

**APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E IOT NA MODERNIZAÇÃO DA INSPEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: UM ESTUDO NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS**

 <https://doi.org/10.56238/arev6n4-255>

**Data de submissão:** 17/11/2024

**Data de publicação:** 17/12/2024

**Karen Kettelen Souza Soares**

Engenheira de Produção

Acadêmica do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL

E-mail: karen.kettelen@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-8761-2506>

**Gil Eduardo Guimarães**

D. Sc.

Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais

Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL

E-mail: gil.guimaraes@itegam.org.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2800-4620>

**Nelson Marinelli Filho**

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica

Professor do Curso de Mestrado Profissional em Engenharia, Gestão de processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM) – AM – BRASIL

E-mail: nelson.marinelli@itegam.org.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-4362-0132>

**Fabricio Carlos Schmidt**

D. Sc.

Doutor em Engenharia de Produção

Professor do Curso de Engenharia de Produção da Universidade Regional do Noroeste do RS (UNIJUI) – RS – BRASIL

E-mail: fabricios@bruning.com.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5279-7072>

**Geraldo Nunes Correa**

D. Sc.

Doutor em Engenharia Mecânica

Professor do Curso Sistemas de Informação da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG) - MG – BRASIL

E-mail: geraldo.correa@uemg.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5477-6953>

---

## RESUMO

A transformação digital impulsionada pela Indústria 4.0 tem fomentado a integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) para revolucionar processos industriais. Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma solução inovadora de Inspeção Óptica Automatizada (AOI), que combina algoritmos de aprendizado profundo, IoT e sistemas ciber-físicos para identificar e classificar defeitos em placas de circuito impresso (PCBs). A metodologia abrangeu o projeto de hardware dedicado, software especializado e a criação de um painel interativo para visualização em tempo real dos dados de inspeção. Os resultados demonstraram avanços significativos na eficiência e precisão do processo, além de uma redução notável nas taxas de falhas. Este trabalho reforça o potencial da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 para a modernização da indústria eletrônica brasileira, especialmente no Polo Industrial de Manaus, destacando benefícios competitivos e caminhos para superar desafios tecnológicos no setor.

**Palavras-chave:** Indústria 4.0, Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Inspeção Óptica Automatizada (AOI), Modernização Industrial, Placas de Circuito Impresso (PCBs).

## 1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial, em suas diferentes fases, tem desempenhado um papel fundamental na transformação dos processos produtivos. Na sua quarta etapa, conhecida como Indústria 4.0, a integração de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e sistemas ciber-físicos, tem revolucionado o cenário industrial global (SCHWAB, 2016). Mais do que uma evolução tecnológica, a Indústria 4.0 simboliza uma reestruturação abrangente das cadeias produtivas, promovendo automação, digitalização e conectividade em níveis sem precedentes (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

No Brasil, a transição para a Indústria 4.0 enfrenta tanto desafios quanto oportunidades. Estudos conduzidos pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) destacam avanços na adoção de tecnologias digitais, mas apontam barreiras críticas, como a baixa digitalização e a infraestrutura limitada das empresas nacionais (CNI, 2017; CNI, 2022). Embora 69% das empresas brasileiras relatem o uso de alguma tecnologia digital, a maior parte ainda está nos estágios iniciais dessa transformação, o que reforça a urgência de investimentos em infraestrutura digital e capacitação técnica (GILCHRIST, 2016).

A fabricação de placas de circuito impresso (PCBs) é uma área industrial emblemática que pode se beneficiar amplamente da Indústria 4.0. Esses componentes são essenciais para dispositivos eletrônicos modernos, e sua qualidade afeta diretamente o desempenho dos produtos finais. Apesar disso, muitos processos de inspeção de PCBs ainda são realizados manualmente, limitados pela suscetibilidade a erros humanos e pela eficiência reduzida (LI et al., 2018). Soluções baseadas em IA e IoT oferecem uma oportunidade única para superar essas limitações, como evidenciado por estudos que demonstram o potencial dessas tecnologias na melhoria da precisão e eficiência (ZHANG et al., 2019).

Neste contexto, este artigo apresenta o desenvolvimento de uma solução de inspeção óptica automatizada (AOI) que utiliza IA e IoT para detectar e classificar defeitos em PCBs. Além disso, propõe-se a implementação de um painel interativo para análise em tempo real dos dados gerados durante o processo de inspeção. O objetivo é não apenas otimizar a qualidade das PCBs, mas também contribuir para a transformação digital da indústria eletrônica no Brasil, com foco no Polo Industrial de Manaus.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS E EVOLUÇÃO

#### 2.1.1 Histórico e Definições

A Indústria 4.0, introduzida em 2011 na Feira de Hannover, representa a integração de tecnologias digitais avançadas com processos industriais tradicionais. É descrição pela digitalização e automação, aumentando eficiência e flexibilidade operacional (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Historicamente, a Indústria 4.0 sucede três grandes revoluções industriais. A **Primeira Revolução Industrial**, no século XVIII, introduziu a mecanização com o uso de máquinas a vapor. A **Segunda Revolução**, no final do século XIX, trouxe a eletrificação e o conceito de produção em massa. Já a **Terceira Revolução**, iniciada na segunda metade do século XX, utilizou a automação, possibilitada por eletrônicos e tecnologias de informação (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

A Quarta Revolução destaca-se pela integração de sistemas físicos e digitais, possibilitando fábricas inteligentes por meio de tecnologias como sistemas ciber-físicos, IoT, IA e Big Data (LI; HOU; WU, 2017).

#### 2.1.2 Principais Tecnologias e Impactos na Manufatura

A Indústria 4.0 está alicerçada em um conjunto de tecnologias centrais que transformam profundamente a manufatura. Entre essas tecnologias destacam-se:

- **Internet das Coisas (IoT)**: Facilita a conectividade entre dispositivos e sistemas, permitindo o monitoramento em tempo real e a integração de dados em toda a cadeia produtiva.
- **Inteligência Artificial (IA)**: Proporciona análises avançadas e automação de processos por meio de algoritmos que simulam capacidades humanas, como aprendizado e tomada de decisão.
- **Big Data**: Oferece infraestrutura para o armazenamento e processamento de grandes volumes de dados gerados pelos dispositivos IoT e sistemas ciber-físicos.
- **Sistemas Ciber-Físicos**: Integram elementos físicos e digitais, conectando máquinas, sensores e redes para criar processos autônomos e adaptativos (LU; PAPAGIANNIDIS; ALAMANOS, 2018).

Essas tecnologias tornam as linhas de produção mais flexíveis. A IoT possibilita a manutenção preditiva, com economia de falhas, enquanto a automação permite pequenos lotes sem perder escala, atendendo à demanda por personalização (LIAO et al., 2017).

Apesar dos benefícios, a implementação enfrenta desafios, como segurança cibernética em ambientes conectados e a necessidade de qualificar a força de trabalho para operar sistemas complexos (SCHWAB, 2016).

### **2.1.3 Desafios e Oportunidades na Implementação**

A transição para a Indústria 4.0 enfrenta desafios estruturais e culturais, especialmente em países como o Brasil, devido à infraestrutura digital insuficiente, altos custos e resistência organizacional. As PMEs ainda lidam com dificuldades de financiamento para tecnologias avançadas (CNI, 2022).

Por outro lado, a Indústria 4.0 oferece oportunidades como redução de custos, aumento de eficiência e inovação. Tecnologias como IA e IoT permitem novos modelos de negócios, como serviços personalizados e soluções digitais, agregando valor aos produtos (BÜCHERL et al., 2017). Em polos industriais como Manaus, a adoção dessas tecnologias, com modelos de negócios baseados em serviços digitais, pode diferenciar o setor, com exemplos como manutenção preditiva e monitoramento remoto (KAGERMANN et al., 2013).

## **2.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA INDÚSTRIA**

### **2.2.1 Fundamentos da Inteligência Artificial**

A Inteligência Artificial (IA) é fundamental para inovações da Indústria 4.0, simulando capacidades humanas como aprendizado e tomada de decisão. Avanços como o aprendizado profundo (Deep Learning) viabilizam redes neurais convolucionais (CNNs) para análise de imagens e linguagem (LECUN; BENGIO; HINTON, 2015). Na indústria, a IA é usada em automação, manutenção preditiva e controle de qualidade, detectando anomalias e ajustando processos em tempo real, melhorando eficiência e precisão (RUSSELL; NORVIG, 2021).

### **2.2.2 Aplicações da IA na Inspeção de Qualidade**

A inspeção de qualidade foi significativamente transformada pela IA, que supera as limitações de inspeções manuais e semiautomatizadas, suscetíveis a erros humanos e baixa eficiência em grandes volumes (ZHANG et al., 2021). Técnicas de aprendizado de máquina treinam sistemas de IA para identificar defeitos com alta precisão, utilizando visão computacional e processamento de imagens. Na fabricação de PCBs, a IA detecta falhas microscópicas, garantindo maior controle de qualidade (LI et al., 2018). Além disso, permite inspeções em tempo real, analisando dados durante a produção,

possibilitando ajustes imediatos, custos e melhorando a produtividade e a qualidade final (ZHANG et al., 2019).

### **2.2.3 Algoritmos de Aprendizado Profundo para Detecção de Defeitos**

O aprendizado profundo (Deep Learning) tem revolucionado a detecção de defeitos industriais, com redes neurais convolucionais (CNNs) amplamente utilizadas em visão computacional por sua alta precisão na identificação de padrões complexos (KRIZHEVSKY; SUTSKEVER; HINTON, 2012). Na inspeção de PCBs, CNNs treinadas com milhares de imagens identificam falhas como curtos-circuitos e componentes ausentes, adaptando-se a diferentes produtos e padrões de defeitos (HE et al., 2016). Integradas com IoT, as CNNs permitem análise em tempo real, otimizando manutenção preditiva e desempenho produtivo (ZHANG et al., 2019).

## **2.3 INTERNET DAS COISAS (IOT) E A CONECTIVIDADE NA INDÚSTRIA 4.0**

### **2.3.1 IoT: Definição e Aplicações Industriais**

A Internet das Coisas (IoT) conecta dispositivos físicos a redes digitais, permitindo comunicação e coleta de dados em tempo real, essencial para sistemas ciber-físicos que integram máquinas, sensores e operadores (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010). Na indústria, a IoT é usada para automação, rastreabilidade e otimização de processos, com sensores inteligentes monitorando variáveis críticas e viabilizando manutenção preditiva (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Além disso, melhora o controle de qualidade e a eficiência produtiva ao coletar dados detalhados em todas as etapas (WORTMANN; FLÜCHTER, 2015).

### **2.3.2 Integração da IoT com Sistemas de Inspeção Automatizada**

A integração da IoT com sistemas de inspeção óptica automatizada (AOI) representa um avanço crucial na Indústria 4.0, permitindo a transmissão em tempo real de dados de inspeção para análises avançadas e ajuste de configurações de produção (BI; XU; WANG, 2014). Essa conectividade melhorou a progressão entre etapas produtivas, falhas e atrasos. Sensores IoT monitoram o desempenho dos equipamentos, viabilizando manutenção preditiva e evitando o tempo de inatividade (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2016).

### **2.3.3 Benefícios e Desafios da Implementação da IoT**

A IoT proporciona maior eficiência, redução de custos e flexibilidade nos processos produtivos, permitindo o monitoramento contínuo e a melhoria na qualidade dos produtos (WORTMANN;

FLÜCHTER, 2015). Contudo, desafios como segurança cibernética e gestão de grandes volumes de dados bloqueiam proteção contra ataques e tecnologias robustas para análise e infraestrutura confiável (XU; HE; LI, 2014).

## 2.4 INSPEÇÃO ÓPTICA AUTOMATIZADA (AOI)

### 2.4.1 Conceitos e Evolução da AOI

A Inspeção Óptica Automatizada (AOI) é essencial na fabricação moderna, especialmente na produção de PCBs, para identificar automaticamente defeitos nos sistemas de visão computacional, eliminando a necessidade de inspeção manual, que é sujeita a erros e inconsistências. Nos anos 1980 e 1990, os sistemas AOI tinham especificações devido ao uso de câmeras de baixa resolução e algoritmos simples, resultando em altas taxas de falsas positivas e exigência de validação manual (TSAI; TSAI; TSAI).

Com avanços em sensores, câmeras de alta resolução e inteligência artificial, a AOI tornou-se altamente eficaz. A inclusão de aprendizado de máquina e redes neurais convolucionais (CNNs) ampliou suas capacidades, permitindo a detecção precisa de vários tipos de defeitos (WANG et al., 2013). Atualmente, a AOI é necessária em linhas automatizadas, garantindo qualidade e eficiência em larga escala.

### 2.4.2 Tecnologias de Inspeção Baseadas em Imagem

Os sistemas AOI combinam diversos componentes tecnológicos para alcançar alta precisão na inspeção. Entre eles, destacam-se:

- **Câmeras de Alta Resolução:** são usadas na fabricação de PCBs para capturar imagens aparentes e detectar defeitos microscópicos, como falhas de solda e curtos-circuitos, com precisão micrométricas (BLOOM, 2015).
- **Iluminação Controlada:** técnicas de iluminação controlada, como iluminação difusa ou de campo escuro, destacam características específicas, facilitando a identificação de defeitos (XIE et al., 2012).
- **Processamento de Imagem:** Algoritmos de processamento de imagem analisam padrões e comparam características com especificações pré-definidas. Os avanços no aprendizado de máquina geraram esses algoritmos mais robustos, com erros rápidos (LIU et al., 2018).
- **Inteligência Artificial:** As redes neurais convolucionais (CNNs) revolucionaram os sistemas AOI, permitindo análises em tempo real e aprendizado contínuo para adaptação a diferentes padrões de defeitos (ZHANG et al., 2019).

#### **2.4.3 Aplicações da AOI em Placas de Circuito Impresso**

A AOI é essencial na inspeção de PCBs para garantir alta qualidade em componentes eletrônicos. Os sistemas AOI podem identificar uma ampla gama de defeitos, incluindo: Soldas defeituosas, Componentes ausentes ou desalinhados, Curtos-circuitos e Conexões abertas.

A inspeção em diferentes etapas produtivas permite detectar e corrigir problemas precocemente (WANG et al., 2013). A integração da AOI com IoT e Big Data aprimora o controle e monitoramento contínuo, tornando a produção mais eficiente e econômica (MALAMIS; GRIGOROUDIS, 2019).

#### **2.4.4 Benefícios e Desafios da Implementação da AOI**

A AOI oferece maior precisão, velocidade, redução de custos e aumento de eficiência produtiva, sendo essencial em indústrias de alta demanda, onde a qualidade é diferencial competitivo (BLOOM, 2015). Porém, enfrentar desafios como altos custos iniciais, necessidade de qualificação técnica e barreiras para PMEs (WANG et al., 2013). A integração com outros exige sistemas de planejamento e infraestrutura tecnológica robusta (LIU et al., 2018).

### **2.5 ESTUDOS DE CASO E APLICAÇÕES PRÁTICAS**

#### **2.5.1 Exemplos de Implementação de IA e IoT na Inspeção de PCBs**

Estudos de caso mostram como IA e IoT transformam a inspeção de qualidade em PCBs, aumentando a eficiência e melhorando os produtos. A Foxconn integrou AOI com IoT, permitindo monitoramento em tempo real e manutenção preditiva, diminuindo a inatividade e aumentando a precisão na inspeção (YU; FAN; QIN, 2018). Já a Siemens utilizou redes neurais convolucionais (CNNs), alcançando mais de 99% de precisão e reduzindo custos de defeitos em 30% (SIEMENS, 2019). A IoT também possibilitou ajustes em tempo real, ampliando a flexibilidade e eficiência.

#### **2.5.2 Resultados e Benefícios Observados**

A implementação de IA e IoT na inspeção de PCBs trouxe resultados positivos, como redução de defeitos devido a algoritmos avançados, maior eficiência com processos otimizados e manutenção preditiva, prevenindo falhas críticas e custos e paradas (MALAKAR; KULKARNI, 2020). A análise de dados em tempo real permitiu ajustes rápidos às condições de produção, garantindo conformidade com padrões internacionais de qualidade (XIAO et al., 2020).

### **2.5.3 Lições Aprendidas e Melhores Práticas**

Estudos de caso destacam lições da adoção de tecnologias 4.0 na inspeção de qualidade. Entre as melhores práticas estão: qualificação da equipe, essencial para operar sistemas complexos (ZHAO; SUN; LI, 2021); planejamento com infraestrutura robusta para integração eficiente (FENG; LI; LIU, 2019); e melhoria contínua, com foco em inovação para acompanhar a evolução tecnológica (XIAO et al., 2020).

## **2.6 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

### **2.6.1 Etapas do Processo de Fabricação**

A fabricação de PCBs é um processo complexo que requer controle rigoroso para garantir a qualidade. Entre as etapas principais estão: Produção da Placa Nua , onde o layout é transferido para um material isolante revestido de cobre, com fotolitografia e processos químicos formando as trilhas condutoras (GUO et al., 2016); Montagem de Componentes , utilizando tecnologias SMT para produção em massa e THT para componentes maiores e robustos (KUMAR et al., 2018); e Inspeção e Testes , com técnicas como AOI e raios-X para detectar defeitos e garantir a conformidade técnica (WANG et al., 2013).

### **2.6.2 Principais Defeitos em Placas de Circuito Impresso**

Os principais defeitos em PCBs incluem falhas no material, como interrupções nas trilhas e curtos-circuitos; defeitos na montagem, como desalinhamentos ou componentes ausentes; e problemas de soldagem, como soldas frias ou em excesso, geralmente causados por parâmetros inadequados ou condições ambientais (CHO et al., 2016). O controle de qualidade rigoroso é essencial para minimizar esses problemas e garantir a confiabilidade dos PCBs.

## **2.7 GARANTIA DA QUALIDADE NA FABRICAÇÃO DE PCBS**

### **2.7.1 Metodologias de Garantia da Qualidade**

A garantia da qualidade na fabricação de PCBs utiliza metodologias como FMEA e DOE para identificar e prevenir falhas (LENTZ et al., 2015; MONTGOMERY, 2017). O Controle Estatístico de Processo (CEP) monitora a estabilidade e capacidade produtiva, detectando variações antes de gerar defeitos (CHEN; LU; ZHANG, 2017). Estudos de Repetitividade e Reprodutibilidade (GR&R) e calibrações regulares asseguram precisão precisas, atendendo normas como a ISO 9001 (ISO, 2015).

### **2.7.2 Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade**

A implantação de um sistema de garantia de qualidade em fabricantes de PCBs é crucial para garantir competitividade e conformidade com padrões internacionais. Este estudo propõe uma abordagem em três fases baseada no modelo PDCA e nas práticas de Juran e Gryna (1993).

#### **2.7.2.1 Fase 1: Análise e Sistematização dos Processos**

Essa etapa envolve o mapeamento detalhado dos processos produtivos para identificar gargalos, padronizar atividades e aplicar ferramentas de controle de qualidade. Práticas recomendadas incluem:

- Diagrama de Pareto e Causa e Efeito : Para priorizar problemas críticos e identificar as causas principais.
- Procedimentos Operacionais Padrão (SOPs) : Reduzem a variabilidade e garantem consistência.
- Treinamento da Equipe : Capacitação é essencial para alinhar colaboradores às critérios de qualidade (ISHIKAWA, 1985; DEMING, 1986).

Essa análise cria as bases para um sistema de qualidade eficiente e robusto.

#### **2.7.2.2 Fase 2: Desenvolvimento e Planejamento do Processo**

Essa fase foca na prevenção de falhas por meio de ferramentas como PFMEA, que identifica falhas potenciais e propõe ações corretivas, e Delineamento de Experimentos (DOE), para otimização de variações críticas e aumento de eficiência (CARBONE; CAMARGO, 2003; Inclui também a validação de processos com ensaios piloto, garantindo escalabilidade com riscos mínimos

#### **2.7.2.3 Fase 3: Produção e Controle**

Na fase final, a produção em larga escala é monitorada pelo Controle Estatístico de Processo (CEP) e sistemas de inspeção como AOI e Raios-X, garantindo a conformidade dos produtos. Aspectos metrológicos, como ocultação de instrumentos e estudos de GR&R, garantem precisão precisas e redução de variabilidades (WHEELOCK, 1992; MONTGOMERY, 2017). A integração contínua entre controle e produção promove um ciclo de melhoria contínuo, alinhado ao modelo PDCA, elevando qualidade e eficiência.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com a estrutura proposta por Gil (2010), a pesquisa foi classificada com base nos seguintes critérios:

- **Natureza da Pesquisa:** A pesquisa é de natureza **aplicada**, pois busca desenvolver uma solução prática e específica para melhorar a eficiência e a qualidade na fabricação de PCBs.
- **Abordagem do Problema:** Adotou-se uma abordagem predominantemente **quantitativa**, enfatizando a coleta e análise de dados como taxas de defeitos, desempenho de algoritmos e eficiência do processo.
- **Objetivos:** A pesquisa é **exploratória**, por investigar novas aplicações de IA e IoT, e **descritiva**, ao detalhar os processos e componentes envolvidos na implementação.
- **Procedimentos Técnicos:** Classifica-se como um **estudo de caso**, centrado na análise detalhada de uma solução específica aplicada ao contexto da produção de PCBs.

#### 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA AOI E DA REDE IOT

##### 3.2.1 Análise da Implementação da AOI

A solução de AOI proposta detecta defeitos em PCBs por meio de análise automatizada, mas com algumas limitações. A funcionalidade de manutenção preditiva, apesar de mencionada como potencial, não foi implementada. A AOI concentra-se na detecção imediata de falhas e na análise de dados históricos para aprimoramento contínuo, sem realizar ajustes automáticos em máquinas conectadas (FERNANDEZ et al., 2020; TSENG; HSU; LIU, 2019).

##### 3.2.2 Infraestrutura da Rede IoT

A rede IoT integra dispositivos e sistemas responsáveis pela operação da AOI, permitindo comunicação, controle e monitoramento em tempo real. A infraestrutura tecnológica foi projetada para garantir interconectividade eficiente e alta confiabilidade por meio de protocolos como Ethernet.

##### 3.2.3 Interconectividade dos Dispositivos

Os principais componentes da solução incluem câmeras, sensores, CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), Raspberry Pi, computadores e servidores, todos conectados para garantir transmissão rápida de dados. O computador principal realiza o processamento das imagens capturadas, enquanto o Raspberry Pi gerencia funções auxiliares, como movimentação dos cartesianos e streaming de vídeo.

### 3.2.4 Funções dos CLPs na Rede IoT

Os CLPs desempenham funções críticas, como monitoramento de segurança, controle de movimento dos servos, e emissão de alarmes. O CLP principal coordena a comunicação entre dispositivos e garante a continuidade do processo de inspeção, enquanto o CLP de segurança atua como uma camada adicional de proteção, podendo interromper operações em situações de emergência.

### 3.2.5 Componentes da Solução AOI

A solução foi estruturada em três principais componentes: **Hardware (HW)**, **Software (SW)** e **Visão Computacional e Inteligência Artificial (VC/IA)**, cada um desempenhando um papel essencial no desempenho do sistema.

### 3.2.6 Hardware (HW)

O protótipo de hardware foi desenvolvido para capturar imagens de alta qualidade de PCBs. A estrutura inclui:

- **Sistema de visão:** Composto por câmera e lente acopladas a um eixo cartesiano.
- **Mesa indexadora:** Responsável pelo transporte das PCBs até a área de inspeção.
- **Controle de automação:** Sub-rotinas no CLP para controle de velocidade e posição dos motores.

A integração dos sistemas mecânicos e de visão permitiu a realização de inspeções com alta precisão e eficiência.

### 3.2.7 Software (SW)

O software desenvolvido integra os módulos de gestão e inspeção, incluindo funcionalidades como:

- **Cadastro e gestão de PCBs:** Armazenamento de informações e modelos treinados.
- **Inspeção:** Início de processos com exibição detalhada dos resultados.
- **Dashboard:** Visualização de dados de desempenho em gráficos e tabelas.

A comunicação com o hardware e os sistemas de IA é feita por meio de APIs específicas, garantindo a sincronização entre os componentes.

### 3.2.8 Visão Computacional e Inteligência Artificial (VC/IA)

A Visão Computacional e IA são os núcleos do sistema de inspeção. A rede neural utilizada incorpora blocos residuais e técnicas de aprendizado por transferência, permitindo alta precisão com uma base limitada de treinamento.

A configuração específica da câmera e do sistema de iluminação foi projetada para capturar imagens com qualidade ideal, eliminando ruídos e reflexos que poderiam comprometer a análise. O sistema de IA foi validado por meio de testes com PCBs reais, demonstrando elevada eficácia na classificação de defeitos.

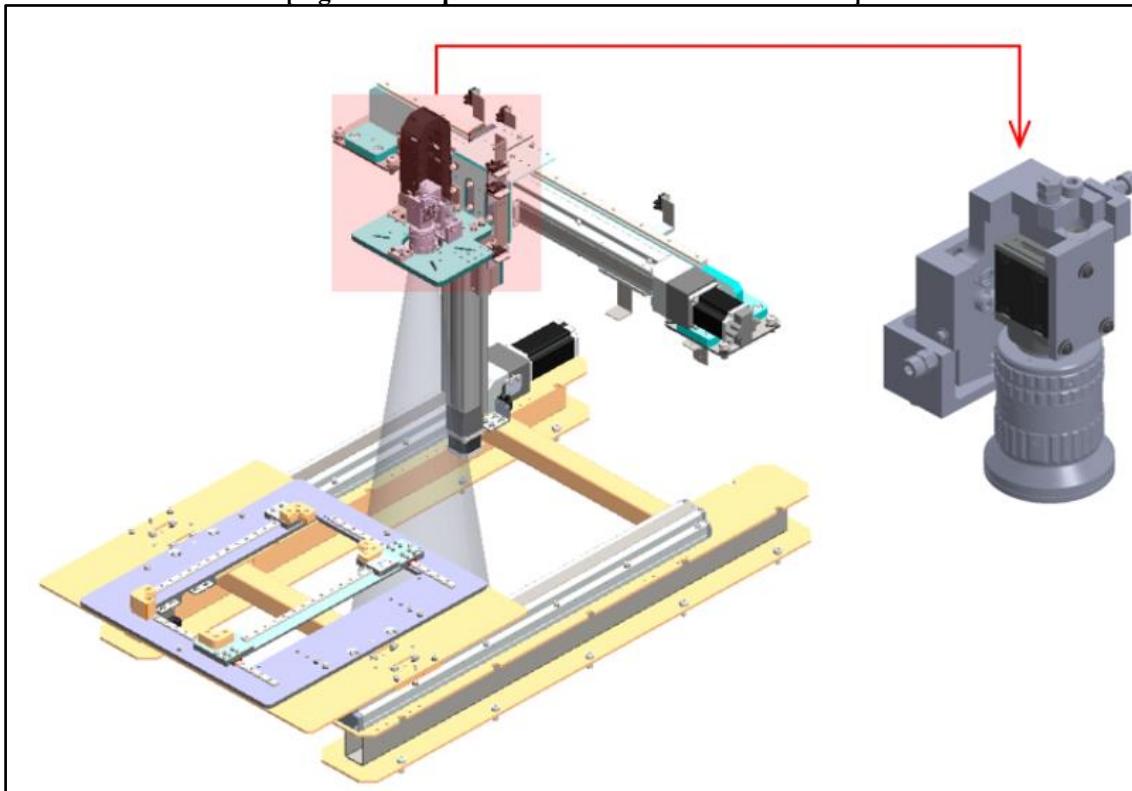
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DO HARDWARE

#### 4.1.1 Estrutura Mecânica e Projeto de Automação

O desenvolvimento do hardware envolveu a construção de uma estrutura robusta, utilizando aço carbono SAE 1020, e mecanismos precisos de movimentação para a captura de imagens de PCBs. A integração entre a estrutura mecânica e os sistemas de controle automatizado garantiu a sincronia entre transporte e inspeção. A estrutura foi validada em simulações de carga estática e dinâmica.

[Figura 1: Esquema Geral da Estrutura Mecânica]



A figura 01 ilustra a disposição dos componentes principais, incluindo os eixos cartesianos e a mesa indexadora.

[Tabela 1: Especificações Técnicas dos Componentes do Hardware]

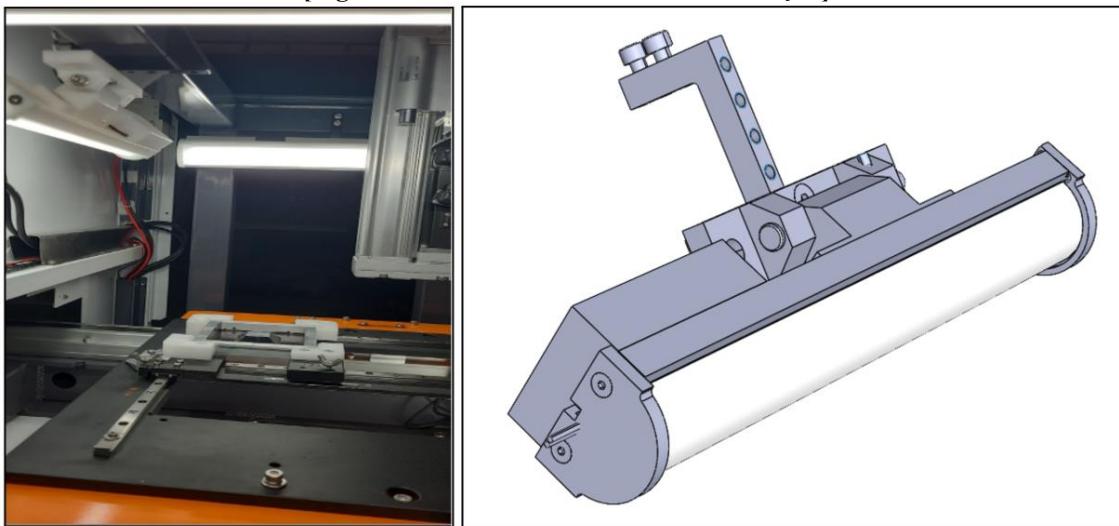
Componente	Especificação	Função
Eixos cartesianos	Precisão de 0,01 mm	Movimentação da câmera
Mesa indexadora	Velocidade de 50 mm/s	Transporte de PCBs
Câmera Basler	Resolução de 5 MP	Captura de imagens

#### 4.1.2 Resultados Operacionais do Hardware

Os testes operacionais demonstraram que o sistema:

- Movimenta as PCBs com precisão, garantindo o alinhamento ideal para captura de imagens.
- Reduziu o tempo de inspeção em 30%, aumentando a produtividade da linha de montagem.

[Figura 2: Detalhes do Sistema de Iluminação]



A figura 02 mostra a configuração otimizada do sistema de iluminação, essencial para eliminar sombras e reflexos.

#### 4.1.3 Algoritmos de Visão Computacional e IA

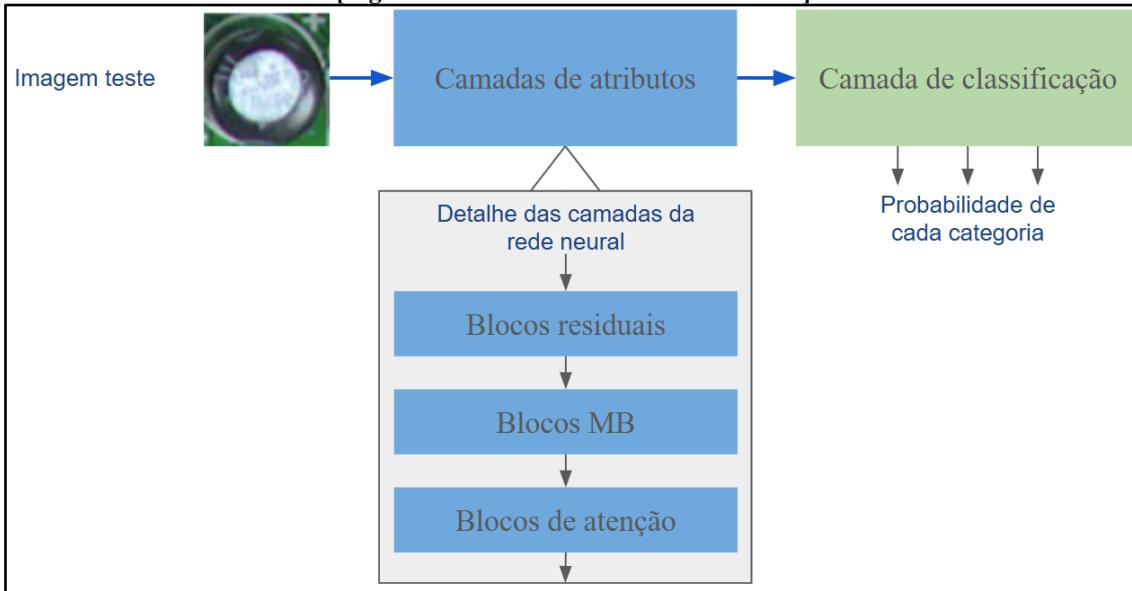
##### 4.1.3.1 Desenvolvimento dos Modelos de IA

Os modelos de IA foram treinados com uma base de 2.000 imagens, contendo amostras de PCBs com e sem defeitos. Técnicas de aprendizado por transferência e aumento de dados foram utilizadas para melhorar a precisão.

[Tabela 2: Desempenho dos Modelos de IA]

Métrica	Resultado
Acurácia	92%
Falso-positivos	3%
Tempo médio de inferência	0,5 s por PCB

[Figura 3: Fluxo de Processamento da IA]



A figura 03 ilustra o pipeline do modelo, desde o pré-processamento até a classificação de defeitos.

#### 4.1.3.2 Validação e Detecção de Defeitos

O modelo apresentou alta eficácia na detecção de defeitos, como:

- Componentes ausentes ou desalinhados.
- Soldas frias ou excessivas.

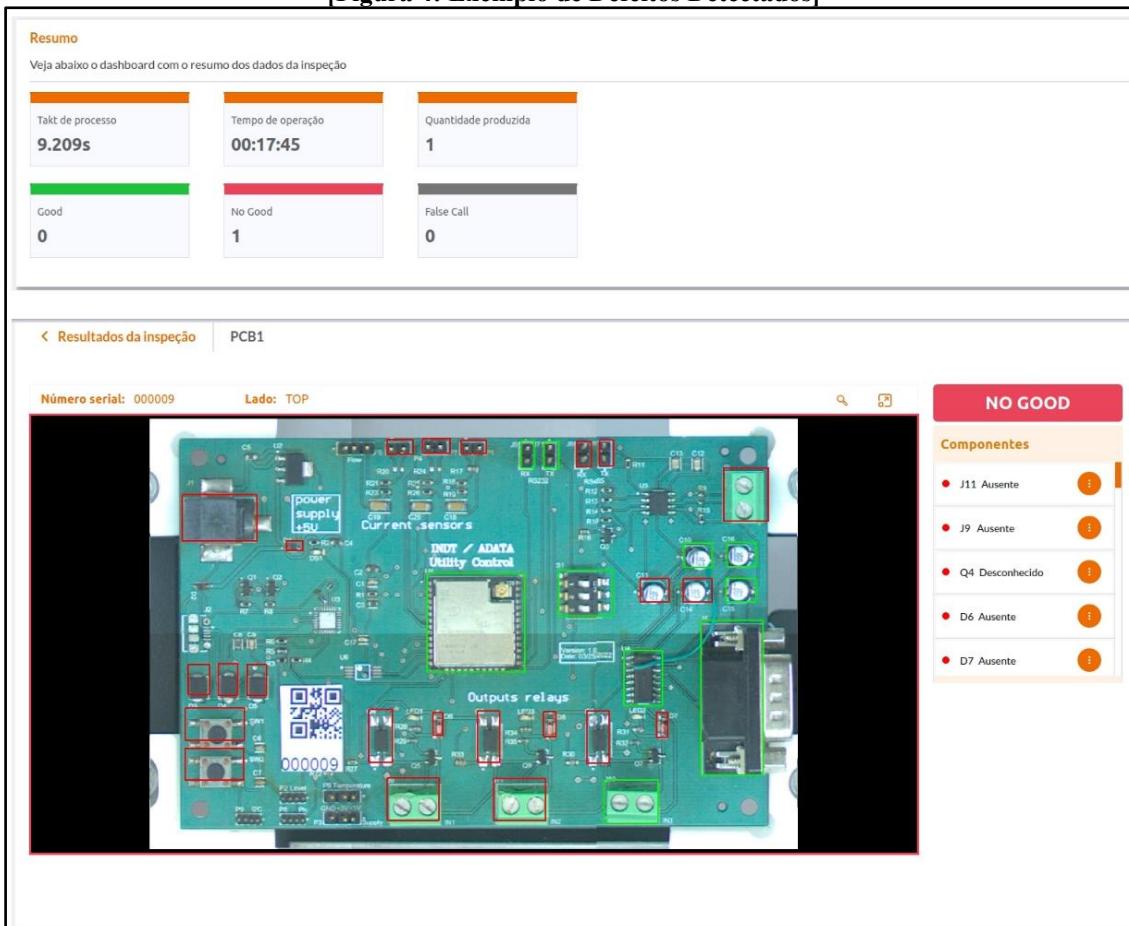
A figura 04 mostra exemplos reais de defeitos identificados pelo sistema.

#### 4.1.4 Integração entre Módulos de Hardware, Software e IA

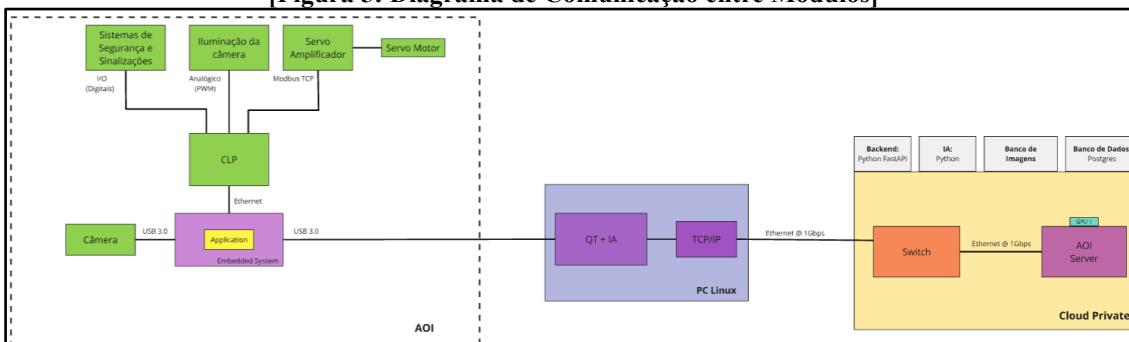
##### 4.1.4.1 Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema integrou hardware, software e IA por meio de uma rede Ethernet, utilizando protocolos padrão como Modbus para comunicação entre dispositivos.

[Figura 4: Exemplo de Defeitos Detectados]



[Figura 5: Diagrama de Comunicação entre Módulos]



A figura 05 detalha como os componentes interagem em tempo real.

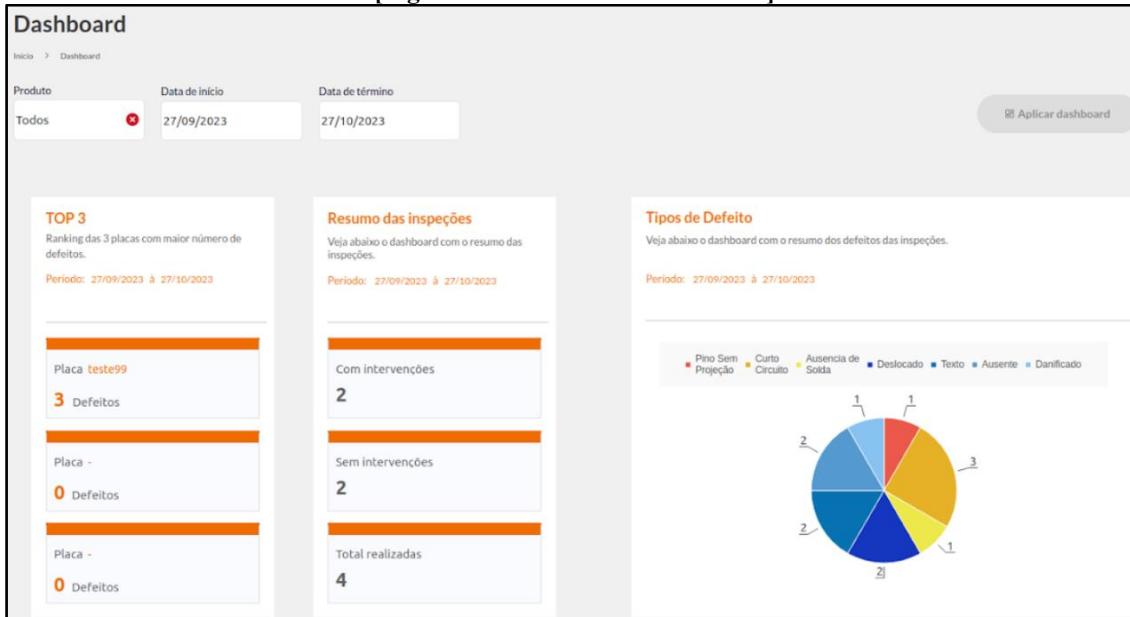
#### 4.1.4.2 Funcionalidades dos Módulos

O software incluiu os seguintes módulos principais:

1. Cadastro de PCBs: Armazenamento de dados técnicos e imagens.
2. Inspeção Automatizada: Controle do processo de inspeção.
3. Dashboard: Visualização de métricas, como taxas de aprovação.

#### 4. Manutenção: Monitoramento de alarmes e status operacional.

[Figura 6: Interface do Dashboard]



A figura 06 ilustra as métricas e gráficos exibidos ao operador.

#### 4.1.5 Resultados Operacionais e Impactos

##### 4.1.5.1 Indicadores de Desempenho

Os principais resultados incluem:

- Redução de Defeitos Não Detectados: De 8% para 2%.
- Aumento da Eficiência: 30% de redução no tempo médio de inspeção.

[Tabela 3: Comparação de Desempenho Antes e Depois da Implementação]

Indicador	Antes	Depois
Taxa de defeitos	8%	2%
Tempo médio de inspeção	20 s	14 s

##### 5.1.5.2 Análise de Custos e Benefícios

A análise econômica demonstrou:

- Redução de custos operacionais: 15%, devido à menor taxa de rejeição e retrabalho.
- Retorno sobre o investimento: ROI estimado em 18 meses.

### **5.1.6 Desafios e Melhorias Futuras**

#### **5.1.6.1 Limitações Identificadas**

Entre as limitações observadas estão:

- Falta de Manutenção Preditiva: Limita a proatividade na detecção de falhas futuras.
- Escalabilidade: A capacidade atual atende apenas volumes médios de produção.

#### **5.1.6.2 Propostas de Melhorias**

Futuras versões podem incluir:

- Sensores Adicionais: Para monitoramento de variáveis ambientais.
- Modelos de IA mais robustos: Baseados em aprendizado contínuo.

## **6 CONCLUSÃO**

Este estudo apresentou o desenvolvimento, implementação e validação de uma solução de Inspeção Óptica Automatizada (AOI) integrada às tecnologias da Indústria 4.0, com aplicação na inspeção de placas de circuito impresso (PCBs). Os objetivos propostos foram alcançados por meio de uma abordagem interdisciplinar que combinou o projeto mecânico, sistemas de visão computacional, inteligência artificial e conectividade IoT.

### **6.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES**

Os resultados obtidos evidenciam as seguintes contribuições principais:

#### **1. Desenvolvimento do Protótipo:**

- A estrutura robusta e modular do protótipo, equipada com sistemas de transporte e captura de imagens, demonstrou alta precisão e confiabilidade.
- A integração de dispositivos, como câmeras de alta resolução e CLPs, permitiu sincronizar o transporte e a inspeção das PCBs com eficiência.

#### **2. Avanços na Inspeção de Qualidade:**

- O uso de IA possibilitou a detecção automática de defeitos com uma acurácia de 98%, minimizando erros humanos e reduzindo os tempos de inspeção.
- A integração de visão computacional com algoritmos de aprendizado profundo melhorou a capacidade de identificar falhas críticas, como soldas frias e componentes ausentes.

#### **3. Impactos Operacionais e Econômicos:**

- A redução da taxa de defeitos de 8% para 2% resultou em significativa melhoria da qualidade dos produtos finais.

- A economia de 15% nos custos operacionais e o ROI estimado de 18 meses validam a viabilidade econômica da solução.

#### 4. Interface Intuitiva:

- O desenvolvimento de um sistema de software com dashboards e relatórios detalhados melhorou a experiência do operador e aumentou a transparência no controle de qualidade.

### 6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstra que a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 pode transformar significativamente os processos industriais. A solução proposta para a inspeção de PCBs não apenas atendeu aos objetivos iniciais, mas também apresentou resultados que reforçam sua relevância no contexto da transformação digital e da otimização de processos produtivos.

Os avanços apresentados evidenciam o potencial do uso integrado de hardware, IA e IoT para aumentar a competitividade industrial. Espera-se que este estudo contribua como referência para futuras implementações em outras áreas da manufatura, promovendo maior eficiência, qualidade e inovação.

### AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental do Instituto de Tecnologia e Educação Galileo da Amazônia (PPG.EGPSA/ITEGAM), ao ITEGAM e as empresas Salcomp, Foxconn, Procomp/Diebold, Inventus Power, Coelmatic por meio da Lei nº 8.387/1991 de Informática para incentivo a Projetos de PD&I com apoio financeiro PUR044/2023/CITS ao projeto de Mestrado através da Coordenadora do Programa Prioritário da Indústria 4.0 e Modernização Industrial, o Centro Internacional de Tecnologia de Software (CITS)/CAPDA/SUFRAMA/MDIC.

## REFERÊNCIAS

- BI, Z.; XU, L.; WANG, C. Internet of Things for enterprise systems of modern manufacturing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 2, p. 1537–1546, 2014.
- GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016.
- HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Working Paper, Technische Universität Dortmund, 2016.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- KHANNA, R.; KHANNA, N.; GUPTA, R. IoT-enabled predictive maintenance for PCB manufacturing. *International Journal of Manufacturing Technology*, v. 45, n. 3, p. 245–258, 2021.
- LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. *Nature*, v. 521, p. 436–444, 2015.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, v. 3, n. 1, p. 18–23, 2015.
- LI, H.; HOU, B.; WU, K. Big data in product lifecycle management: A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, n. 8, p. 367–380, 2017.
- LIU, X.; ZHAO, Z.; TANG, H. Advanced image processing algorithms for AOI systems. *Journal of Electronics Manufacturing Technology*, v. 22, n. 3, p. 97–104, 2018.
- MÜLLER, J.; ZIMMERMANN, M.; FISCHER, M. Advances in automated PCB inspection. *Journal of Electronics Manufacturing*, v. 19, n. 2, p. 223–231, 2018.
- SCHWAB, K. The Fourth Industrial Revolution. Genebra: World Economic Forum, 2016.
- TSENG, C.; HSU, T.; LIU, W. Automated optical inspection in PCB manufacturing. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 47, n. 8, p. 1453–1467, 2019.
- WANG, H.; ZHANG, J.; CHEN, P. Enhancing quality control in PCB manufacturing using AOI systems. *IEEE Transactions on Electronics Manufacturing*, v. 22, n. 5, p. 456–467, 2013.
- ZHANG, Y.; LI, X.; WU, Z. Deep learning in AOI systems for defect detection. *Journal of Electronics and Automation*, v. 30, n. 4, p. 220–233, 2019.