

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS  
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FERNANDA TAVARES PEREIRA

**PRODUÇÃO DE PLACAS ELETRÔNICAS: um estudo para redução de não  
conformidades**

MANAUS – AM

2026

**FERNANDA TAVARES PEREIRA**

**PRODUÇÃO DE PLACAS ELETRÔNICAS: um estudo para redução de não conformidades**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia de  
Produção da Escola Superior de Tecnologia  
da Universidade do Estado do Amazonas,  
como parte dos requisitos para a obtenção  
do grau de Bacharel em Engenharia de  
Produção

Orientador: Prof. Dr. Francisco Assis Barros  
de Oliveira.

MANAUS – AM

2026

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

P436p

Pereira, Fernanda Tavares

Produção de placas eletrônicas : um estudo para redução de não conformidades / Fernanda Tavares Pereira. Manaus : [s.n], 2026.  
51 f.: color.; 21.0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Produção- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2026.

Orientador: Oliveira, Francisco Assis Barros de.

1. Placa de circuito impresso. 2. Melhoria contínua. 3. Lean manufacturing. 4. Protótipos educacionais. I. Oliveira, Francisco Assis Barros de (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)658.5

**FERNANDA TAVARES PEREIRA**

**PRODUÇÃO DE PLACAS ELETRÔNICAS: um estudo para redução de não conformidades.**

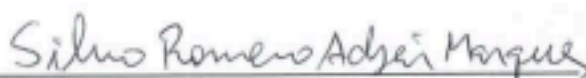
Trabalho apresentado ao curso de Engenharia de Produção da Universidade do Estado do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Data de aprovação: Manaus (AM), 23 de Junho de 2026.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Francisco Assis Barros de Oliveira,  
Universidade do Estado do Amazonas.



Prof. Me. Silvio Romero Adjar Marques,  
Universidade do Estado do Amazonas.



Prof. Me. Cleto Cavalcante de Souza Leal,  
Universidade do Estado do Amazonas.



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, que me deu forças para continuar até o fim e me sustentou nos momentos em que pensei que não conseguiria.

Agradeço à minha família, que mesmo de longe sempre esteve comigo, me apoiando, me dando forças e me incentivando a continuar. Em especial à minha mãe, Dinelza, e ao meu pai, Francisco, que muitas vezes deixaram de fazer por si pra poder fazer por mim.

Ao meu parceiro e companheiro de caminhada, Luan, que esteve ao meu lado durante todo esse processo, desde que entrei na faculdade, me aconselhando, me ajudando e enfrentando os desafios de mudar de cidade ao meu lado.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, Andreison, Beatriz, Beatrice, Katarina e Rodrigo que tornaram essa caminhada muito mais leve e possível, pois ter com quem contar em momentos difíceis é essencial nessa trajetória.

Agradeço aos meus professores do projeto, que me deram a primeira oportunidade de aprender e crescer. Em especial ao professor Rodrigo, pelos ensinamentos e pela confiança em meu trabalho. Além dos mentores Luiz e Camile, que são além de colegas de trabalho, são companheiros de jornada e de risadas. Agradecer também àqueles que passaram e permaneceram, Kaik, Celine e Nicolas, que trouxeram aprendizados necessários e se firmaram amigos.

E principalmente ao professor Francisco Assis e professora Rejane, meus orientadores, pela paciência, pela dedicação e por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa jornada e contribuíram para que eu chegasse até aqui. Sem todos, nada disso seria possível.

## RESUMO

A produção de placas de circuito impresso (PCIs) possui papel fundamental no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos utilizados em diferentes áreas, incluindo projetos educacionais voltados ao ensino de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM). Entretanto, processos de montagem realizados manualmente estão sujeitos à ocorrência de falhas que comprometem a qualidade final das placas e aumentam índices de retrabalho e desperdício. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo aplicar ferramentas da Engenharia de Produção para otimizar o processo de fabricação de PCIs utilizadas em protótipos eletrônicos educacionais produzidos em um laboratório *maker* vinculado a uma instituição pública de ensino superior do Amazonas. A pesquisa foi desenvolvida por meio de abordagem experimental e pesquisa-ação, utilizando ferramentas como PDCA, *Lean Manufacturing*, TPM e inspeções baseadas em critérios de qualidade da montagem eletrônica. Inicialmente, foram produzidas 200 placas, das quais 66 foram descartadas e 24 necessitaram de retrabalho. Após a implementação das melhorias, incluindo padronização operacional, ampliação das etapas de inspeção, aplicação de poka-yoke e padronização da soldagem, uma nova produção de 200 placas apresentou redução total do descarte e diminuição significativa do retrabalho, com apenas 6 placas retrabalhadas. Os resultados demonstraram aumento expressivo da eficiência produtiva e da qualidade das PCIs, evidenciando a contribuição das ferramentas da Engenharia de Produção para a melhoria contínua em processos de manufatura eletrônica de pequena escala.

**Palavras-chave:** Placas de circuito impresso; Melhoria contínua; *Lean Manufacturing*.

## **ABSTRACT**

*The production of printed circuit boards (PCBs) plays a fundamental role in the development of electronic devices used in different areas, including educational projects focused on science, technology, engineering and mathematics (STEM) teaching. However, manually performed assembly processes are subject to failures that compromise the final quality of the boards and increase rework and waste rates. In this context, this study aimed to apply Production Engineering tools to optimize the PCB manufacturing process used in educational electronic prototypes produced in a maker laboratory linked to a public higher education institution in the state of Amazonas, Brazil. The research was conducted through an experimental approach and action research, using tools such as PDCA, Lean Manufacturing, TPM and inspections based on electronic assembly quality criteria. Initially, 200 boards were produced, of which 66 were discarded and 24 required rework. After implementing the improvements, including operational standardization, expansion of inspection stages, application of poka-yoke devices and soldering standardization, a new production of 200 boards showed total elimination of discard and a significant reduction in rework, with only 6 boards requiring correction. The results demonstrated a significant increase in production efficiency and PCB quality, highlighting the contribution of Production Engineering tools to continuous improvement in small-scale electronic manufacturing processes.*

**Keywords:** Printed Circuit Boards; Continuous Improvement; Lean Manufacturing.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Visão geral do laboratório <i>maker</i> (Sala 1 e 2) .....    | 24 |
| Figura 2 – Bancadas de montagem e soldagem .....                         | 24 |
| Figura 3 – Processo atual de produção de PCI .....                       | 25 |
| Figura 4 – Processo de fresagem da placa .....                           | 26 |
| Figura 5 – Processo de soldagem manual .....                             | 26 |
| Figura 6 – Exemplo de solda fria .....                                   | 27 |
| Figura 7 – Exemplo de curto-circuito entre trilhas .....                 | 28 |
| Figura 8 – Exemplo de trilha incompleta .....                            | 28 |
| Figura 9 – Situação inicial da produção .....                            | 29 |
| Figura 10 – Diagrama de Ishikawa aplicado na produção de PCI .....       | 30 |
| Figura 11 – Ciclo PDCA aplicado ao processo .....                        | 31 |
| Figura 12 – Furo em PCI incompleto .....                                 | 32 |
| Figura 13 – Furo em PCI completo .....                                   | 32 |
| Figura 14 – Cronograma de manutenção para manutenção preventiva .....    | 33 |
| Figura 15 – Fresadoras CNC utilizadas no processo .....                  | 34 |
| Figura 16 – Dispositivo <i>poka-yoke</i> utilizado .....                 | 35 |
| Figura 17 – Exemplo de trilha correta (1) e trilha defeituosa (2) .....  | 35 |
| Figura 18 – Componentes eletrônicos com defeito visual .....             | 36 |
| Figura 19 – Materiais utilizados para soldagem .....                     | 37 |
| Figura 20 – Exemplo de solda correta conforme padrão IPC .....           | 37 |
| Figura 21 – Inspeção visual das soldas .....                             | 38 |
| Figura 22 – Teste funcional da PCI após montagem .....                   | 39 |
| Figura 23 – Fluxograma do processo pós-implementação das melhorias ..... | 40 |
| Figura 24 – Comparação entre descarte, retrabalho e aprovação .....      | 42 |
| Figura 25 – Resultados após melhorias .....                              | 43 |
| Figura 26 – Comparação antes e depois das melhorias .....                | 45 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Situação inicial da produção ..... | 41 |
| Tabela 2 – Situação pós-implementação .....   | 43 |
| Tabela 3 – Comparação dos resultados .....    | 44 |

## SUMÁRIO

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                            | <b>11</b> |
| 1.1 TEMA                                                                       | 11        |
| 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA                                                       | 12        |
| 1.3 OBJETIVOS                                                                  | 12        |
| 1.3.1 Objetivo geral                                                           | 12        |
| 1.3.2 Objetivos específicos                                                    | 12        |
| 1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA                                                    | 12        |
| 1.4.1 Método Experimental                                                      | 13        |
| 1.4.2 Pesquisa-Ação                                                            | 13        |
| 1.4.3 População e Amostra                                                      | 13        |
| 1.4.4 Instrumentos e Técnicas de Coleta de Dados                               | 14        |
| 1.4.5 Técnicas de Análise de Dados                                             | 14        |
| 1.4.6 Procedimentos para Realização da Pesquisa                                | 15        |
| 1.5 LIMITAÇÃO DO ESTUDO                                                        | 15        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                 | <b>17</b> |
| 2.1 ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS                           | 17        |
| 2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)                  | 18        |
| 2.3 QUALIDADE DA PRODUÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS                           | 19        |
| 2.4 FERRAMENTAS DE MELHORIA E SUSTENTABILIDADE                                 | 19        |
| 2.5 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM ELETRÔNICA                                         | 20        |
| 2.6 DEFEITOS EM SOLDAGEM: SOLDA FRIA E CURTO-CIRCUITOS                         | 20        |
| 2.7 NORMAS IPC E INSPEÇÃO DE SOLDAGEM                                          | 21        |
| <b>3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL</b>                                           | <b>23</b> |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO                                     | 23        |
| 3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL DE PRODUÇÃO DE PCI                             | 24        |
| 3.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS IDENTIFICADOS                                         | 26        |
| 3.3.1 Análise das causas de não conformidades por meio do diagrama de ishikawa |           |

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
|                                                     | 10        |
| <b>3.4 MELHORIAS IMPLEMENTADAS NO PROCESSO</b>      | <b>30</b> |
| 3.4.1 Inspeção na etapa de furação e destacamento   | 31        |
| 3.4.2 Implementação da TPM nas fresadoras CNC       | 32        |
| 3.4.3 Inspeção das trilhas condutoras com poka-yoke | 34        |
| 3.4.4 Inspeção dos componentes eletrônicos          | 35        |
| 3.4.5 Padronização dos processos de soldagem        | 36        |
| 3.4.6 Inspeção pós-soldagem                         | 38        |
| 3.4.7 Teste final e aprovação da PCI                | 38        |
| 3.5 PROCESSO FINAL PÓS IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS   | 39        |
| <b>4 RESULTADOS</b>                                 | <b>41</b> |
| 4.1 RESULTADOS ANTES DAS MELHORIAS                  | 41        |
| 4.2 RESULTADOS PÓS IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS       | 42        |
| 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS                       | 43        |
| 4.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS                         | 45        |
| <b>5 CONCLUSÃO</b>                                  | <b>48</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                  | <b>49</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria eletrônica ocupa papel estratégico no desenvolvimento tecnológico, fornecendo soluções que impactam áreas como comunicação, saúde, automação e educação. Nas últimas décadas, o crescimento do setor ampliou a presença de dispositivos eletrônicos em ambientes escolares, consolidando-se como recurso fundamental para a disseminação de conteúdos relacionados à ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM). Esse movimento acompanha a tendência global de associar inovação tecnológica a práticas educacionais, promovendo a inclusão digital e incentivando a formação técnica desde o ensino básico.

No Brasil, iniciativas voltadas à integração entre universidades, empresas e escolas públicas têm buscado reduzir desigualdades no acesso a tecnologias educacionais. Projetos desenvolvidos em laboratórios de prototipagem e espaços *maker* destacam-se como alternativas eficazes, permitindo a experimentação prática de conceitos científicos em sala de aula. Nesse contexto, a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), em parceria com uma empresa do setor tecnológico, vem desenvolvendo protótipos didáticos que são produzidos em larga escala e distribuídos a escolas do interior do Estado, ampliando as oportunidades de aprendizagem em municípios de difícil acesso.

O processo produtivo desses protótipos envolve etapas diversificadas, como a modelagem e impressão 3D de peças estruturais, a montagem de componentes eletrônicos e a integração final dos *kits*. Cada etapa do processo demanda atenção especial para assegurar a funcionalidade dos dispositivos, bem como o uso eficiente dos recursos humanos e materiais.

Diante desse cenário, a Engenharia de Produção assume relevância por oferecer métodos, ferramentas e práticas de gestão aplicáveis ao ambiente fabril e educacional. Assim, compreender a dinâmica do processo de fabricação desses protótipos torna-se fundamental para aprimorar a qualidade das entregas e consolidar os resultados do projeto.

### 1.1 TEMA

Redução de não conformidades na produção de placas eletrônicas.



## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

No processo de produção de placas de circuito impresso de protótipos eletrônicos destinados a escolas do interior do Amazonas, verificou-se um elevado índice de não conformidades. Essas não conformidades geram retrabalho, aumento de custos e descarte de materiais, comprometendo a eficiência das entregas do projeto. Sendo assim, como reduzir o índice de não conformidades na fabricação de PCI's destinadas ao uso educacional?

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

Reduzir o índice de não conformidades no processo de fabricação de placas eletrônicas destinadas ao uso educacional.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Mapear o processo produtivo de PCIs destinadas ao uso educacional;
- Investigar as causas das não conformidades detectadas no processo de fabricação de PCIs;
- Implementar ações corretivas para as não conformidades detectadas.

## 1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A classificação metodológica de uma pesquisa refere-se ao modo como ela aborda o problema, seus objetivos e os procedimentos adotados. Segundo Gil (2017), pesquisas aplicadas têm por finalidade gerar conhecimento para aplicação prática, voltado à solução de problemas específicos. Quanto à abordagem, uma pesquisa pode ter caráter qualitativo, quantitativo ou misto, dependendo da natureza dos dados coletados e analisados.

Neste trabalho, a pesquisa é aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa. Foram utilizadas duas estratégias metodológicas complementares: a experimentação, que permite testar intervenções em ambiente real com controle de variáveis (Miguel, 2012), e a pesquisa-ação, que envolve os participantes do processo na construção das soluções (Thiollent, 2011).

#### **1.4.1 Método Experimental**

O método experimental consiste em aplicar intervenções controladas a fim de avaliar seus efeitos sobre um fenômeno específico. Segundo Miguel (2012), esse método permite a manipulação de variáveis em ambiente real para verificar as consequências das mudanças introduzidas no processo. Em ambientes produtivos, a experimentação se torna útil para mensurar a eficiência de modificações operacionais.

No presente trabalho, o experimento foi conduzido dentro do laboratório *maker* presente na Universidade do Estado do Amazonas (UEA), onde os protótipos eletrônicos são montados em pequena escala. Foram trabalhadas variáveis independentes, como a padronização por meio de Procedimentos Operacionais Padronizados (POPs), melhorias no processo e reorganização física das bancadas. A variável dependente foi a taxa de placas rejeitadas por falhas de soldagem. Os dados foram coletados em ciclos semanais e analisados conforme orientação de Miguel (2012), que recomenda a comparação de indicadores antes e depois da intervenção.

#### **1.4.2 Pesquisa-Ação**

A pesquisa-ação é uma abordagem metodológica em que o pesquisador atua como participante ativo do processo em que deseja intervir, buscando compreender o fenômeno ao mesmo tempo em que promove melhorias práticas (Barbier, 2004).

No âmbito deste estudo, a pesquisa-ação foi aplicada junto aos alunos-mentores responsáveis pela produção das PCIs. Esses participantes atuaram em conjunto com o pesquisador no diagnóstico das falhas e na implementação das melhorias.

#### **1.4.3 População e Amostra**

A delimitação da população e da amostra é essencial para viabilizar a execução da pesquisa e definir o grupo de estudo. Segundo Gil (2017), a amostragem intencional é adequada quando o pesquisador seleciona participantes que apresentam relação direta com o objeto de estudo.

Nesta pesquisa, a população consiste nos operadores do processo de montagem de PCIs do projeto STEM Criar. A amostra foi composta por oito alunos-mentores que atuam diretamente nessa etapa produtiva. Esses participantes apresentaram níveis distintos de experiência, o que permitiu observar a influência da

padronização sobre a qualidade do resultado. No período do estudo, foram analisadas 400 placas produzidas.

#### **1.4.4 Instrumentos e Técnicas de Coleta de Dados**

Para Martins e Theóphilo (2009), os instrumentos de coleta têm a função de tornar os dados observáveis e registráveis por meio de formulários, protocolos ou dispositivos de anotação. Em pesquisas aplicadas com produção real, as fichas de verificação e planilhas de produção são fundamentais para garantir a rastreabilidade dos dados coletados.

Neste contexto, foram utilizados: (a) planilhas de produção com registro diário de tempo de montagem, número de placas concluídas e taxa de rejeição; (b) fichas de inspeção qualitativa baseadas na norma IPC-A-610; (c) registros fotográficos das falhas com posterior categorização; (d) diário de campo do pesquisador contendo observações sobre comportamento e dificuldades dos operadores. Esses instrumentos estão alinhados aos parâmetros de Bervian, Cervo e Silva (2007), que destacam a importância de instrumentos objetivos e sistemáticos para estudo em campo.

#### **1.4.5 Técnicas de Análise de Dados**

A análise dos dados envolve a interpretação sistemática das informações coletadas, podendo ser realizada por métodos estatísticos, comparativos ou interpretativos. Lakatos e Marconi (2019) reforçam que a estatística descritiva é apropriada para sintetizar dados quantitativos e possibilita verificar tendências e padrões. Ainda segundo Bardin (2016), a análise de conteúdo é indicada para tratar dados qualitativos obtidos por meio de observações e questionários.

Desse modo, os dados numéricos obtidos no experimento foram avaliados por meio de cálculo de médias, frequências de falhas e índices percentuais de retrabalho. Já os registros escritos e fotografias foram submetidos a uma análise de conteúdo categorial, conforme Bardin (2016), a fim de identificar padrões nas causas das falhas e reações dos operadores às melhorias implantadas. A triangulação das informações (Miguel, 2012) foi adotada para garantir maior confiabilidade na interpretação final.

#### 1.4.6 Procedimentos para Realização da Pesquisa

Segundo Oliveira (2010), os procedimentos metodológicos devem descrever de forma detalhada e cronológica como a pesquisa se desenvolverá. Em estudos de intervenção produtiva, é comum dividir a pesquisa em fases. Para Roesch (2007), essa divisão contribui para organizar os recursos e avaliar os avanços obtidos em cada etapa.

Partindo desse entendimento, o estudo foi executado em três fases principais no laboratório *maker* do projeto:

1. **Diagnóstico (mês 1):** observação da operação real, identificação das falhas mais recorrentes e aplicação de um primeiro diagnóstico.
2. **Implementação das melhorias (mês 2 a 3):** padronização das etapas por meio de Procedimentos Operacionais Padrão (POPs), reorganização do layout das bancadas com base nos princípios do *Lean Manufacturing*, implementação de inspeções intermediárias, aplicação de um dispositivo poka-yoke (dispositivo à prova de erros) para verificação da integridade das trilhas condutoras, definição da temperatura padrão de soldagem, substituição da liga de solda utilizada, ampliação das etapas de limpeza e implementação da Manutenção Produtiva Total (TPM – *Total Productive Maintenance*) nas fresadoras CNC (*Computer Numerical Control*), visando aumentar a confiabilidade dos equipamentos e reduzir falhas durante o processo de usinagem das placas.
3. **Avaliação e monitoramento (mês 4):** recolhimento dos novos dados de produção, comparação com a fase inicial e análise dos resultados.

Durante essas etapas, foi utilizado o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), conforme recomendado por Slack et al. (2010), como método para planejar as melhorias, implementá-las, verificar os resultados obtidos e padronizar as ações que se mostraram eficazes. Essa abordagem permitiu o acompanhamento contínuo das atividades, a identificação de oportunidades de melhoria, a realização de correções de rota e o registro das lições aprendidas ao longo da execução do projeto.

#### 1.5 LIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo foi realizado em um ambiente acadêmico de produção de placas de circuito impresso (PCIs), vinculado a um projeto educacional desenvolvido em parceria com uma empresa do setor tecnológico.

Dessa forma, os resultados obtidos estiveram condicionados às características específicas do ambiente analisado, incluindo a estrutura física disponível, os equipamentos utilizados e o perfil dos operadores envolvidos no processo produtivo.

A pesquisa concentrou-se especificamente na etapa de fabricação e montagem manual de placas eletrônicas do tipo PTH (*Plated Through Hole*), não abrangendo processos automatizados amplamente utilizados na indústria eletrônica, como linhas SMT (*Surface Mount Technology*), sistemas automáticos de inspeção óptica ou soldagem por refusão em larga escala. Além disso, as melhorias implementadas foram aplicadas em um contexto de produção laboratorial e educacional, com volume produtivo reduzido quando comparado a ambientes industriais de alta demanda.

Outra limitação observada esteve relacionada ao período de execução da pesquisa e ao tamanho da amostra analisada. O estudo considerou a produção de 400 placas divididas em duas etapas, antes e após a implementação das melhorias, o que restringiu análises estatísticas mais aprofundadas sobre variabilidade do processo e desempenho operacional em longo prazo. Somado a isso, as atividades produtivas foram executadas por alunos-mentores com diferentes níveis de experiência prática, podendo haver influência da curva de aprendizado sobre os resultados obtidos.

Também deve ser considerado que as melhorias foram implementadas simultaneamente ao longo do processo produtivo, incluindo mudanças relacionadas à inspeção, padronização da soldagem, controle visual e manutenção dos equipamentos. Dessa forma, embora tenha sido possível observar redução significativa das falhas e do retrabalho, não foi possível mensurar individualmente o impacto específico de cada intervenção aplicada.

Apesar dessas limitações, o trabalho apresentou contribuições relevantes ao demonstrar que a aplicação de ferramentas da Engenharia de Produção em processos de manufatura eletrônica manual pode promover ganhos significativos de qualidade, confiabilidade e redução de desperdícios, mesmo em ambientes de pequena escala e caráter educacional.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento e expor ideias já existentes sobre o tema, são fundamentados tópicos relacionados à área de estudo. Os temas abordados são: Engenharia de Produção e otimização de processos, processo de produção de placas de circuito impresso (PCIs), qualidade da produção de componentes eletrônicos, ferramentas de melhoria e sustentabilidade, normas IPC (IPC-A-600, IPC-A-610 e IPC J-STD-001), além de aspectos técnicos da soldagem eletrônica, como solda fria, curtos-circuitos e boas práticas de montagem e soldagem.

### 2.1 ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

Segundo Slack (2010), a Engenharia de Produção é uma área multidisciplinar que busca alinhar recursos humanos, tecnológicos e financeiros para promover a eficiência organizacional. De acordo com Slack, Chambers e Johnston (2010), seu papel vai além da gestão de operações, abrangendo desde o planejamento estratégico até a execução de processos produtivos, sempre com foco na melhoria da qualidade e redução de desperdícios. Isso a torna fundamental em setores de alta complexidade, como a indústria eletrônica, em que pequenas variações podem comprometer a confiabilidade de produtos.

A otimização de processos, um dos pilares da área, envolve a padronização de operações, a análise de tempos e métodos, e a eliminação de gargalos. Ferramentas como o ciclo PDCA e o Diagrama de Ishikawa auxiliam na identificação das causas raízes de falhas, permitindo ajustes rápidos e sustentáveis (Chiavenato, 2014).

Além disso, Tubino (2017) reforça que a integração de indicadores de desempenho (*KPIs*) ao processo produtivo possibilita um acompanhamento contínuo das melhorias implementadas. Em setores eletrônicos, esses indicadores incluem taxa de falhas, índice de retrabalho e tempo médio de reparo, fundamentais para assegurar competitividade frente à exigência crescente por produtos confiáveis e de baixo custo (Neely; Gregory; Platts, 1995).

Esses métodos fornecem a base conceitual para melhorias em setores complexos como a eletrônica, onde cada etapa produtiva exige precisão e confiabilidade. A seguir, será detalhado o processo de fabricação das placas de circuito impresso (PCIs), principal objeto de estudo deste trabalho.

## 2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

Segundo Gonçalves (2019), as placas de circuito impresso (PCIs) são a base estrutural e elétrica da maioria dos dispositivos eletrônicos modernos. O processo produtivo envolve múltiplas etapas, desde o design do layout eletrônico até a fabricação em escala. Ainda de acordo com o autor, a etapa de soldagem se destaca por ser crítica: defeitos como soldas frias, excesso ou falta de estanho, mau posicionamento e curtos-circuitos comprometem a funcionalidade e a confiabilidade da placa. Tais falhas resultam em retrabalho, descarte de materiais e atrasos nos prazos de entrega, elevando custos e reduzindo a eficiência operacional.

A complexidade desse processo exige elevado rigor técnico. Um único erro no design das trilhas pode inviabilizar toda a produção. Além disso, a montagem eletrônica inclui diferentes tecnologias, como *through-hole technology* (THT), também conhecida como processo PTH (*Plated Through Hole*), e *surface-mount technology* (SMT), que requerem precisão no posicionamento e soldagem dos componentes (PRASAD, 2003). O processo PTH, utilizado neste trabalho, caracteriza-se pela inserção dos terminais dos componentes em furos metalizados da PCI, seguida da soldagem manual ou automatizada. Essa tecnologia é amplamente utilizada em protótipos e aplicações que exigem maior resistência mecânica e facilidade de manutenção, sendo comum em ambientes educacionais e de prototipagem eletrônica (IPC, 2020).

De acordo com a IPC J-STD-001 (2020), o processo PTH exige rigoroso controle da integridade dos furos, preenchimento adequado da solda e correta molhabilidade do estanho, pois falhas nessas etapas podem comprometer a condução elétrica e a fixação mecânica dos componentes. Além disso, defeitos como solda fria, insuficiência de preenchimento e excesso de solda estão entre as principais causas de falha em montagens PTH.

Por fim, a qualidade da PCI depende não apenas do design, mas também da escolha adequada dos materiais e do controle de processos produtivos. Estudos apontam que falhas em substratos, como delaminação ou má adesão do cobre, podem comprometer toda a funcionalidade do dispositivo (HERRERA; PEREIRA, 2019).

Dessa forma, a fabricação de PCIs demanda controle rigoroso em todas as etapas do processo, reforçando a importância de práticas de qualidade voltadas especificamente à montagem eletrônica.

## 2.3 QUALIDADE DA PRODUÇÃO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Segundo a IPC-A-610 (2020) o controle de qualidade em eletrônicos é uma das áreas mais críticas da manufatura, visto que pequenas falhas podem gerar consequências catastróficas em setores como telecomunicações, automotivo e saúde. Segundo os autores, a aceitabilidade das montagens eletrônicas deve ser avaliada por critérios rigorosos, incluindo integridade da soldagem, posicionamento dos componentes e conformidade com requisitos normativos.

Gonçalves (2019) ressalta que a inspeção óptica automatizada (AOI) permite identificar curtos-circuitos, soldas insuficientes ou excesso de estanho com precisão superior à humana, reduzindo a subjetividade. Além disso, a inspeção por raio-X tem se tornado fundamental para verificar defeitos internos em juntas de solda ocultas sob componentes Ball Grid Array (BGA).

Rosales Rodríguez (2021) destaca a importância da rastreabilidade nos processos eletrônicos. Sistemas integrados de gestão permitem identificar em qual lote ou etapa ocorreu uma falha, facilitando ações corretivas.

Com isso, surge a necessidade de explorar ferramentas complementares de Engenharia de Produção que assegurem não apenas qualidade, mas também sustentabilidade e eficiência.

## 2.4 FERRAMENTAS DE MELHORIA E SUSTENTABILIDADE

No contexto da produção eletrônica, ferramentas clássicas da Engenharia de Produção têm sido adaptadas para garantir eficiência e sustentabilidade. O Lean Manufacturing, desenvolvido inicialmente no Sistema Toyota de Produção, busca eliminar desperdícios em todas as etapas produtivas (OHNO, 1997). Aplicado à montagem de PCIs, o Lean contribui para reduzir retrabalhos, movimentações desnecessárias e estoques excessivos.

Outro método amplamente utilizado é o FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), que permite mapear potenciais falhas, priorizando-as segundo criticidade e frequência (Stamatis, 2003). Por exemplo, falhas como curtos-circuitos em trilhas e mau posicionamento de componentes podem ser classificadas com alto risco, exigindo ações preventivas imediatas. Complementarmente, a TPM (*Total Productive Maintenance*) reforça a confiabilidade de equipamentos ao prever manutenções periódicas e calibrações (Nakajima, 1989).



De acordo com Severo, Guimarães e Dorion (2017), no campo da sustentabilidade, práticas como o 5S e a economia circular auxiliam na redução do desperdício de componentes e na organização do ambiente produtivo.

Essas ferramentas se tornam especialmente relevantes quando relacionadas diretamente aos problemas de soldagem, tema do próximo tópico.

## 2.5 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM ELETRÔNICA

A soldagem eletrônica é o processo de união permanente entre componentes e a PCI, assegurando condução elétrica e fixação mecânica. Tradicionalmente, utiliza-se a soldagem manual com ferro de solda, mas outras técnicas, como soldagem por onda (*wave soldering*) e por refluxo (*reflow soldering*), são largamente empregadas em escala industrial (MARTINS; OLIVEIRA, 2020). Cada método apresenta vantagens específicas: a soldagem manual é flexível para protótipos e reparos, enquanto o *reflow* é essencial para componentes SMD em larga produção.

Com a implementação da Diretiva RoHS (*Restriction of Hazardous Substances*), houve uma transição das ligas tradicionais de estanho-chumbo (Sn-Pb) para ligas livres de chumbo, devido aos efeitos tóxicos desse metal à saúde humana e ao meio ambiente (EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2003). Segundo Hwang (2012), embora ambientalmente mais seguras, essas ligas exigem temperaturas de soldagem mais elevadas, aumentando desafios como a redução da molhabilidade e a formação de trincas. Assim, a escolha da liga de solda é um fator determinante para a qualidade e a confiabilidade das montagens eletrônicas.

Outro fator crítico é o controle da temperatura durante a soldagem. Conforme descrito por Prasad (2003), temperaturas excessivas podem danificar componentes sensíveis, enquanto temperaturas insuficientes comprometem a molhabilidade da solda, favorecendo a ocorrência de soldas frias e baixa adesão.

Como será detalhado a seguir, falhas nesse processo resultam em defeitos específicos, que impactam diretamente a confiabilidade do produto final.

## 2.6 DEFEITOS EM SOLDAGEM: SOLDA FRIA E CURTO-CIRCUITOS

Os defeitos de soldagem estão entre as principais causas de falhas em dispositivos eletrônicos. A solda fria, caracterizada por má aderência entre componente e trilha devido à baixa temperatura ou movimentação durante o

resfriamento, é uma falha recorrente em processos manuais (IPC, 2020). Esse defeito pode gerar resistências elevadas e até falhas intermitentes, de difícil diagnóstico.

Além da solda fria, outros problemas comuns incluem a falta de molhagem, resultante de superfícies contaminadas ou oxidadas; o excesso de solda, que pode causar curtos-circuitos; e a formação de bolhas (*voids*), geralmente decorrente de fluxos inadequados. Casos relatados por Hwang (2012) mostram que *voids* excessivos podem reduzir a dissipação térmica em componentes de potência, levando à queima prematura.

Estudos de casos reais ilustram o impacto desses defeitos. Segundo uma análise feita por Gonçalves (2019) em uma linha de produção de placas automotivas, foi perceptível que 65% das falhas estavam associadas à soldagem, sendo a maioria relacionada a curtos entre pinos de microcontroladores.

A identificação precoce desses defeitos é essencial para reduzir retrabalho e desperdício, o que reforça a importância das técnicas de inspeção.

## 2.7 NORMAS IPC E INSPEÇÃO DE SOLDAGEM

As normas IPC são referência mundial em aceitabilidade e padronização de processos de montagem eletrônica. A mais utilizada é a IPC-A-610, que estabelece critérios para inspeção de montagens, soldagem e posicionamento de componentes (IPC, 2020). Contudo, outras normas também são fundamentais: a IPC-A-600 define critérios para placas nuas, avaliando parâmetros como delaminações e furos metalizados; já a IPC J-STD-001 estabelece requisitos de soldagem para diferentes classes de produtos, do uso comercial ao militar. (IPC, 2020).

Segundo Hall (2016), empresas certificadas IPC conseguem reduzir taxas de retrabalho em até 30%, devido ao maior alinhamento entre projetistas, operadores e inspetores. Além disso, treinamentos oficiais IPC habilitam profissionais para interpretar corretamente defeitos e aceitabilidade, reduzindo a subjetividade nas inspeções visuais.

Em termos de técnicas de inspeção, a evolução tecnológica ampliou as ferramentas disponíveis. Além da inspeção visual tradicional, métodos como a Inspeção Óptica Automatizada (*AOI – Automated Optical Inspection*), que utiliza câmeras e algoritmos para identificar automaticamente defeitos como ausência, inversão e desalinhamento de componentes, soldas inadequadas e curtos-circuitos,

além de inspeção por raio X e tomografia computadorizada, têm sido utilizados para aumentar a confiabilidade do processo (GONÇALVES, 2019).

A adoção dessas normas e técnicas promove maior consistência e reduz variabilidades, consolidando a integração entre qualidade, padronização e desempenho produtivo.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO ATUAL

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO

A produção das placas de circuito impresso (PCIs) analisadas neste estudo é realizada em um laboratório *maker* vinculado a uma instituição pública de ensino superior localizada em Manaus (AM), em parceria com uma empresa do setor tecnológico. O ambiente é utilizado para o desenvolvimento e fabricação de kits educacionais destinados a escolas públicas do interior do Amazonas, com foco em atividades voltadas ao ensino de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM).

O processo produtivo envolve a participação de alunos-mentores responsáveis pela montagem dos protótipos eletrônicos, desde as etapas iniciais de fabricação das placas até a soldagem final dos componentes. A produção ocorre em pequena escala, porém com elevado volume de placas ao longo das atividades do projeto, exigindo controle de qualidade, organização do fluxo produtivo e padronização das operações.

Apesar da estrutura laboratorial possuir equipamentos de fabricação digital e ferramentas de apoio à produção, parte significativa do processo é executada manualmente, principalmente nas etapas de montagem e soldagem dos componentes eletrônicos. Dessa forma, o processo está sujeito à ocorrência de falhas operacionais, retrabalho e desperdícios, tornando necessária a aplicação de ferramentas da Engenharia de Produção para melhoria contínua e otimização das atividades.

A estrutura física utilizada para a produção das placas pode ser observada na Figura 1; a Figura 2 apresenta a bancada utilizada nas atividades de montagem e soldagem dos componentes eletrônicos.



da PCI. Nessa fase são executadas as perfurações destinadas à inserção dos componentes eletrônicos, além do recorte preliminar do formato da placa.

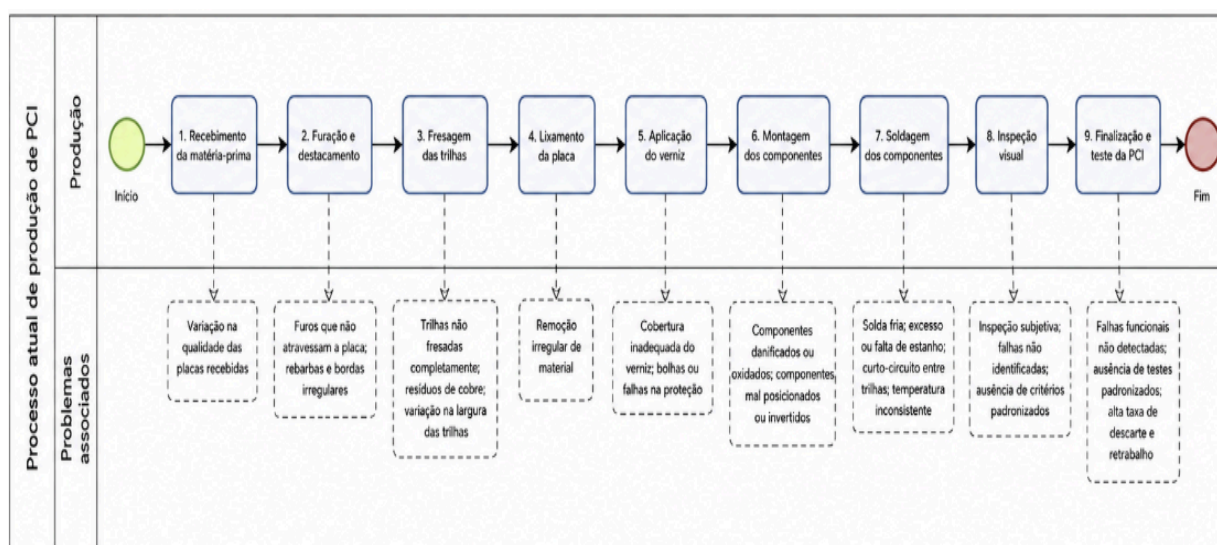
Em seguida, a placa é direcionada para uma segunda fresadora CNC, onde ocorre a usinagem das trilhas condutoras. Essa operação remove o excesso de cobre da superfície, formando as conexões elétricas responsáveis pela interligação dos componentes do circuito eletrônico.

Após a fresagem das trilhas, a PCI passa pelo processo de acabamento superficial. Inicialmente, realiza-se o lixamento da placa para remoção de resíduos e imperfeições provenientes da usinagem. Posteriormente, aplica-se uma camada de verniz protetivo com a finalidade de minimizar processos de oxidação e aumentar a durabilidade das trilhas.

Finalizada a preparação da placa, inicia-se a etapa de montagem dos componentes eletrônicos, realizada manualmente pelos alunos-mentores. Em seguida, ocorre a soldagem dos componentes, etapa considerada crítica devido à elevada interferência humana e à necessidade de precisão na formação das conexões elétricas.

Por fim, a placa passa por uma inspeção visual inicial antes de seguir para utilização nos protótipos eletrônicos do projeto. O fluxo completo do processo produtivo antes da implementação das melhorias é apresentado na Figura 3.

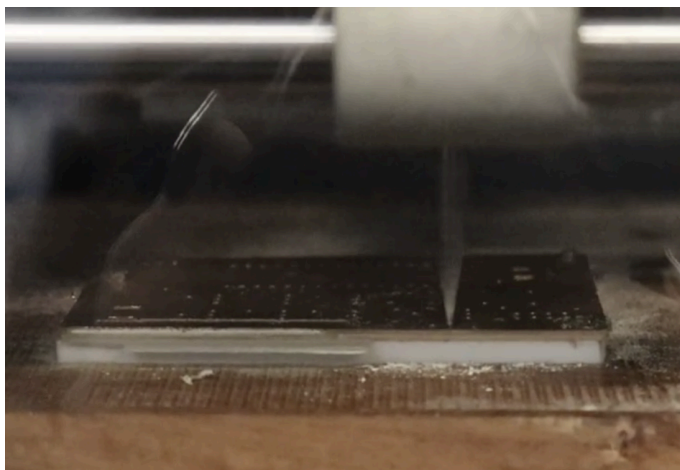
Figura 3 – Processo atual de produção de PCI



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A Figura 4 ilustra a etapa de fresagem utilizada para a fabricação das trilhas e da geometria da PCI.

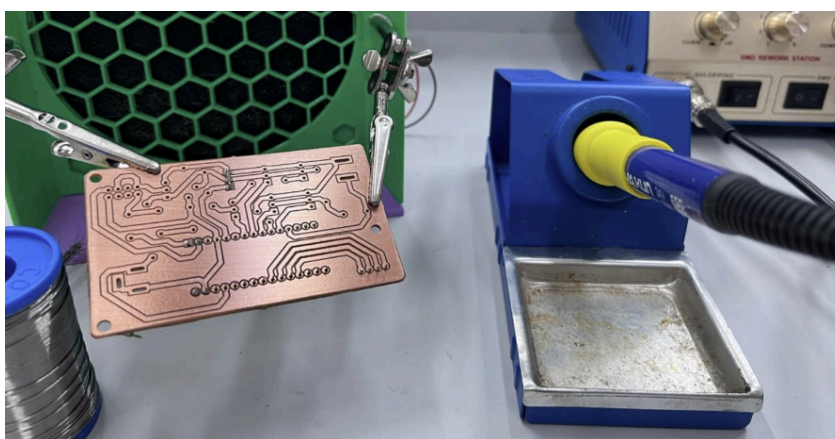
Figura 4 – Processo de fresagem da placa



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A etapa de soldagem manual, considerada uma das mais críticas do processo, é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Processo de soldagem manual



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.3 PRINCIPAIS PROBLEMAS IDENTIFICADOS

Durante o acompanhamento do processo produtivo, foram identificadas falhas recorrentes principalmente na etapa de soldagem manual das placas de circuito impresso. Entre os principais problemas observados destacam-se a ocorrência de



soldas frias, excesso ou insuficiência de estanho e formação de curtos-circuitos entre trilhas próximas.

Também foram identificadas falhas provenientes das etapas anteriores à soldagem, como furos incompletos na placa, trilhas parcialmente fresadas e componentes eletrônicos com defeitos visuais não detectados previamente. Esses problemas impactavam diretamente na qualidade final das placas produzidas.

As falhas identificadas geravam elevados índices de retrabalho e descarte de PCIs, aumentando o consumo de componentes eletrônicos, estanho e tempo de produção. Além disso, observou-se ausência de etapas padronizadas de inspeção e inexistência de critérios formais para verificação da integridade das placas ao longo do processo.

Com base nesses problemas, tornou-se necessária a implementação de melhorias voltadas à padronização das atividades, implementação de mais etapas de inspeção e redução das falhas operacionais. Um exemplo de solda fria identificada durante o processo produtivo pode ser observado na Figura 6, já a Figura 7 apresenta exemplos de curtos-circuitos encontrados entre trilhas adjacentes.

Figura 6 – Exemplo de solda fria

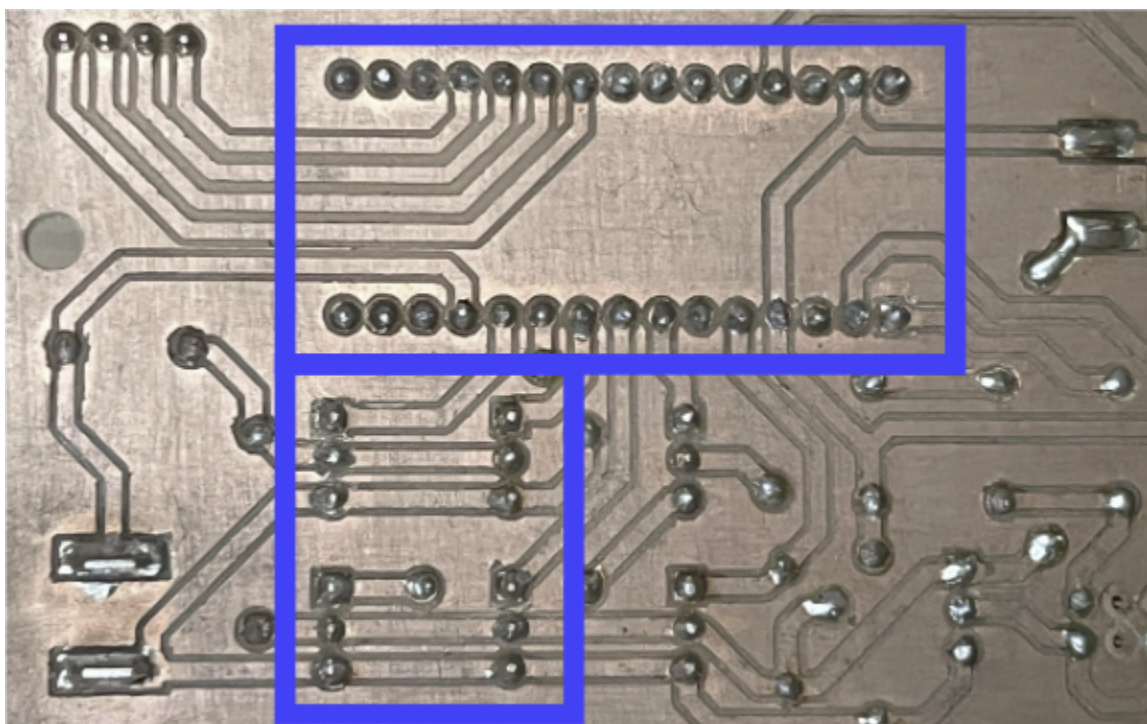




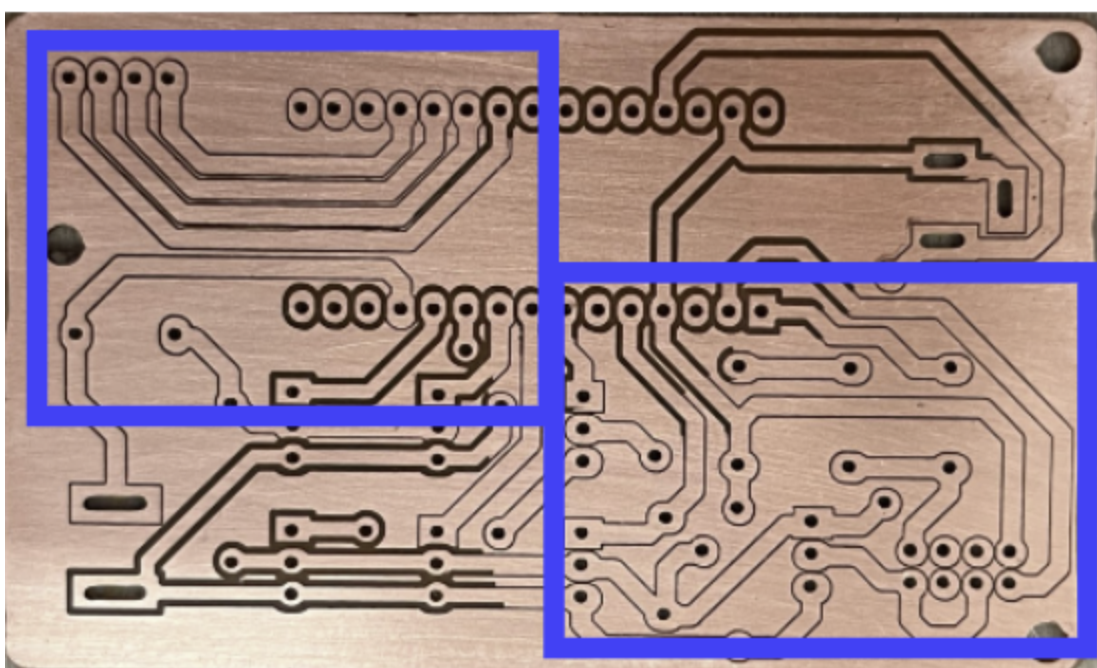
Figura 7 – Exemplo de curto-circuito entre trilhas



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A Figura 8 apresenta uma falha de fresagem que resultou em trilhas incompletas, o que dificulta o processo de soldagem da PCI.

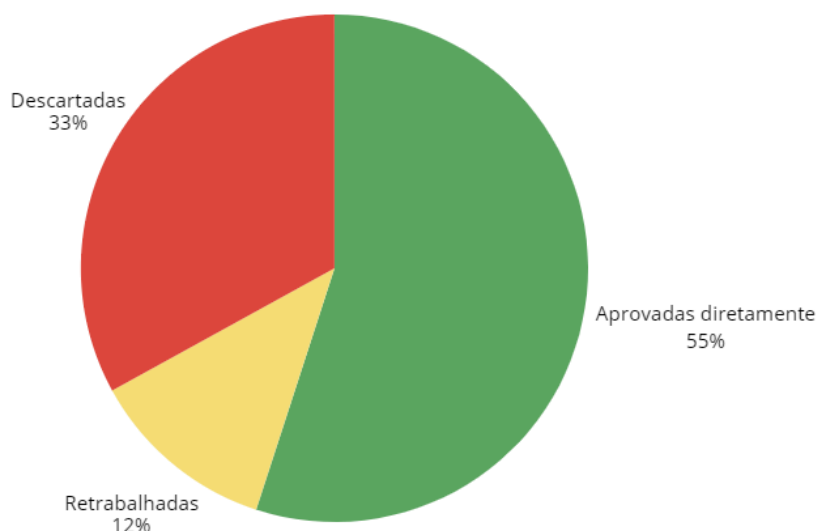
Figura 8 – Exemplo de trilha incompleta



Fonte: elaborado pela autora (2026).

A distribuição dos resultados obtidos antes da implementação das melhorias é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Situação inicial da produção



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.3.1 Análise das causas de não conformidades por meio do diagrama de ishikawa

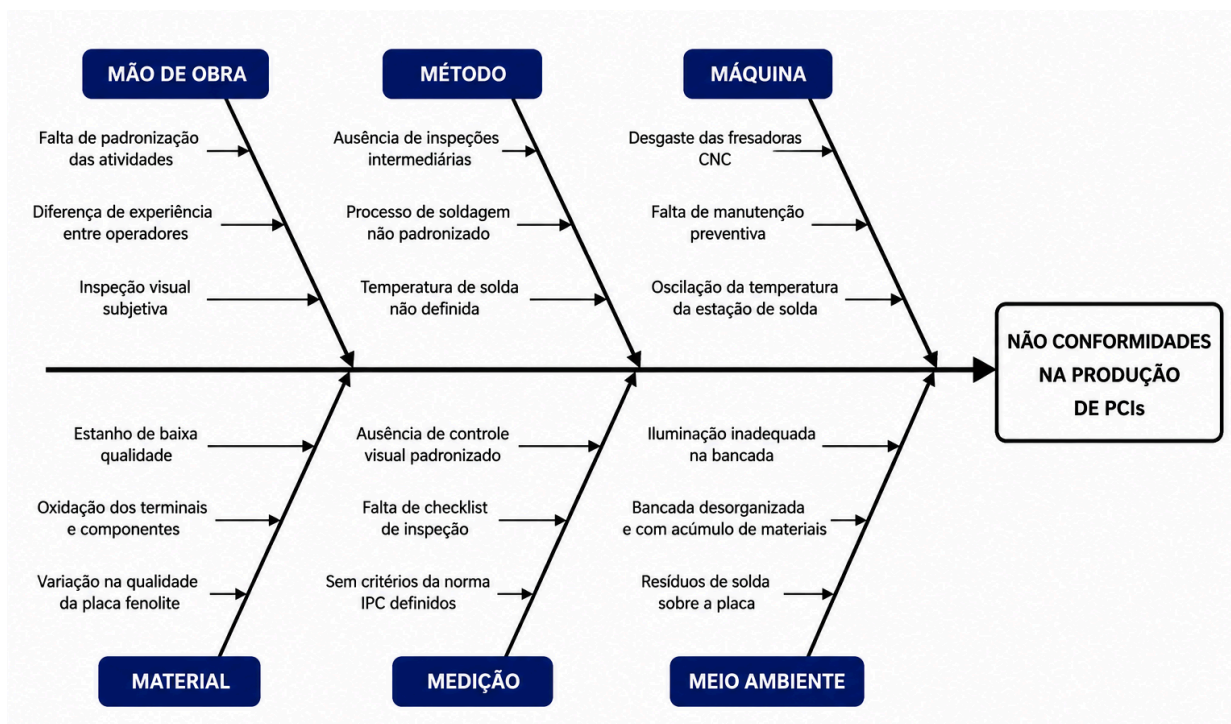
Durante a etapa inicial de diagnóstico do processo produtivo, foi utilizado o Diagrama de Ishikawa como ferramenta de análise das possíveis causas associadas às não conformidades identificadas na fabricação das placas de circuito impresso. A ferramenta foi aplicada com o objetivo de organizar e categorizar os fatores que contribuíam para a ocorrência de falhas recorrentes, como soldas frias, curtos-circuitos, falhas de fresagem e retrabalho.

A construção do diagrama permitiu identificar causas relacionadas aos principais grupos que influenciavam o processo produtivo, incluindo mão de obra, método, máquina, material, medição e meio ambiente. Entre os fatores observados destacaram-se a ausência de padronização da soldagem, utilização de liga de solda inadequada, falhas na inspeção visual, desgaste das fresadoras CNC, ausência de controle da temperatura da estação de solda e inexistência de inspeções intermediárias ao longo da produção.

A aplicação do Diagrama de Ishikawa contribuiu para direcionar as ações corretivas implementadas posteriormente no ciclo PDCA, auxiliando na definição das melhorias relacionadas à inspeção, padronização operacional, manutenção preventiva e controle da qualidade do processo produtivo.

O Diagrama de Ishikawa construído para análise das causas das não conformidades é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Ishikawa aplicado na produção de PCI



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.4 MELHORIAS IMPLEMENTADAS NO PROCESSO

Com o objetivo de reduzir os índices de falhas, retrabalho e desperdício observados na produção das placas de circuito impresso, foram implementadas melhorias baseadas nos princípios do ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), priorizando ações de inspeção, padronização e controle de qualidade.

As melhorias foram aplicadas ao longo das principais etapas do processo produtivo, buscando aumentar a confiabilidade das operações e reduzir falhas acumuladas entre as etapas de fabricação.

As etapas do ciclo PDCA utilizadas para conduzir as melhorias implementadas estão representadas na Figura 11.

Figura 11 – Ciclo PDCA aplicado ao processo



Fonte: elaborado pela autora (2026).

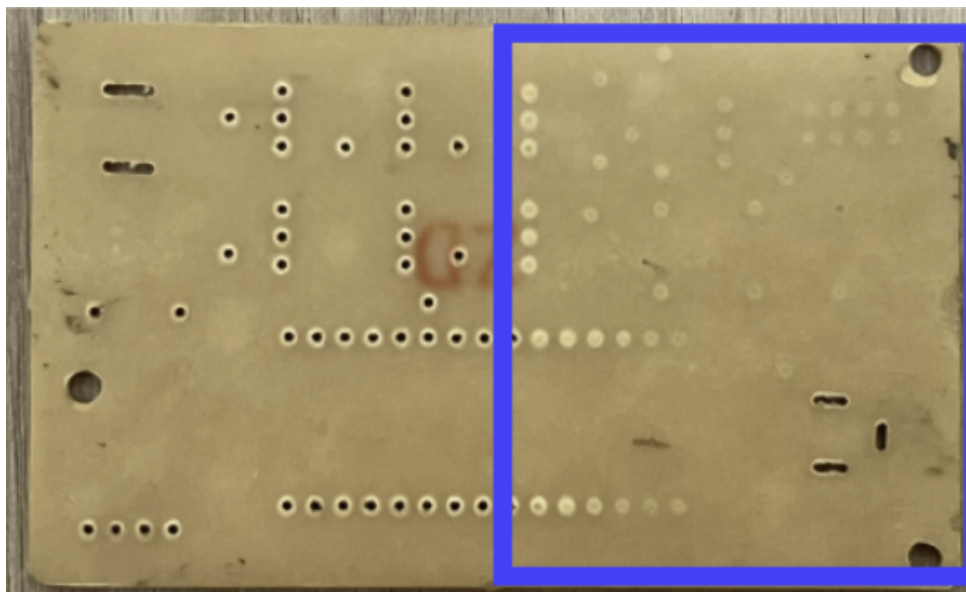
### 3.4.1 Inspeção na etapa de furação e destacamento

Na etapa de furação e destacamento da placa, foi implementada uma inspeção visual para verificar se os furos realizados pela fresadora CNC atravessavam completamente a PCI. Antes da melhoria, furos incompletos dificultavam a inserção dos componentes eletrônicos, gerando retrabalho nas etapas posteriores.

A nova etapa de inspeção permitiu identificar falhas logo após o processo de usinagem, evitando o avanço de placas defeituosas para as próximas fases da produção. A Figura 12 apresenta um exemplo de furo incompleto identificado durante a etapa de furação. Na Figura 13 pode-se analisar a condição considerada adequada para aprovação da etapa de furação.

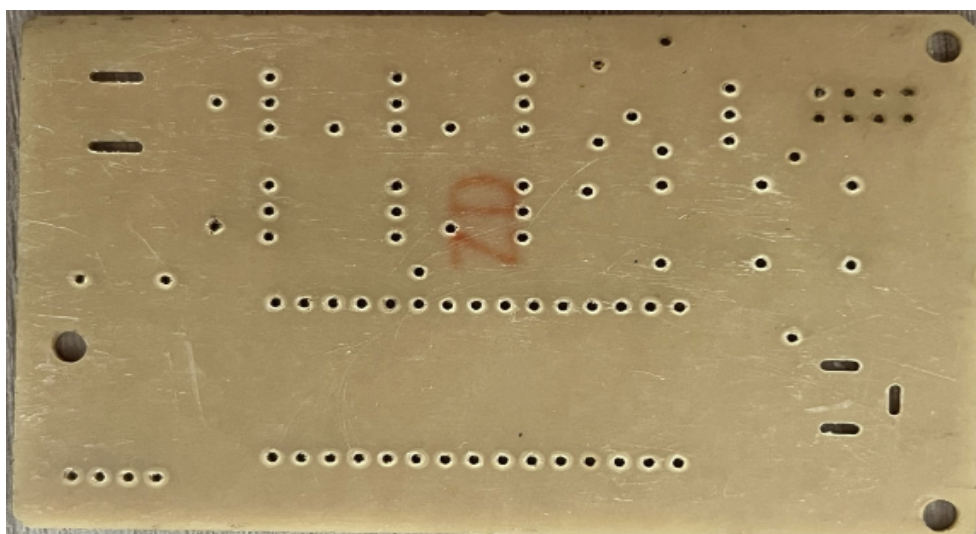


Figura 12 – Furo em PCI Incompleto.



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 13 – Furo em PCI Completo.



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.4.2 Implementação da TPM nas fresadoras CNC

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade operacional das fresadoras CNC utilizadas na fabricação das placas de circuito impresso, foram implementadas práticas baseadas nos princípios da Manutenção Produtiva Total (TPM). A aplicação da TPM teve como foco principal a redução de falhas operacionais, melhoria da disponibilidade dos equipamentos e aumento da estabilidade do processo produtivo.

Inicialmente, foram realizadas ações de manutenção preventivas periódicas nas fresadoras CNC, envolvendo limpeza dos equipamentos, verificação do desgaste das brocas e fresas, conferência do alinhamento mecânico e inspeção das

conexões elétricas. Além disso, os operadores passaram a executar atividades básicas de manutenção autônoma, como limpeza diária e verificação visual das condições de funcionamento dos equipamentos.

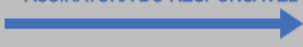
A implementação da TPM contribuiu para a redução de falhas durante os processos de furação e fresagem das trilhas, minimizando problemas como furos incompletos, desalinhamentos e interrupções de trilhas causadas pelo desgaste das ferramentas.

A adoção dessas práticas permitiu maior estabilidade operacional das máquinas e melhor padronização das etapas de usinagem das PCIs. O cronograma de manutenção preventiva desenvolvido para as fresadoras CNC é apresentado na Figura 14, equipamentos utilizados no processo de fabricação das placas podem ser observados na Figura 15.

Figura 14 – Cronograma de manutenção para manutenção preventiva



## CRONOGRAMA DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

|                                                                                                                  |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| Equipamento:                                                                                                     |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Equipamento / Máquina:                                                                                           |                          | Fresadoras CNC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| PLANO                                                                                                            |                          | CRONOGRAMA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Itens a serem verificados                                                                                        | Períodicidade/Freqüência | Mês:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | Ano: 2025 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|                                                                                                                  |                          | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16        | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |  |
| Limpeza Externa/Interna                                                                                          | Diário                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Lub. de Eixos                                                                                                    | Semanal                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Calibração de Mesa                                                                                               | Semanal                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Nivelamento de Leito                                                                                             | Mensal                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| ASSINATURA DO RESPONSÁVEL<br> |                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
| Observação:                                                                                                      |                          | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <b>Legenda:</b><br/>           A - Atrasado / RP - Reprogramado<br/> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 5px;"> <span style="background-color: red; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Diário           <span style="background-color: yellow; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Semanal           <span style="background-color: green; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Quinzenal           <span style="background-color: blue; width: 15px; height: 15px; display: inline-block;"></span> Mensal         </div> </div> |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |           |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |

Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 15 – Fresadoras CNC utilizadas no processo



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.4.3 Inspeção das trilhas condutoras com *poka-yoke*

Na etapa de fresagem das trilhas condutoras, foi implementada uma inspeção da integridade das trilhas com auxílio de um dispositivo *poka-yoke*. O objetivo da melhoria foi garantir que todas as trilhas fossem completamente fresadas, evitando a permanência de resíduos de cobre capazes de provocar curtos-circuitos.

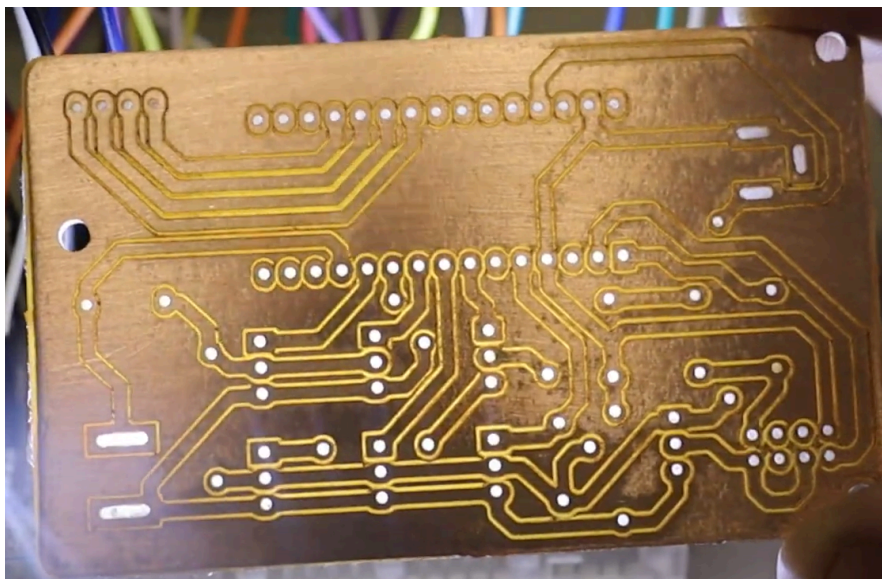
A utilização do *poka-yoke* permitiu aumentar a confiabilidade da inspeção e reduzir falhas decorrentes da avaliação exclusivamente visual. O dispositivo foi desenvolvido de forma simples e de baixo custo, utilizando uma protoboard, LEDs de alto brilho, resistores e uma bateria portátil. O sistema funciona como uma fonte de iluminação direcionada, posicionada sob a placa de circuito impresso, permitindo a visualização do atravessamento completo das trilhas e dos furos realizados durante a usinagem.

Com a incidência direta da luz através da PCI, tornou-se possível identificar com maior precisão falhas de fresagem, obstruções nos furos e regiões onde o cobre não havia sido completamente removido. A solução contribuiu para agilizar a inspeção, aumentar a padronização da análise e reduzir significativamente a ocorrência de defeitos que anteriormente só eram identificados nas etapas finais de soldagem e teste da placa.

A utilização do dispositivo *poka-yoke* desenvolvido para auxiliar a inspeção das trilhas e furos é apresentado na Figura 16. A Figura 17 compara uma trilha considerada conforme com uma trilha defeituosa identificada durante a inspeção.

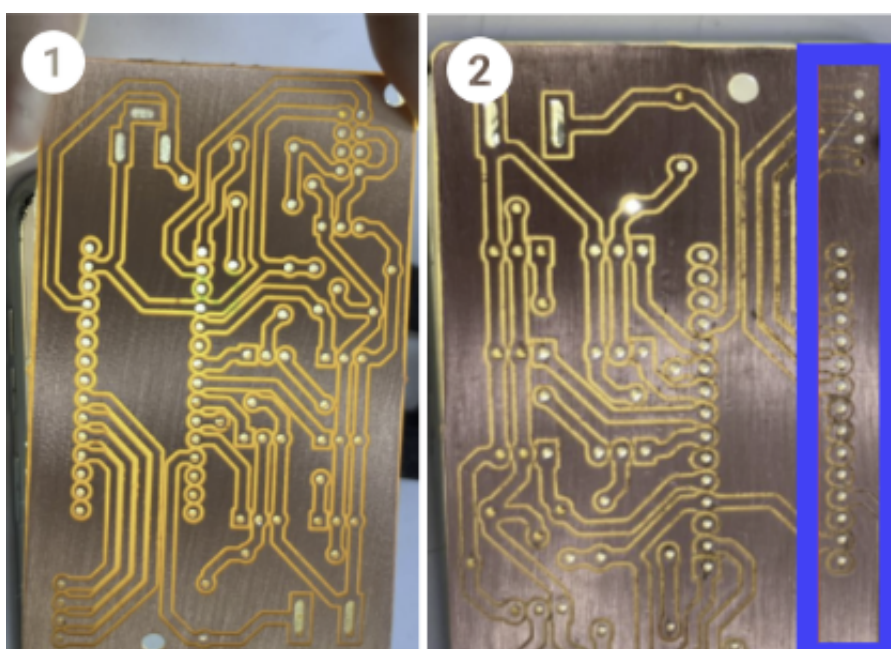


Figura 16 – Dispositivo *poka-yoke* utilizado



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 17 – Exemplo de trilha correta (1) e trilha defeituosa (2)



Fonte: elaborado pela autora (2026).

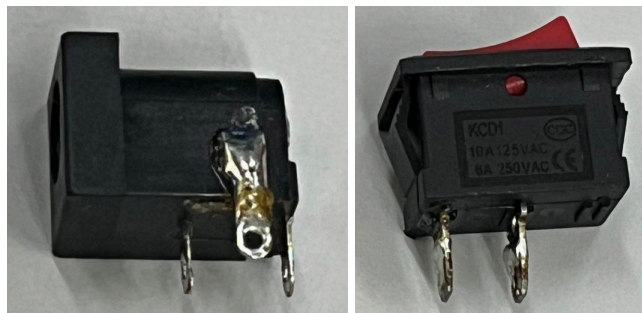
#### 3.4.4 Inspeção dos componentes eletrônicos

Antes da montagem dos componentes eletrônicos na PCI, passou a ser realizada uma inspeção visual dos componentes, com o objetivo de identificar peças danificadas, oxidadas ou com defeitos aparentes.



Essa melhoria permitiu reduzir a utilização de componentes defeituosos durante a montagem, aumentando a confiabilidade das placas produzidas. A figura 18 apresenta exemplos com defeitos visuais de oxidação.

Figura 18 – Componentes eletrônicos com defeito visual



Fonte: elaborado pela autora (2026).

#### 3.4.5 Padronização dos processos de soldagem

A etapa de soldagem recebeu melhorias relacionadas à padronização do processo, visando aumentar a qualidade das conexões elétricas e reduzir falhas recorrentes observadas durante a montagem das placas. Como parte dessas melhorias, a liga de solda *Soft Metais* ( $\varnothing$  1,0 mm) foi substituída pela liga *Cobix* ( $\varnothing$  0,5 mm). A nova liga proporcionou melhor molhabilidade, maior controle da deposição de solda e melhor acabamento das juntas soldadas, contribuindo para a redução de defeitos como excesso de estanho, soldas frias e curtos-circuitos.

Além disso, passou a ser adotada a aplicação de fluxo (*flux*) antes da realização da soldagem. O fluxo auxiliou na remoção de oxidações presentes nas superfícies metálicas, melhorando a molhabilidade do estanho e favorecendo a formação adequada das juntas de solda. A utilização desse recurso contribuiu diretamente para a redução da ocorrência de soldas frias, excesso de estanho e falhas de aderência.

Outro ponto importante foi a padronização da temperatura da estação de solda. Para definição do parâmetro ideal, foram realizados quatro testes preliminares com diferentes faixas de temperatura, avaliando aspectos como qualidade da junta, tempo de fusão do estanho e integridade dos componentes eletrônicos. Após os testes, definiu-se a temperatura de 350 °C como padrão operacional, por apresentar melhor equilíbrio entre qualidade da soldagem e segurança térmica dos componentes.

A padronização operacional da soldagem permitiu maior uniformidade nas conexões elétricas, redução da variabilidade do processo manual e diminuição significativa das falhas associadas à etapa de montagem eletrônica.

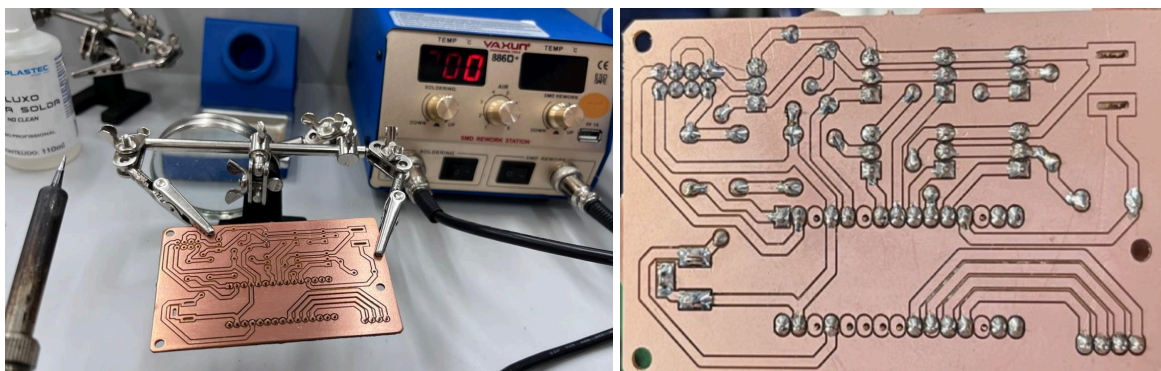
Os materiais adotados após a padronização do processo de soldagem são apresentados na Figura 19. Na Figura 20 pode-se analisar um exemplo de soldagem considerada aceitável segundo os critérios da norma IPC-A-610.

Figura 19 – Materiais utilizados para soldagem



Fonte: elaborado pela autora (2026).

Figura 20 – Exemplo de solda correta conforme padrão IPC



Fonte: elaborado pela autora (2026).

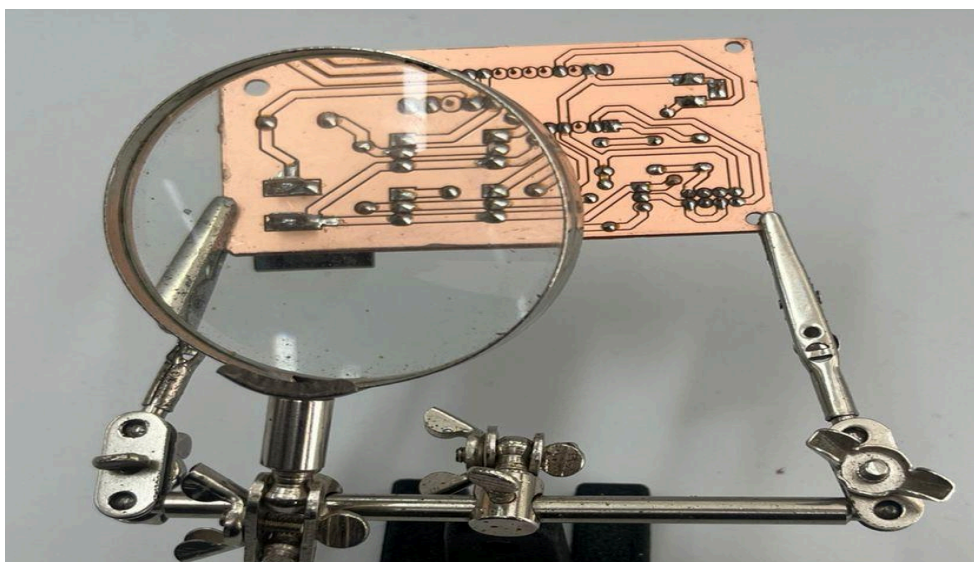
### 3.4.6 Inspeção pós-soldagem

Após a soldagem dos componentes, passou a ser realizada uma inspeção rápida para verificação da integridade das conexões elétricas e identificação de possíveis curtos-circuitos entre trilhas próximas.

Posteriormente, as placas eram encaminhadas para uma inspeção visual mais detalhada com auxílio de dispositivo de ampliação, permitindo identificar falhas não percebidas durante a inspeção inicial.

Essa melhoria possibilitou maior controle da qualidade final das soldas realizadas. A inspeção visual detalhada realizada após a soldagem pode ser observada na Figura 21.

Figura 21 – Inspeção visual das soldas



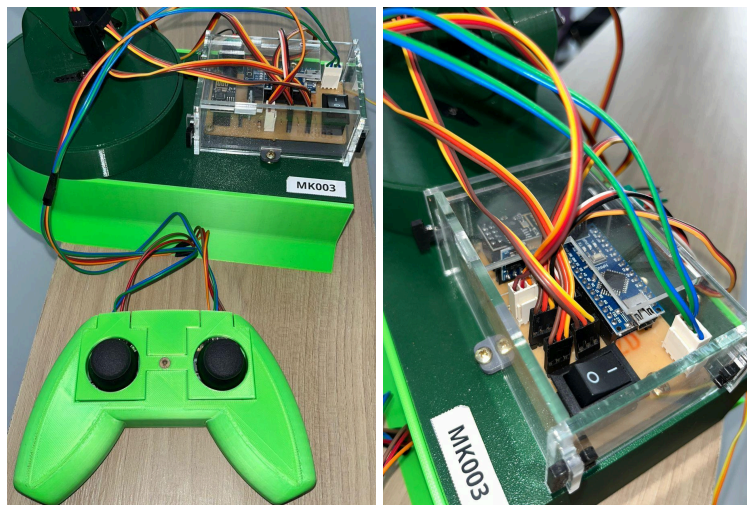
Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.4.7 Teste final e aprovação da PCI

Como última etapa do processo, foi implementado um teste funcional das placas antes da aprovação final. O objetivo foi validar o funcionamento básico da PCI e impedir o encaminhamento de placas defeituosas para utilização nos protótipos educacionais.

A realização do teste final aumentou a confiabilidade do processo e contribuiu para a redução do número de placas descartadas após a montagem completa. A etapa final de validação da PCI é ilustrada na Figura 22.

Figura 22 – Teste funcional da PCI após montagem



Fonte: elaborado pela autora (2026).

### 3.5 PROCESSO FINAL PÓS IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

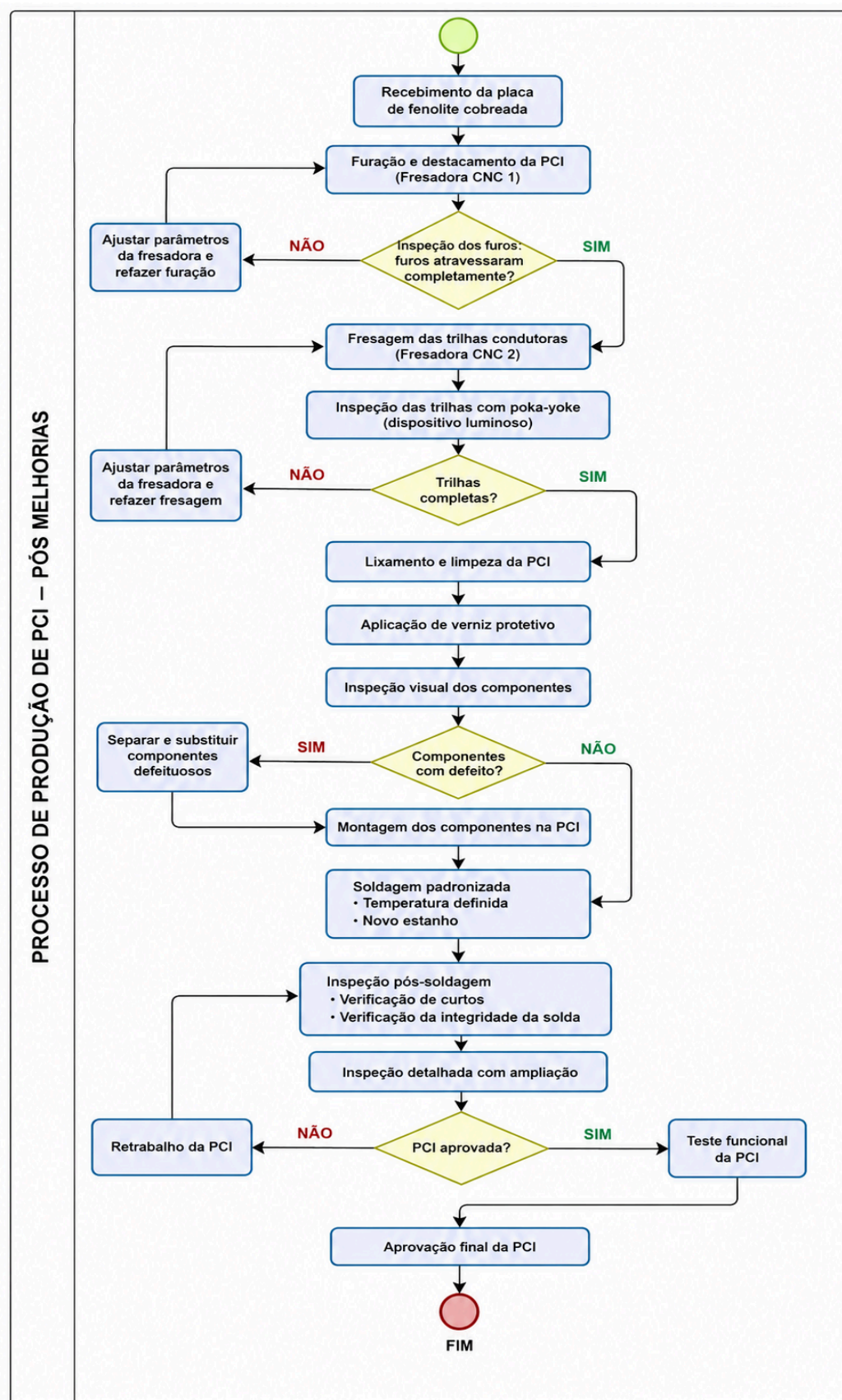
O fluxograma da figura 23 demonstra o processo produtivo das placas de circuito impresso após a implementação das melhorias propostas neste estudo. Observa-se a inserção de novas etapas de inspeção e controle da qualidade ao longo da produção, com o objetivo de reduzir a propagação de falhas entre as etapas do processo.

Entre as principais modificações implementadas destacam-se a inspeção dos furos após o processo de furação e destacamento, a verificação da integridade das trilhas condutoras por meio de dispositivo *poka-yoke*, a inspeção visual dos componentes eletrônicos antes da montagem, a padronização da soldagem e a implementação de inspeções pós-soldagem e testes funcionais finais.

Além disso, o novo fluxo produtivo passou a incorporar pontos de decisão e retrabalho controlado, permitindo a identificação precoce de falhas e evitando que placas não conformes avançassem para etapas posteriores. Essas alterações contribuíram para maior confiabilidade do processo, redução de desperdícios e aumento do índice de aprovação das placas produzidas. O fluxo produtivo após a implementação das melhorias é apresentado na figura abaixo.



Figura 23 – Fluxograma do processo pós-implementação das melhorias



Fonte: elaborado pela autora (2026).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS ANTES DAS MELHORIAS

Antes da implementação das melhorias, foram produzidas 200 placas de circuito impresso. Durante o acompanhamento do processo produtivo, observou-se elevado índice de falhas associadas principalmente à etapa de soldagem manual.

Do total produzido, 66 placas precisaram ser totalmente descartadas devido à ocorrência de defeitos críticos, como curtos-circuitos, soldas frias e falhas de trilha. Outras 24 placas puderam ser recuperadas por meio de retrabalho, enquanto apenas 110 placas foram aprovadas diretamente sem necessidade de correções.

Os resultados demonstraram um cenário de baixa eficiência operacional, com elevados índices de desperdício de material e tempo de produção.

Com o objetivo de quantificar o desempenho do processo antes da implementação das melhorias, foi realizado o levantamento dos resultados obtidos na produção inicial de 200 placas. Os dados coletados são apresentados na Tabela 1.

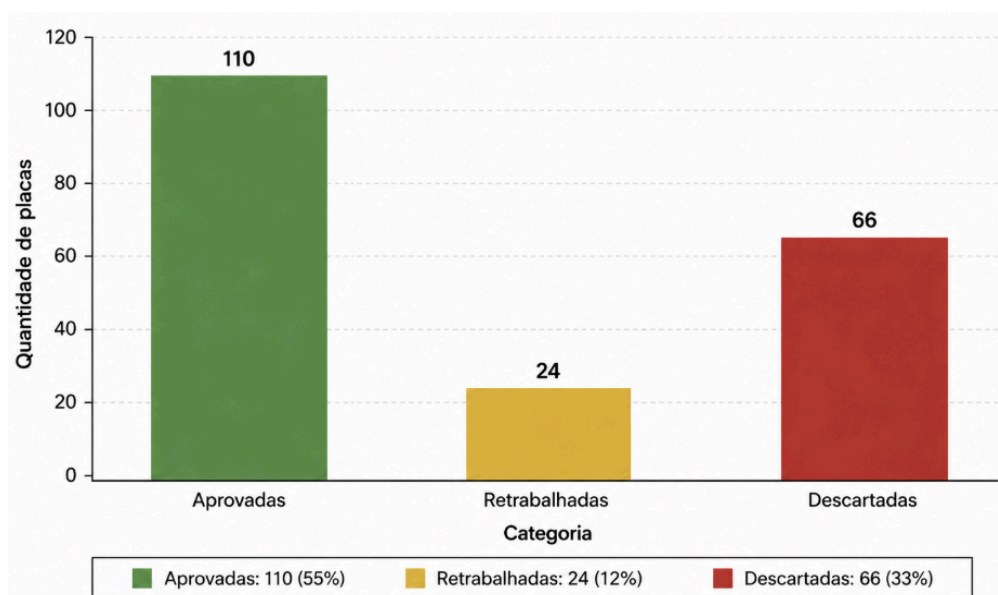
Tabela 1 – Situação inicial da produção

| Situação Inicial | Quantidade (unid.) |
|------------------|--------------------|
| Produzidas       | 200                |
| Descartadas      | 66                 |
| Retrabalhadas    | 24                 |
| Aprovadas        | 110                |

Fonte: elaborada pela autora (2026).

Esses resultados evidenciam a necessidade de intervenções voltadas à redução de falhas e desperdícios. A comparação entre os resultados obtidos antes e após a implementação das melhorias é apresentada na Figura 24.

Figura 24 – Comparação entre descarte, retrabalho e aprovação



Fonte: elaborado pela autora (2026).

#### 4.2 RESULTADOS PÓS IMPLEMENTAÇÃO DE MELHORIAS

Após a implementação das melhorias no processo produtivo, foram produzidas novamente 200 placas de circuito impresso para análise comparativa dos resultados.

Com a aplicação das etapas adicionais de inspeção, padronização da soldagem, utilização do *poka-yoke* e implementação de testes finais, observou-se significativa redução das falhas identificadas anteriormente.

Do total produzido na segunda etapa, nenhuma placa precisou ser descartada. Apenas 6 placas necessitaram de retrabalho, sendo posteriormente recuperadas e reutilizadas. As demais 194 placas foram aprovadas diretamente.

Os resultados evidenciam a eficiência das melhorias implementadas e demonstram a contribuição das ferramentas da Engenharia de Produção para a otimização do processo.

Após a implementação das melhorias propostas, uma nova coleta de dados foi realizada em um lote de 200 placas produzidas sob as novas condições operacionais. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Situação pós-implementação

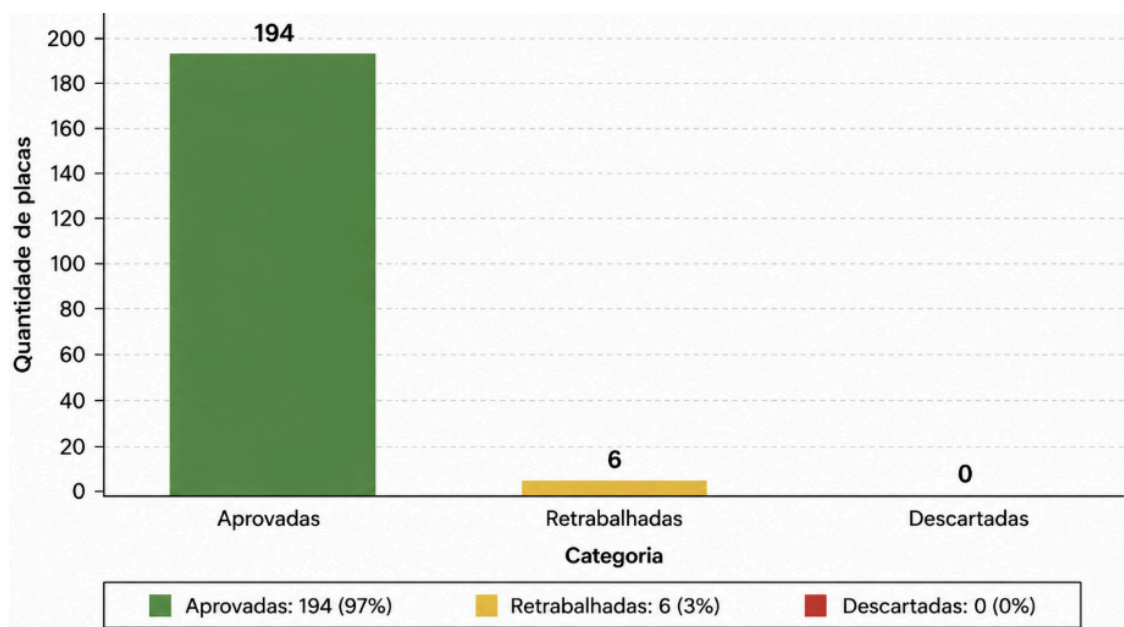
| Situação Inicial | Quantidade (unid.) |
|------------------|--------------------|
| Produzidas       | 200                |
| Descartadas      | 0                  |
| Retrabalhadas    | 6                  |
| Aprovadas        | 194                |

Fonte: elaborada pela autora (2026).

Verifica-se que não houve descarte de placas após a implementação das melhorias. Além disso, apenas seis unidades necessitaram de retrabalho, demonstrando aumento significativo da eficiência e da confiabilidade do processo produtivo.

A distribuição dos resultados obtidos após a implementação das melhorias pode ser observada na Figura 25.

Figura 25 – Resultados após melhorias



Fonte: elaborado pela autora (2026).



### 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre os resultados obtidos antes e após a implementação das melhorias demonstra significativa evolução no desempenho do processo produtivo.

O índice de descarte foi reduzido de 33% para 0%, enquanto a taxa de retrabalho caiu de 12% para 3%. Além disso, o percentual de placas aprovadas diretamente aumentou de 55% para 97%.

Os resultados obtidos indicam que a implementação de inspeções intermediárias, padronização da soldagem e utilização de ferramentas de controle da qualidade contribuíram diretamente para a redução de falhas operacionais e desperdícios.

Para facilitar a análise dos impactos das ações implementadas, os principais indicadores de desempenho antes e após as melhorias foram consolidados na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação dos resultados

| <b>Indicador</b>  | <b>Antes</b> | <b>Depois</b> |
|-------------------|--------------|---------------|
| <b>Descarte</b>   | 33%          | 0%            |
| <b>Retrabalho</b> | 12%          | 3%            |
| <b>Aprovadas</b>  | 55%          | 97%           |

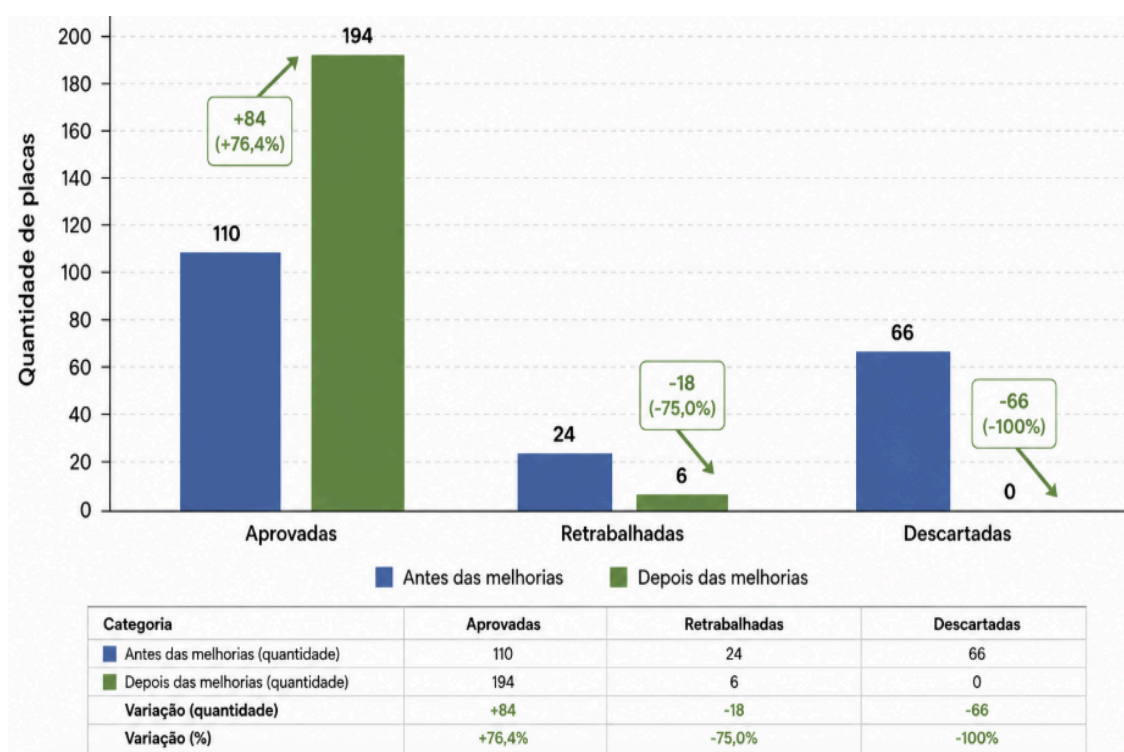
Fonte: elaborada pela autora (2026).

A comparação evidencia uma redução de 100% no descarte de placas e de 75% no retrabalho. Paralelamente, a quantidade de placas aprovadas diretamente aumentou de 110 para 194 unidades, demonstrando a efetividade das melhorias implementadas ao longo do processo produtivo.

Os resultados demonstram que a adoção de inspeções intermediárias, a padronização do processo de soldagem, a implementação da TPM nas fresadoras CNC e o desenvolvimento do dispositivo *poka-yoke* contribuíram para a redução das não conformidades observadas na produção. Esses achados estão alinhados aos princípios da melhoria contínua e da prevenção de falhas defendidos por Ohno (1997), Shingo (1996) e Stamatis (2003), reforçando a aplicabilidade das ferramentas da Engenharia de Produção em processos de manufatura eletrônica.

A Figura 26 apresenta a evolução dos indicadores de desempenho entre os dois períodos analisados.

Figura 26 – Comparação antes e depois das melhorias



Fonte: elaborado pela autora (2026).

#### 4.4 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação de ferramentas da Engenharia de Produção contribuiu significativamente para a melhoria da qualidade no processo de fabricação das placas de circuito impresso. Antes da implementação das melhorias, observou-se elevado índice de descarte e retrabalho, evidenciando a existência de falhas recorrentes nas etapas de fresagem, montagem e soldagem.

Após a aplicação das intervenções propostas, houve eliminação total do descarte de placas e redução expressiva da necessidade de retrabalho, indicando aumento da confiabilidade do processo produtivo. Esses resultados corroboram os princípios do *Lean Manufacturing* descritos por Ohno (1997), segundo os quais a redução de desperdícios e a melhoria contínua dos processos promovem ganhos diretos de eficiência e qualidade.

A padronização das etapas de soldagem apresentou impacto relevante na redução das não conformidades observadas durante a montagem eletrônica. A definição de temperatura operacional, a utilização de fluxo e a substituição da liga de solda contribuíram para maior estabilidade do processo e melhor formação das juntas de solda. De acordo com a norma IPC J-STD-001 (IPC, 2020), fatores como controle térmico, limpeza e escolha adequada dos materiais influenciam diretamente a qualidade das conexões elétricas e a confiabilidade das montagens eletrônicas. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que parte significativa das falhas identificadas anteriormente estava associada à ausência de padronização operacional e ao controle insuficiente das variáveis de soldagem.

Outro fator que demonstrou forte influência nos resultados foi a ampliação das etapas de inspeção ao longo do processo produtivo. A implementação de verificações intermediárias permitiu identificar defeitos ainda nas fases iniciais de fabricação, impedindo que placas com falhas avançassem para etapas posteriores. A utilização do dispositivo *poka-yoke* para inspeção das trilhas condutoras mostrou-se particularmente eficiente, reduzindo falhas relacionadas a trilhas incompletas e curtos-circuitos. Segundo Shingo (1996), dispositivos *poka-yoke* atuam na prevenção de erros operacionais por meio de mecanismos simples de controle, reduzindo a dependência exclusiva da inspeção humana. Assim, a redução observada nos índices de defeitos pode ser interpretada como consequência direta do fortalecimento dos mecanismos preventivos incorporados ao processo.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações devem ser consideradas. O estudo foi realizado em ambiente acadêmico e com uma amostra restrita de produção, envolvendo apenas 400 placas ao longo do período analisado. Além disso, o processo era executado por alunos-mentores com diferentes níveis de experiência prática, o que pode introduzir variabilidade operacional nos resultados obtidos. Outro aspecto importante é que as melhorias foram implementadas simultaneamente, dificultando a identificação isolada do impacto individual de cada intervenção. Dessa forma, embora seja possível observar uma relação consistente entre as melhorias implementadas e a redução das falhas, não é possível afirmar com precisão qual ação apresentou maior influência sobre os resultados finais.

Ainda assim, os resultados demonstram que a integração entre ferramentas da Engenharia de Produção e práticas de qualidade aplicadas à manufatura eletrônica pode promover melhorias significativas mesmo em ambientes de

produção manual e de pequena escala. A adoção de controles preventivos, padronização operacional e manutenção das condições adequadas de processo contribuiu para aumentar a eficiência produtiva, reduzir desperdícios e elevar a qualidade final das placas produzidas.

Além disso, o estudo evidencia que soluções de baixo custo, como inspeções intermediárias e dispositivos *poka-yoke* desenvolvidos internamente, podem apresentar impacto relevante na confiabilidade de processos eletrônicos educacionais e laboratoriais.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar e implementar melhorias para o processo de produção de placas de circuito impresso utilizadas em protótipos eletrônicos educacionais, com foco na redução de desperdícios e no aumento da qualidade das placas produzidas.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, foram identificadas falhas recorrentes relacionadas principalmente à etapa de soldagem manual, como soldas frias, curtos-circuitos, trilhas incompletas e problemas de montagem. Essas falhas resultavam em elevados índices de retrabalho e descarte de placas.

Com base nos princípios da Engenharia de Produção, foram implementadas melhorias voltadas à padronização do processo, ampliação das etapas de inspeção, utilização de dispositivos *poka-yoke* e definição de parâmetros operacionais para soldagem.

Os resultados obtidos demonstraram significativa melhoria no desempenho do processo produtivo. O índice de descarte foi reduzido de 33% para 0%, enquanto a taxa de retrabalho caiu de 12% para 3%. Além disso, o percentual de placas aprovadas diretamente aumentou de 55% para 97%, evidenciando a eficácia das ações implementadas.

Dessa forma, conclui-se que a aplicação de ferramentas da Engenharia de Produção em processos de manufatura eletrônica contribui diretamente para a melhoria da qualidade, redução de desperdícios e aumento da eficiência operacional. Além disso, o estudo demonstra que melhorias relativamente simples, quando aplicadas de forma estruturada e contínua, podem gerar impactos significativos em ambientes produtivos de caráter educacional e tecnológico.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de sistemas automatizados de inspeção, ampliação do uso de indicadores de desempenho e estudos voltados à automação parcial das etapas de soldagem e inspeção das PCIs.

## REFERÊNCIAS

- BARBIER, René. **A pesquisa-ação**. Brasília: Plano, 2004.
- BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BERVIAN, Pedro Alcino; CERVO, Amado Luiz; SILVA, Roberto da. **Metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**. 8. ed. Rio de Janeiro: Manole, 2014.
- EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS). **Official Journal of the European Union**, Luxembourg, L 37, p. 19–23, 2003. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- GONÇALVES, R. A. **Inspeção de soldagem eletrônica: práticas e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2019.
- HALL, Stephen. **Handbook of IPC Standards**. Chicago: IPC Press, 2016.
- HERRERA, A.; PEREIRA, D. PCB manufacturing defects and reliability. **Journal of Electronics Manufacturing**, v. 29, p. 120–134, 2019.
- HWANG, Jennie S. **Environment-Friendly Electronics: Lead-Free Technology**. New York: Springer, 2012.
- IPC. **IPC-A-600: Acceptability of Printed Boards**. Bannockburn: IPC, 2020.
- IPC. **IPC-A-610: Acceptability of Electronic Assemblies**. Bannockburn: IPC, 2020.
- IPC. **IPC J-STD-001: Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies**. Bannockburn: IPC, 2020.
- LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- MARTINS, Gilberto de Andrade; THEÓPHILO, Carlos Renato. **Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

MARTINS, L.; OLIVEIRA, P. **Fundamentos da soldagem eletrônica**. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

NAKAJIMA, Seiichi. **Introduction to TPM: Total Productive Maintenance**. Cambridge: Productivity Press, 1989.

NEELY, Andy; GREGORY, Mike; PLATTS, Ken. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 4, p. 80–116, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/01443579510083622>. Acesso em: 20 mar. 2026.

OHNO, Taiichi. **O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997.

OLIVEIRA, Silvio Luiz de. **Tratado de metodologia científica: projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2010.

PRASAD, Ray. **Surface Mount Technology: Principles and Practice**. 2. ed. New York: Springer, 2003.

ROESCH, Sylvia Maria Azevedo. **Projetos de estágio e de pesquisa em administração**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

ROSALES RODRÍGUES, J. **Qualidade e rastreabilidade em processos eletrônicos**. Lisboa: IST Press, 2021.

SEVERO, Eliana Andréa; GUIMARÃES, Julio Cesar Ferro de; DORION, Eric Charles Henri. Sustentabilidade e melhoria contínua na produção industrial. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 3, p. 579–592, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp>. Acesso em: 12 abr. 2026.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2017.