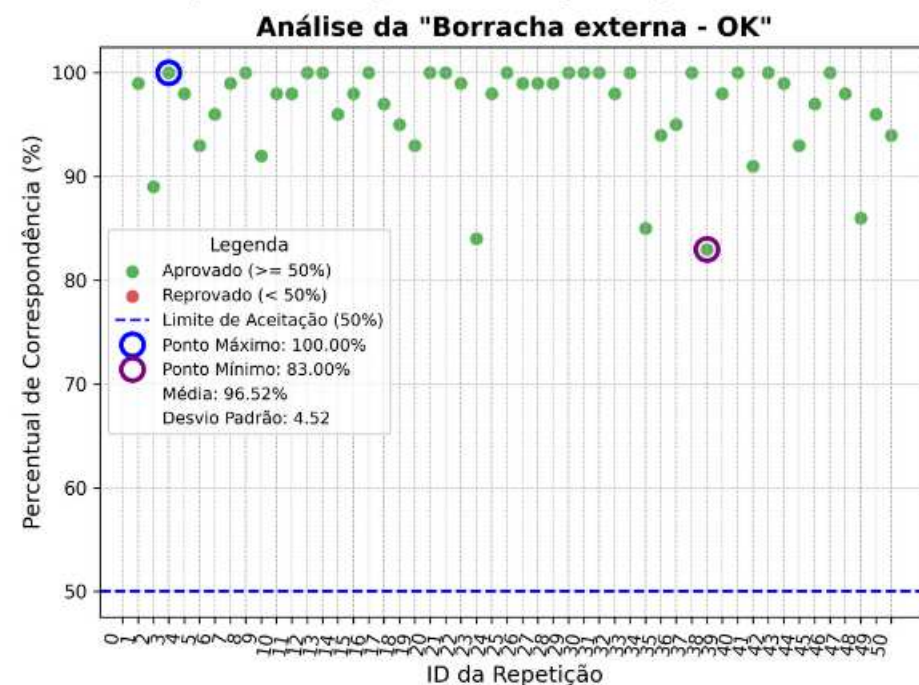
Figura 33 – Gráfico de dispersão do tanque conforme (borrachas 3 e 4).



Fonte: A autora.

Figura 34 – Gráfico de dispersão da placa de fixação com defeito limítrofe.

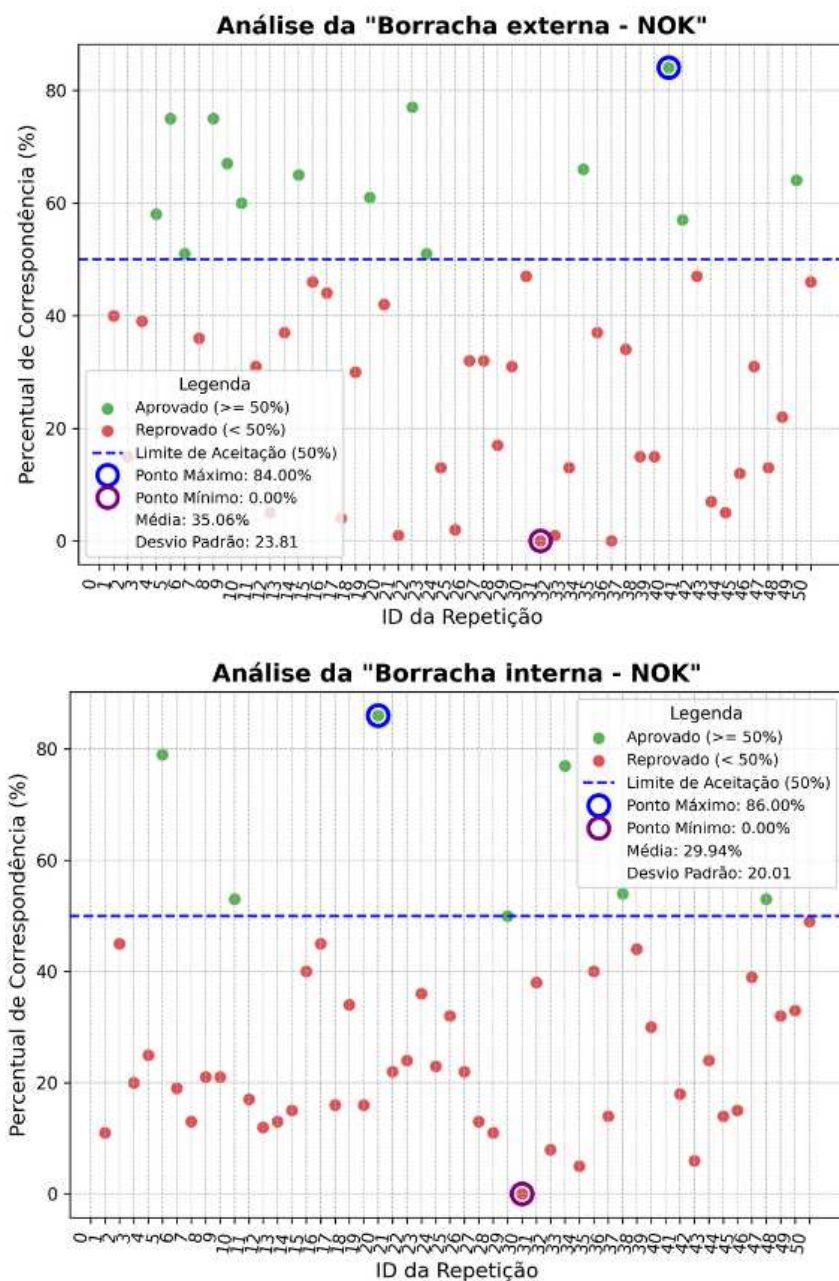
Análise de Dispersão do Suporte de Fixação: Peça C - Conforme - OK



Fonte: A autora.

Figura 35 – Gráfico de dispersão da placa de fixação com defeito evidente.

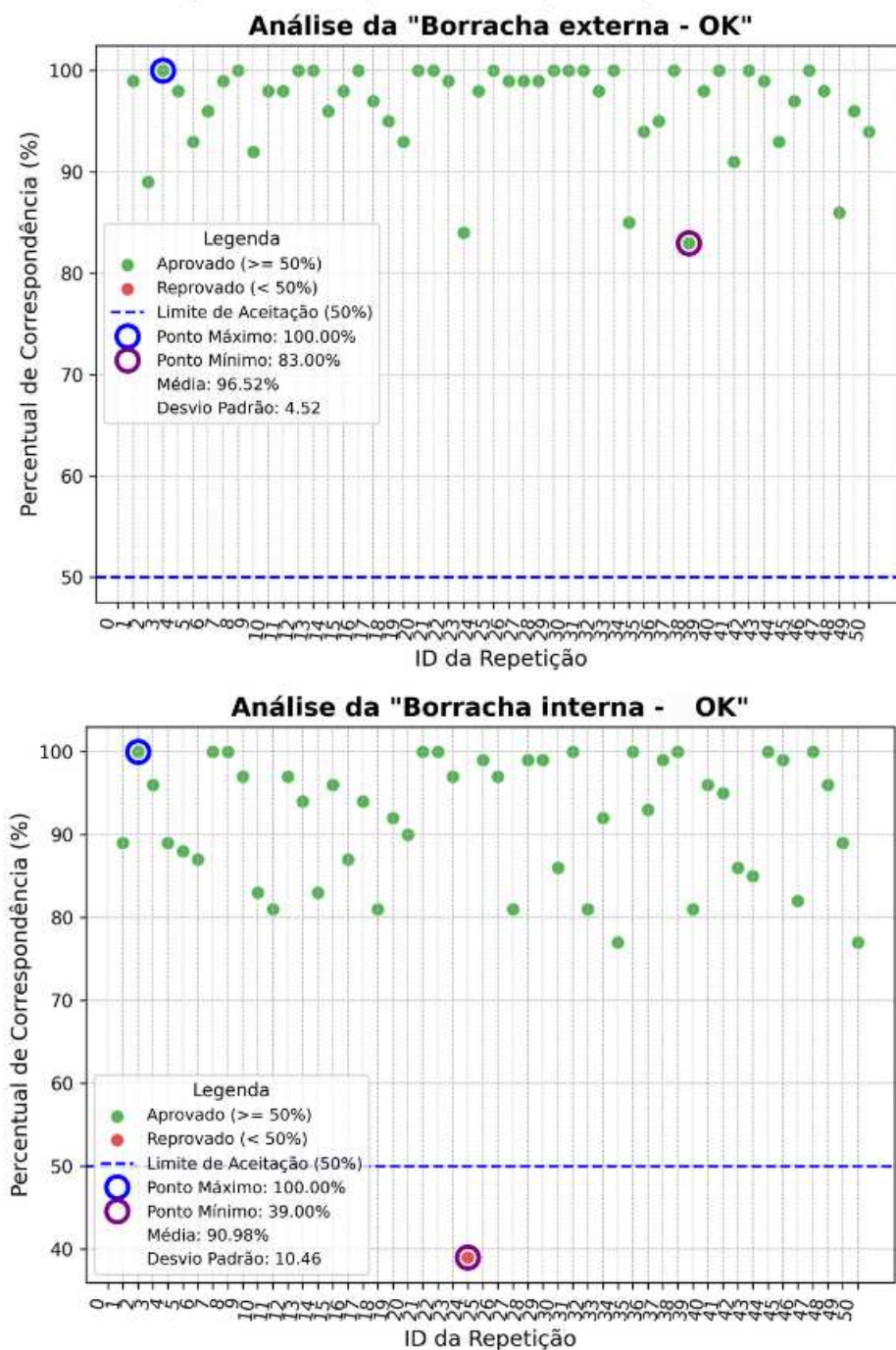
Análise de Dispersão do Suporte de Fixação: Peça B -Não conforme - NOK



Fonte: A autora.

Figura 36 – Gráfico de dispersão da placa de fixação conforme.

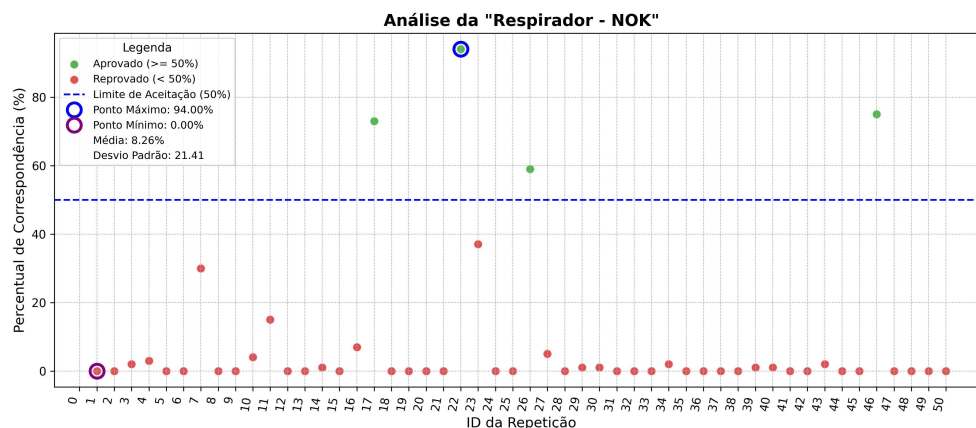
Análise de Dispersão do Suporte de Fixação: Peça C - Conforme - OK



Fonte: A autora.

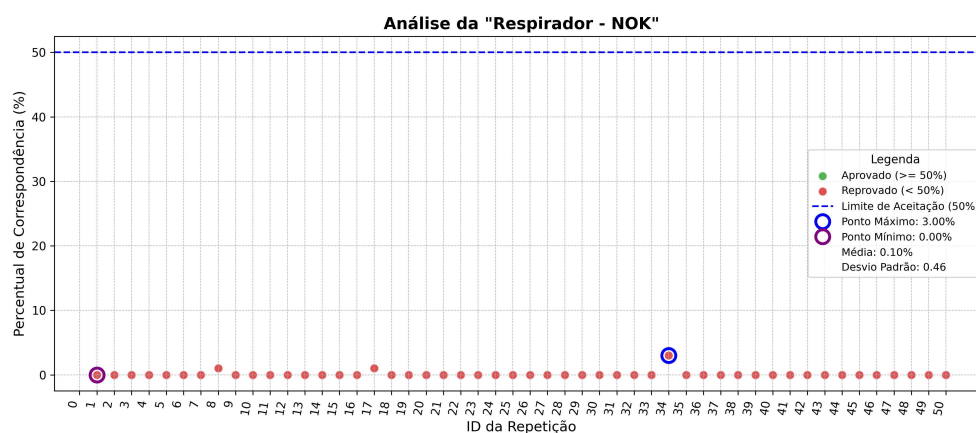
Figura 37 – Resultados da repetibilidade para os três cenários do respirador.

Análise de Dispersão do Respirador: Peça A - Limítrofe - NOK



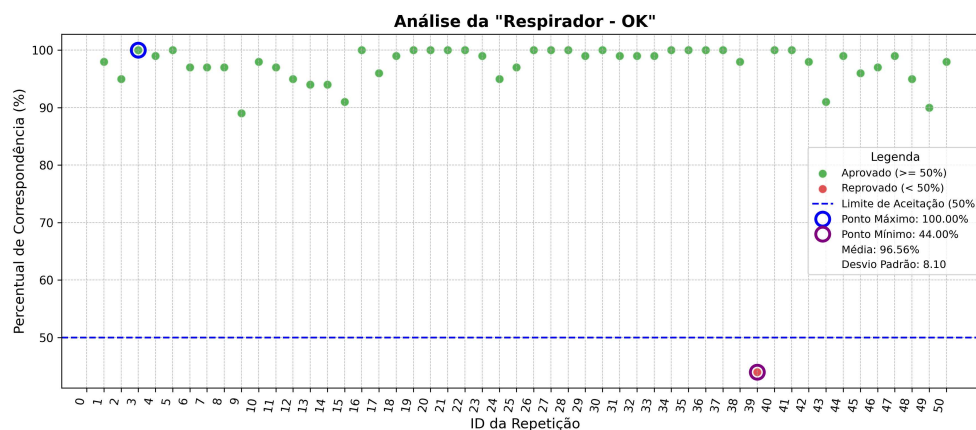
(a) Sem espuma (limítrofe).

Análise de Dispersão do Respirador: Peça B - Não conforme - NOK



(b) Sem respirador (não conforme).

Análise de Dispersão do Respirador: Peça C - Conforme - OK



(c) Com espuma (conforme).

Fonte: A autora.

5 CONCLUSÃO

O trabalho propôs a implementação de um sistema de VC para inspeção de peças de montagem de um religador no ambiente de uma *Smart Factory*, com o intuito de garantir a qualidade e integridade do equipamento em questão. A câmera instalada verifica a presença dos componentes de vedação do tanque e da placa de fixação do painel de controle do religador. O sistema de VC é intertravado com o sistema de produção MES da fábrica, garantindo que a função da câmera de garantir qualidade da peça, seja atendida.

A análise dos resultados revelou um desempenho consistente do sistema de inspeção, com alta precisão e especificidade, garantindo que peças não conformes sejam corretamente identificadas e que peças conformes não sejam rejeitadas por engano. No entanto, a sensibilidade apresentou valores inferiores, indicando a ocorrência de falsos negativos. Contudo, esses defeitos sutis não comprometem o processo neste caso específico, uma vez que não há histórico de recebimento dos insumos com as falhas testadas durante o projeto, sendo simuladas para testar os limites do sistema.

Os testes de repetibilidade confirmaram a consistência do sistema para casos claramente definidos, mas indicaram que os falsos negativos estão associados a peças limítrofes, onde pequenas variações na posição da vedação, deformações sutis ou condições de iluminação desfavoráveis podem levar a classificações incorretas. Considerando esses resultados, busca-se realizar ajustes no posicionamento da câmera e no programa de validação, além de ampliar o conjunto de treinamento para incluir exemplos mais representativos desses casos limítrofes, com o objetivo de aumentar a confiança e a robustez do sistema implementado.

De forma geral, os objetivos de compreensão dos modos de falha do processo, instalação e implementação da câmera inteligente e conexão ao sistema da fábrica, foram satisfatoriamente atingidos, apesar dos pontos de melhoria que foram observados. Os benefícios poderão ser melhor observados após mais dados coletados da produção de fato.

Para aprimorar o sistema, pode-se realizar a retroalimentação do algoritmo do programa proposto, utilizando um banco de dados com imagens de falhas confirmadas para treinar novamente o modelo de classificação, aumentando sua

especificidade. Além disso, a otimização do ambiente de inspeção com um suporte de fixação na altura correta que permita o posicionamento retilíneo da câmera e consequentemente a iluminação será melhor controlada. Por fim, há a sugestão de implementar na IHM, além do status da inspeção, um resultado que apresente a posição do defeito quando esse está presente.

Este projeto auxiliou no entendimento do conceito de *Smart Factory* empregado por empresas, mostrando que a inteligência da fábrica reside na integração profunda e em tempo real dos dados entre planejamento, execução, estoque e demanda. Em suma, o sistema de inspeção desenvolvido representa o investimento em inovação ganhando destaque no ambiente fabril que reconhece a sua importância para garantia de qualidade na produção.

REFERÊNCIAS

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG); VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE (VDA). **Failure Mode and Effects Analysis FMEA Handbook**. 1st. Southfield, MI, USA e Berlin, Germany, 2019. Harmonized AIAG VDA FMEA Handbook.

BUNDSCHERER, Maximilian; SCHMITT, Thomas H.; BOCKLET, Tobias. **Machine Learning in Industrial Quality Control of Glass Bottle Prints**. Nuremberg, Germany: [s.n.], 2023. Accessed on: Jul. 3, 2025.

CAPELLI, F. G. **Controladores Lógicos Programáveis: Sistemas Discretos**. 3^a. São Paulo: Editora Érica, 2022.

EATON. **Fundamentos de religadores**. [S.l.: s.n.], 2024.
<https://www.eaton.com/br/pt-br/products/medium-voltage-power-distribution-control-systems/reclosers/reclosers--fundamentals-of-reclosers.html>. Acessado em: 10 de julho de 2024.

ELECTRIC, Schneider. **Religadores**. [S.l.: s.n.], 2025.
<https://www.se.com/br/pt/product-category/86885-religadores/>. Acesso em: 08 jun. 2025.

FERNANDES, Cecili Duwe. **Automação de Processo de Costura Industrial Overlock: Robotização com Visão Computacional**. Blumenau, SC, Brasil: [s.n.], 2024. Orientador: Guilherme Brasil Pintarelli.

FILHO, João Mamede; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011.

GHOBAKHLOO, Morteza; FATHI, Masood; IRANMANESH, Mohammad; MAROUFKHANI, Parisa; MORALES, Manuel E. Industry 4.0 ten years on: A

bibliometric and systematic review of concepts, sustainability value drivers, and success determinants. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 302, 2021.

GONEN, Turan. **Electric Power Distribution Engineering**. 3rd. [S.l.]: CRC Press, 2014. ISBN 978-1482207002.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 5^a. Boston: Pearson Education, 2021.

HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios**. [S.l.], 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/307863497_Design_Principles_for_Industrie_40_Scenarios.

IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines**. [S.l.], 2008.

IEEE/IEC International Standard - High-voltage switchgear and controlgear - Part 111: Automatic circuit reclosers and fault interrupters for alternating current systems up to 38 kV. **IEEE Std C37.60-2012**, p. 1–134, 2012.

INATEL. **Projeto de Mestrado com Visão Computacional e Inteligência Artificial revoluciona controle de qualidade em Indústria 4.0**. [S.l.: s.n.], 2021. Acessado em: 15 jun. 2025. Disponível em: <https://inatel.br/noticias/projeto-de-mestrado-com-visao-computacional-e-inteligencia-artificial-revoluciona-controle-de-qualidade-em-industria-40>.

KATULIĆ, Filip; SUMINA, Damir; GROŠ, Stjepan; ERCEG, Igor. Protecting Modbus/TCP-Based Industrial Automation and Control Systems Using Message Authentication Codes. **IEEE Access**, IEEE, v. 11, p. 47007–47022, 2023.

KEYENCE CORPORATION. **Manual do sensor de visão IV3: IV3-G, IV3-500GCA, IV3-LG5C**. Osaka, Japão, 2021. Disponível em: <https://www.keyence.com.br>. Acesso em: 4 jun. 2025.

KEYENCE CORPORATION. **Sensor de visão Série IV3 Manual do Usuário (Software para PC)**. Osaka, Japão, 2021. Disponível em: <https://www.keyence.com.br>. Acesso em: 4 jun. 2025.

KILARI, Sai Dhiresh. **Advanced Strategies for Automating PFMEA in Manufacturing: Enhancing Efficiency and Risk Mitigation through Digital Integration**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://ssrn.com/abstract=5234342>. University of Texas at El Paso.

KÖK, Nesimi; YILDIZ, Mehmet Selami. New generation FMEA method in automotive industry: an implementation. **Journal of Turkish Operations Management**, v. 7, n. 1, p. 1630–1643, 2023.

LINS, Romulo Gonçalves; SANTOS, Reinaldo Eduardo dos; GASPAR, Ricardo. Vision-based measurement for quality control inspection in the context of Industry 4.0: a comprehensive review and design challenges. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Springer, v. 45, n. 229, 2023.

MENDES, João P.T.; SILVA, Lucas A.M. da; MELLO, Ricardo F. de. A novel mechatronics system for peg-in-hole assembly with quality inspection. *In*: **PROCEDIA Computer Science**. [S.l.]: Elsevier, 2023. v. 217, p. 1486–1495.

NASCIMENTO MIURA, Sara Mayumi do. **Sistema de visão computacional aplicado ao ajuste e correção de trajetórias de robôs industriais**. Blumenau, SC, Brasil, 2023. Orientador: Leonardo Mejia Rincon; acesso via repositório UFSC.

PETRUZELLA, Frank D. **Programmable Logic Controllers**. 6^a. New York: McGraw-Hill Education, 2022.

RIBEIRO, Milena. **Aplicação da automação na redução de riscos mapeados com a metodologia PFMEA em uma empresa de painéis de**

baixa e média tensão. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Blumenau, SC. Acesso em: 28 jun. 2025.

SADER, Sami; HUSTI, Istvan; DAROCZI, Miklos. A review of Quality 4.0: definitions, features, technologies, applications, and challenges. **Total Quality Management & Business Excellence**, Routledge, v. 33, 2022.

SALEM, Ali Ahmed; LAU, Kwan Yiew; ABDUL-MALEK, Zulkurnain; ZHOU, Wenbin; AL-AMERI, Salem; AL-GAILANI, Samir A.; RAHMAN, Rahisham Abd. Investigation of High Voltage Polymeric Insulators Performance under Wet Pollution. **Polymers**, v. 14, n. 6, 2022. ISSN 2073-4360.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Modicon M251 Logic Controller Hardware Guide**. [S.l.], 2019. Document Reference: EIO0000003101.01 12/2019.

SHINGO, Shigeo. **Zero Quality Control: Source Inspection and the Poka-yoke System**. Cambridge, MA: Productivity Press, 1986. ISBN 978-0915299072.

STADNICKA, Dorota; ANTONELLI, Dario. Classification Graph of Poka-Yoke Techniques for Industrial Applications: Assembly Process Case Studies Effectiveness Evaluation. **Technologia I Automatyzacja Montażu (Assembly Techniques and Technologies)**, v. 124, n. 2, p. 18–28, 2024.

SZELISKI, Richard. **Computer Vision: Algorithms and Applications**. [S.l.]: Springer, 2010.

WANG, Guoping. A New Approach for PLC Ladder Diagram Design. *In*: 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). Fort Wayne, IN: IEEE, 2021. P. 020–026.

WEST, Perry. **Fundamentals of Machine Vision**. San Jose, California, 2021. White Paper.

XU, Xun; LU, Yuqian; VOGEL-HEUSER, Birgit; WANG, Lihui. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 530–535, 2021. ISSN 0278-6125.