

ANÁLISE DE TÉCNICAS PARA CONFEÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO UTILIZANDO CNC LASER E FRESAGEM

ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR MANUFACTURING PRINTED CIRCUIT BOARDS USING CNC LASER AND MILLING

Débora Emanoely de Sousa

sousaemanoely@gmail.com

Newan Nicolas Cavalcanti Silva

newannicolas@gmail.com

Prof. Dr. Ygo Neto Batista

ygo@pesqueira.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho avaliou três técnicas de confecção de placas de circuito impresso (PCI): *Laser Direct Imaging* (LDI) com *dry film*, microusinagem a laser e fresagem. Utilizando a CNC laser e a CNC router do IF Maker Pesqueira, identificaram-se parâmetros que influenciam a qualidade das trilhas. Após a pesquisa bibliográfica, desenvolveu-se um projeto experimental com trilhas horizontais, verticais e curvas; com espessuras de 10, 15 e 20 mils; variando a potência, a velocidade, o espaçamento, o tipo de fresa e a profundidade. O LDI com *dry film* necessitou de ajustes finos de potência, onde variações de 1% alteram significativamente a qualidade. Tanto o LDI quanto a microusinagem apresentaram forte dependência do espaçamento entre linhas; contudo, a microusinagem apresentou qualidade intermediária, com definição superior ao LDI. Já a fresagem demonstrou maior definição e melhor acabamento geral, desde que mantida a estabilidade mecânica da máquina. Concluiu-se que a fresagem obteve o melhor desempenho, embora todas as técnicas tenham sido adequadas para PCIs de baixa complexidade e para prototipagem rápida.

Palavras-chave: Laser Direct Imaging. PCI. Fresagem.

ABSTRACT

This work evaluated three techniques for manufacturing Printed Circuit Boards (PCBs): Laser Direct Imaging (LDI) with dry film, laser micromachining, and milling. Utilizing the CNC laser and CNC router from IF Maker Pesqueira, parameters influencing trace quality were identified. Following the bibliographic research, an experimental design was developed featuring horizontal, vertical, and curved traces; with thicknesses of 10, 15, and 20 mils; varying power, speed, spacing, end mill type, and depth. LDI

with dry film required fine power adjustments, where 1% variations significantly altered the quality. Both LDI and micromachining showed a strong dependence on the line spacing; however, micromachining yielded intermediate quality, with better definition than LDI. Milling, on the other hand, demonstrated greater definition and better overall finish, provided the machine's mechanical stability was maintained. It was concluded that milling achieved the best performance, although all techniques were suitable for low-complexity PCBs and rapid prototyping.

Keywords: Laser Direct Imaging. PCB. Milling.

1 INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso (PCI) estão presentes em praticamente todos os dispositivos eletrônicos, servindo como uma plataforma para a integração e a conexão entre os componentes. Em laboratórios maker e ambientes fablabs, que abrangem um contexto educacional e prático dos usuários por meio da criação de protótipos, há fornecedores que atendem à produção em pequena escala; porém, esses serviços normalmente apresentam custos relativamente elevados, uma vez que a fabricação profissional costuma variar entre R\$6 e R\$120 por unidade, valor que não inclui o frete internacional e taxas alfandegárias, o qual pode superar o preço das próprias placas, além dos longos períodos de fabricação e prazo de entrega, o que acaba interferindo negativamente no propósito geral desses ambientes. Dessa forma, alternativas mais rápidas e econômicas podem ser utilizadas para atender a essas demandas, quando bem aplicadas (VERBELEN; VAN BELLE; TIETE, 2013).

São diversos os métodos e técnicas utilizados para a confecção de PCI nesses ambientes, tais como o de transferência térmica, fotolitografia com filme seco (dry film), serigrafia, projetor de processamento de luz digital (Digital Light Processing Projector - DLP), gravação direta a laser (Laser Direct Imaging - LDI) e fresagem. Dentre essas técnicas, o LDI e a fresagem vêm ganhando espaço na fabricação de PCI, visto que, se o laboratório maker já possuir uma CNC a laser ou uma CNC Router, também conhecida como fresadora, essas técnicas dispensam a necessidade de criação de máscara litográfica, evitam o uso de sistemas de exposição com lâmpadas UV adicionais, reduzem o tempo para a confecção da PCI e evitam problemas ocasionados pelo manuseio de fotoferramentas, tais como manter o alinhamento das máscaras. Além disso, para a técnica de LDI, é possível obter linhas e espaços com resolução suficiente para aplicações com tecnologia de montagem de componentes em superfície (SMT) (BARBUCHA; KOCIK et al., 2007). Ainda com o princípio de exposição direta do LDI, é possível realizar a aplicação de microusinagem a laser para prototipagem rápida de placas de circuito impresso (NOWAK et al., 2013). Por outro lado, para a técnica de fresagem, não é necessário realizar nenhuma etapa de corrosão química do cobre.

O Laser Direct Imaging (LDI) consiste na criação de imagens diretas com laser, não havendo necessidade do uso de fotolitos. O laser pode incidir sobre um material polimérico fotossensível ou sobre uma tinta. No primeiro caso, o processo ocorre na aplicação de um feixe de laser focado sobre a superfície da PCI, revestida com material polimérico que endurece durante o tempo de exposição à luz UV (BARBU-

CHA; MIZERACZYK, 2016), por exemplo, o dry film. Já no segundo caso, o laser atua em uma microusinagem, na qual há uma extração controlada e seletiva do material (tinta) que protege o cobre contra a corrosão química. O feixe focalizado incide sobre a região desejada e promove a vaporização da camada protetora (tinta), sem contato mecânico com a superfície (NOWAK et al., 2013). Esta técnica pode ser chamada de microusinagem a laser.

No processo de fresagem, uma fresa assume movimentos nos eixos x, y e z, bem como de giro no spindle, produzindo ranhuras, resaltos, furos, dentre outras configurações. A fresadora CNC, ou CNC Router, pode atuar em materiais como madeira, PVC, acrílico e metal, por meio de fresas de diferentes espessuras para a remoção de material da peça.

Em ambas as técnicas, o usuário projeta a PCI e gera dados de fabricação. Esse arquivo é convertido para um formato G-code, o qual contém dados sobre a movimentação da CNC e a potência do laser ou do spindle.

A confecção de PCI através de LDI envolve diversos parâmetros que exigem ajustes para o processo de gravação, na etapa de limpeza e na corrosão do cobre. De forma análoga, a confecção via fresagem também envolve parâmetros que exigem ajustes, tais como tipo de fresa, velocidade de deslocamento, velocidade de rotação e a altura de trabalho da fresa. A assertividade desses ajustes influencia diretamente a qualidade final do protótipo. É possível encontrar trabalhos que apresentam resultados satisfatórios quanto à resolução do problema de ajuste otimizado dos parâmetros (BEZERRA, 2019; BARBUCHA; KOCIK et al., 2007). Contudo, os resultados obtidos nesses estudos não podem estabelecer valores padrão, tendo em vista que cada caso é singular por depender do equipamento e dos materiais utilizados. Este trabalho visa implantar e otimizar processos de produção de PCI no IF Maker Pesqueira, utilizando os métodos LDI e fresagem, bem como estabelecer qual técnica é a mais adequada para diferentes designs e aplicações de PCI.

1.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho da fabricação de placas de circuito impresso por meio das técnicas LDI com dry film, microusinagem a laser e fresagem, utilizando CNC laser e CNC Router do IF Maker Pesqueira.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Identificar os principais parâmetros críticos das técnicas.
- Avaliar a qualidade das trilhas.
- Comparar os resultados obtidos e determinar o melhor desempenho geral para confecção de protótipos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As principais técnicas de confecção de PCI para prototipagem rápida são: (i) transferência térmica, (ii) fotolitografia, (iii) serigrafia, (iv) DLP, (v) LDI/Microusinagem a laser e (vi) fresagem.

Na transferência térmica, o custo inicial é inferior ao das outras técnicas citadas; o processo ocorre por meio da junção do layout de impressão e da placa, transferindo o perfil elétrico desejado por meio da aplicação de calor. Contudo, esse método é mais suscetível a falhas e resulta em linhas quebradas que devem ser ligadas com um marcador permanente, afetando diretamente o tamanho e a qualidade das trilhas, tornando-as ásperas e irregulares (SUWANDI, 2020). Esta técnica não é aplicada no IF Maker Pesqueira, visto que o resultado obtido tem qualidade inferior quando comparado à técnica que utiliza a CNC Router.

A fotolitografia e a serigrafia são as técnicas mais usuais que geram PCI de boa resolução. Na fotolitografia, após preparar a superfície da placa, é posicionada uma impressão contendo o circuito desejado sobre uma fina camada de material sensível à luz ultravioleta (dry film para a fotolitografia ou emulsão serigráfica, no caso da serigrafia) aderida à placa, que pode então ser exposta à luz UV para o processo de revelação. A diferença entre as técnicas é basicamente o material sensível à luz. As áreas mais escuras da impressão atuam como barreiras e impedem que o material sensível seja exposto à radiação. Como resultado, essas regiões permanecem macias e solúveis após o processo de exposição, deixando o cobre subjacente desprotegido. Por outro lado, as áreas claras permitem a passagem da luz UV, promovendo o endurecimento do material sensível devido à polimerização das moléculas, o que protege o cobre nessas regiões durante as etapas subsequentes (MELO; RIOS; GUTIERREZ, 2001). É necessário um maior tempo para a confecção de PCI utilizando estas técnicas, em comparação com as demais citadas, visto que a confecção não é realizada no IF Maker Pesqueira, necessitando, muitas vezes, encomendar a confecção de outros estados.

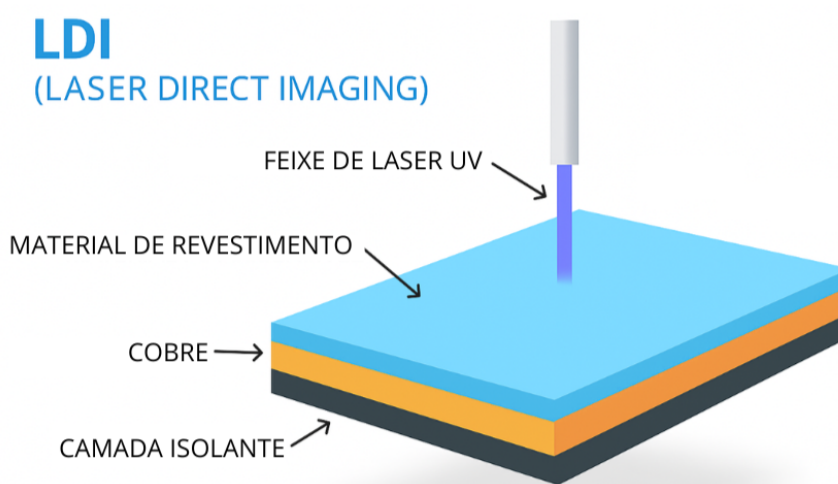
O método DLP utiliza os princípios da fotolitografia; porém, sem o uso de máscaras. Nele, a exposição ocorre substituindo sistemas de luz UV pela luz visível de um projetor DLP comercial, que permanece conectado a um computador, a partir do qual são criados e fornecidos os padrões de designs elétricos. Essa técnica pode tornar a confecção da PCI mais fácil, barata e relativamente segura; porém, existem questões de configuração de espaço e distância dos equipamentos que determinam diretamente o foco da imagem e podem interferir negativamente na qualidade da placa confeccionada (SUWANDI, 2020). Esta técnica não é aplicada no IF Maker Pesqueira, visto a necessidade de aquisição de um projetor específico como o DLP4710EVM-LC, que apresenta maior resolução, precisão do chip DMD, uniformidade luminosa e compatibilidade espectral com o material fotossensível (GONZALEZ et al., 2025). Porém, seu custo elevado inviabiliza a implementação no laboratório. Apesar de resultar em placas com boa qualidade, em comparação com a técnica LDI, os resultados obtidos seriam de qualidade inferior.

Por fim, visto que as técnicas LDI e fresagem são objetos deste trabalho de conclusão de curso, estas serão detalhadas nas próximas seções.

2.1 Laser Direct Imaging e Microusinagem a laser

A natureza conceitual do sistema LDI consiste na exposição da superfície, já preparada e revestida, da placa de fenolite a um laser UV focado, transferindo, assim, a imagem. Esse processo é controlado através do computador (COSTA et al., 2019). Neste trabalho, são analisados dois tipos de revestimento: com material fotossensível e com tinta "comum". A Figura 1 ilustra o funcionamento geral do processo de exposição.

Figura 1 – Sistema LDI.



Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2019).

A tecnologia do Laser Direct Imaging (LDI) teve sua origem a partir dos conceitos de fotoplotação desenvolvidos pelo cientista austríaco Heinz Joe Gerber em 1960, criador da fotoplotter NC (Controle Numérico) denominada "X-Y plotter" e detentor da patente em 1969. Alguns anos depois, em 1965, ele integrou uma fonte de luz rotativa com múltiplas aberturas para expor filmes fotográficos, que eram controladas por uma mesa digital com coordenadas XY. Esse avanço deu origem ao processo de fotoplotação e ao formato de arquivo Gerber (.gbr), que se tornou o padrão para a transferência de dados de imagem na fabricação de placas de circuito impresso (COSTA et al., 2019).

Em 2004, a técnica do LDI teve seu uso ampliado na confecção de placas de circuito impresso, especialmente aquelas com interconexão de alta densidade (HDI). Isso se deu após o lançamento da máquina Paragon da empresa israelense Orbotech, pioneira na evolução e desenvolvimento da tecnologia LDI (BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016).

Desde então, o uso do sistema LDI vem crescendo cada vez mais em pequenas produções e na confecção de protótipos, visto que, dentre as vantagens existentes, está a redução de cerca de 40% das etapas do processo quando comparadas aos outros métodos expostos, inclusive dispensando a impressão e o uso de máscaras, e permitindo que os dados de imagem do esquema elétrico possam ser alterados de maneira mais rápida e prática (UEMATSU, 2001; CHOI, 1995). O Quadro 1 destaca as principais diferenças entre o método convencional (fotolitografia) e a tecnologia LDI.

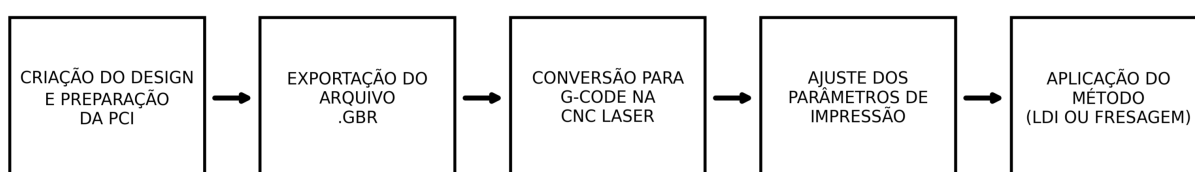
Quadro 1 – Etapas nos métodos convencional e LDI de fabricação dos padrões de circuito elétrico em PCI.

Fotolitografia	Método LDI
Preparação dos dados no computador para máscaras	Preparação dos dados no computador para imagem a laser
Criação das máscaras	Preparação da superfície de cobre da PCI
Impressão das máscaras	Aplicação do material de revestimento
Preparação da superfície de cobre da PCI	Exposição direta a laser
Aplicação do material fotossensível	
Posicionamento das máscaras na PCI	
Exposição a uma fonte de luz UV	

Fonte: (BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016).

A primeira etapa do processo de LDI ocorre de forma análoga às demais técnicas explicadas: o usuário cria um design de PCI utilizando um software no computador. A partir da próxima etapa, há diferenças entre as técnicas. Após o processo de criação do design, dados de fabricação da placa são gerados, permitindo a exportação de um arquivo em formato vetorial ASCII, denominado Gerber (.GBR ou .gbr), o qual contém todas as informações descritivas das imagens da placa de circuito impresso, tais como camadas de cobre, máscara de solda, legendas e furação da placa (UV LIGHT USINAGEM DE PCB/PCI, 2025). O Diagrama 1 exemplifica o processo para ambas as técnicas.

Diagrama 1 – Etapas iniciais do LDI e fresagem.



Fonte: Autores (2025).

Em seguida, é necessário importar este arquivo para uma ferramenta de controle da CNC laser que converte-o no formato G-code, o qual é responsável por transmitir as informações de movimentação da impressora no plano XY, além de permitir alterar parâmetros como a potência do laser, a velocidade de deslocamento e a qualidade do preenchimento do desenho (PY2MAJ, 2021). Por fim, após a conversão e os ajustes desses arquivos, dá-se início à etapa de gravação, na qual a CNC aplica um feixe de laser que incide diretamente no revestimento, podendo ser um dry film ou uma tinta, que está em contato direto com a superfície de cobre da PCI.

Após esse processo, o fluxo de produção da PCI varia de acordo com o revestimento. No caso do dry film, a área que teve a incidência luminosa do laser apresenta

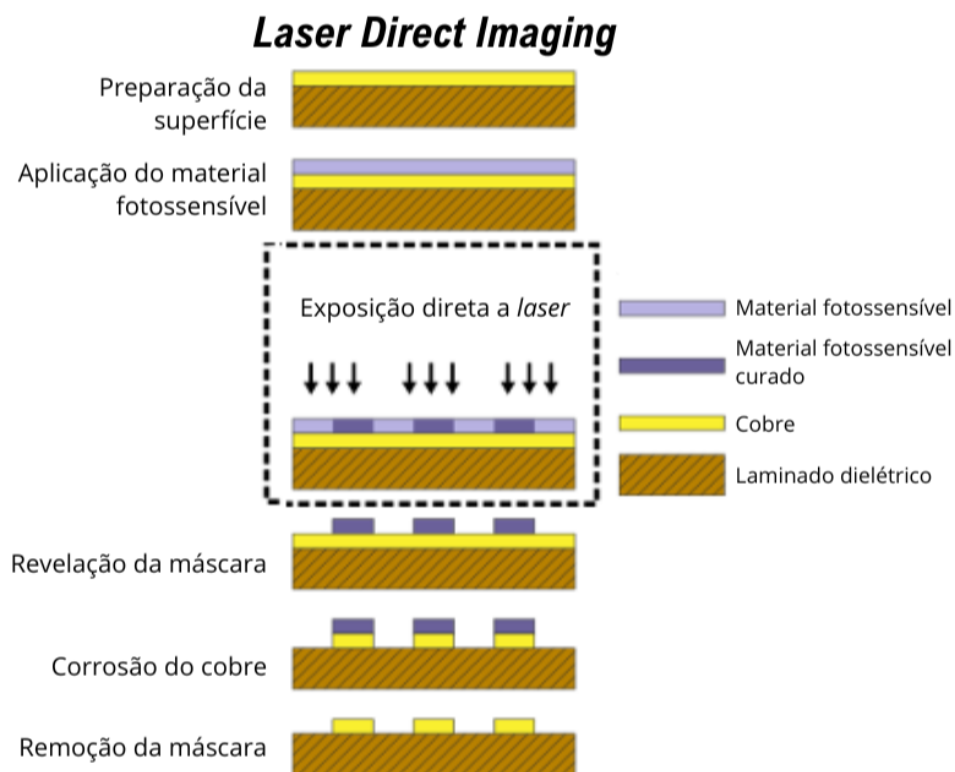
o polímero endurecido, enquanto o polímero que não recebeu o feixe de laser será removido em um processo de lavagem. O cobre exposto, então, é removido por meio de corrosão, utilizando o perclorato de ferro (MELO; RIOS; GUTIERREZ, 2001). O fluxograma das etapas de produção de PCI por LDI com dry film pode ser visto no Diagrama 2.

O LDI, usando tinta como revestimento, também conhecida como microusinagem a laser, é uma técnica automatizada que envolve a extração localizada do material, não havendo a necessidade de contato mecânico durante o processo de fabricação, o que a torna precisa. A energia luminosa do laser é absorvida, causando aquecimento e evaporando o material, como é mostrado no Diagrama 3. Seu desenvolvimento está intrinsecamente ligado a evolução da própria tecnologia laser, criada em 1960, quando foi aplicada em processos de corte e soldagem de materiais e, posteriormente, em aplicações de escala micrométrica (KLOTZBACH et al., 2011). Imagens de parte do processo de fabricação de PCI utilizando a microusinagem a laser podem ser vistas nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d.

A fabricação de PCI, seja por qualquer método, possui parâmetros em comum que precisam ser levados em consideração, tanto na etapa de limpeza das placas quanto durante a corrosão do cobre. Além desses, ao utilizar o processo LDI por meio de uma CNC, existem parâmetros que requerem ajustes o mais precisos possível antes da exposição direta ao laser. Por exemplo, Barbuch, Kocik et al. (2007) especifica uma série deles, tais como potência média do laser, velocidade e frequência. A precisão na aplicação desses ajustes exerce uma influência direta sobre a qualidade final do protótipo. Contudo, o artigo não detalha a metodologia que foi utilizada para os ajustes dos parâmetros.

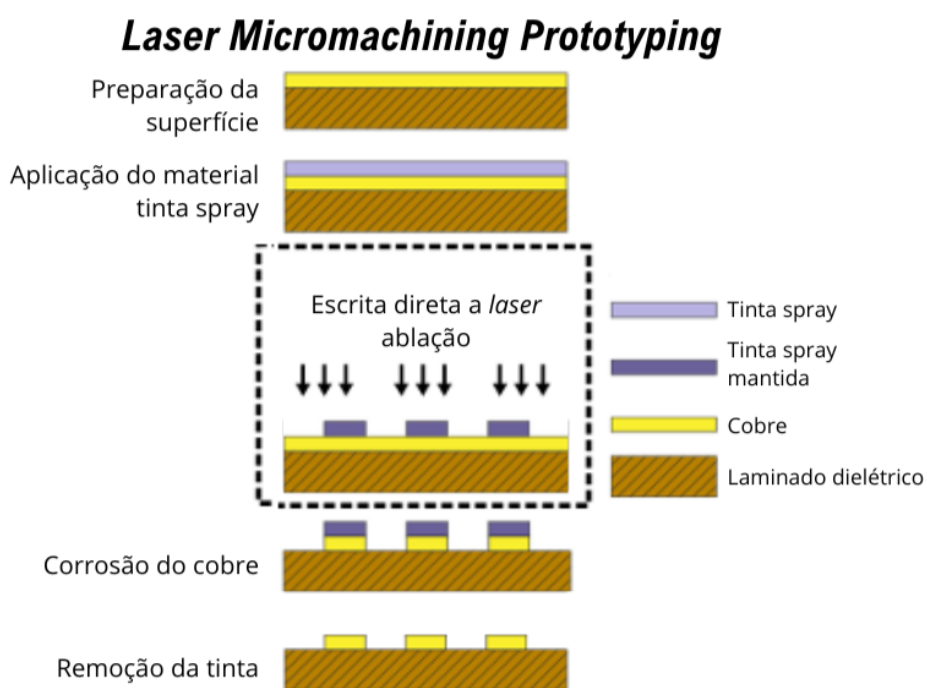
Um estudo recente apresentou uma alternativa na transferência de esquemas eletrônicos utilizando o LDI, adjunto a um sistema de movimentação CNC cartesiano de dois eixos não comercial, o qual foi totalmente desenvolvido pelo autor. Nessa pesquisa, COSTA et al. (2019) realiza o ajuste de parâmetros por meio de três ensaios diferentes, com dois testes cada, modificando a velocidade, a potência do laser e o tempo de revelação. Ainda que não fosse o foco principal da pesquisa, foi possível identificar um conjunto de ajustes que apresentou melhores resultados no teste de capacidade realizado.

Diagrama 2 – Etapas do processo de produção de PCI pelo método LDI com dry film.



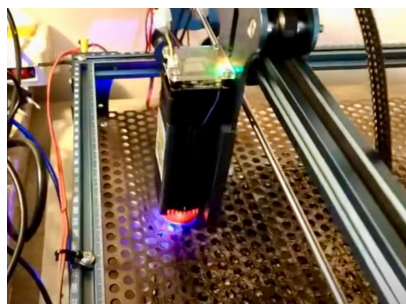
Fonte: COSTA et al. (2019).

Diagrama 3 – Etapas do processo de produção de PCI pelo método LDI com tinta.



Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2019).

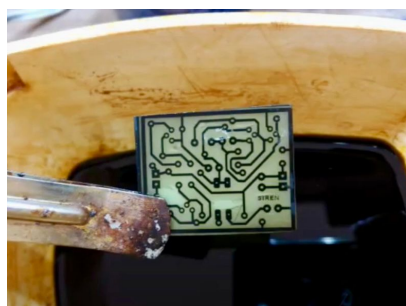
Figura 2 – Imagens do processo de produção de PCI com o método LDI e Microusinagem laser.



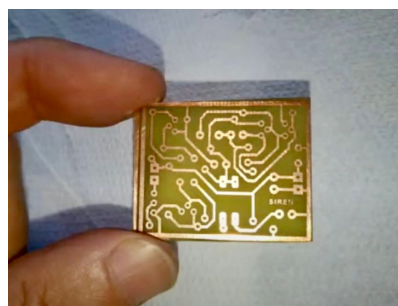
(a) Exposição direta a laser para gravação do esquema eletrônico.



(b) PCI após exposição e transferência do design eletrônico.



(c) PCI após processo de corrosão do cobre.



(d) PCI confeccionada após limpeza.

Fonte: Purchiaroni (2022).

2.2 Fresagem

A técnica de fresagem é um processo de manufatura subtrativa que consiste na remoção seletiva de material da superfície da placa de circuito impresso, utilizando uma fresa montada em um CNC Router. No contexto do IF Maker Pesqueira, essa técnica tem se mostrado uma alternativa viável e eficiente para a produção de protótipos de PCIs, especialmente em projetos que demandam agilidade e flexibilidade no desenvolvimento (BRAGA; RABELO; CARDOSO, 2012). Diferente do processo químico, a fresagem não requer o uso de substâncias corrosivas, reduzindo os riscos ambientais e de saúde relacionados ao manuseio de reagentes (BEZERRA, 2019).

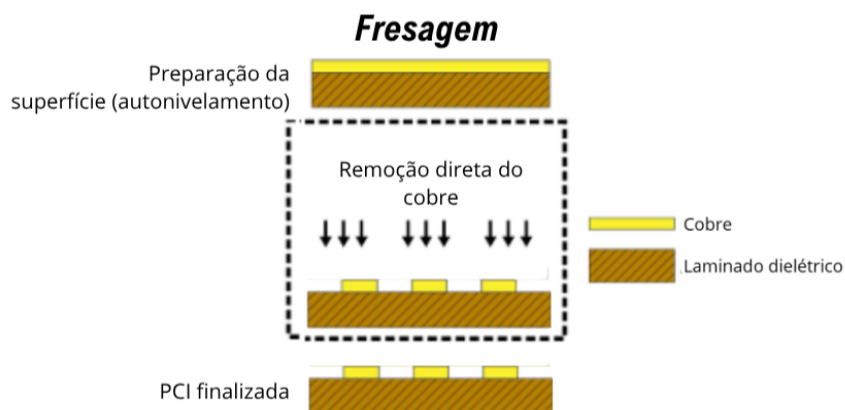
A primeira etapa é a geração do design da PCI, de forma similar àquela realizada para a CNC a laser. Em seguida, a fresa a ser utilizada é escolhida com base no tipo de material e na complexidade do traçado da PCI. São utilizadas fresas de diferentes tipos, com diâmetros variando de acordo com a largura das trilhas a serem usinadas. A correta configuração das fresas é fundamental para garantir a qualidade do corte e a integridade da PCI, sendo necessário medir parâmetros como o diâmetro da navalha, o diâmetro do eixo, o comprimento da fresa e o comprimento da navalha utilizando um paquímetro (POP 005 – IFPE, 2023). Em seguida, o arquivo G-code é gerado.

Antes do início da usinagem, a máquina CNC router deve ser devidamente configurada; a fresa e a placa, usadas na confecção de PCI, devem ser fixadas corretamente, além de o sistema ser calibrado. Também deve ser feito o autonivelamento da superfície com cobre, que é uma etapa fundamental antes do processo de usinagem em máquinas CNC, especialmente durante a fabricação de placas de circuito impresso. Isso se deve à possível irregularidade na espessura do cobre ou na planicidade da superfície da mesa da CNC, fatores que podem causar variações na profundidade do corte durante a execução do percurso da ferramenta. Durante o processo, o movimento controlado da fresa remove seletivamente o cobre da placa, criando trilhas condutivas e áreas isoladas, bem como furos para componentes, quando necessário (VERBELEN; VAN BELLE; TIETE, 2013). O ajuste da velocidade de deslocamento da fresa, a profundidade dos cortes, a velocidade de giro do spindle, entre outros, influenciam diretamente a qualidade da PCI confeccionada.

Apesar de seu custo de investimento inicial ser mais elevado e de sua precisão ser inferior a métodos como a corrosão química ou a fotolitografia DLP (BARBUCHA; MIZERACZYK, 2016), a fresagem já é utilizada no IF Maker Pesqueira para a confecção de PCI de baixa a média complexidade, devido à disponibilidade do equipamento no laboratório, previamente adquirido no projeto Oficinas 4.0 (SETEC/MEC).

As etapas do processo de fresagem para a fabricação de PCIs são semelhantes às aquelas descritas na seção LDI. As diferenças estão no processo físico-químico que, no LDI, é descrito em Diagrama 2 e Diagrama 3; enquanto, para a fresagem, o processo pode ser visto em Diagrama 4.

Diagrama 4 – Etapas do processo de produção de PCI pelo método de fresagem.



Fonte: Adaptado de COSTA et al. (2019)

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem qualitativa. Neste capítulo, são apresentados os procedimentos práticos relacionados à confecção das placas de circuito impresso por meio dos métodos LDI com dry film, microusinagem a laser e fresagem; estão detalhadas as características dos equipamentos e materiais utilizados, bem como as limitações observadas em cada aplicação, além de identificar os parâmetros críticos que impactam a qualidade final

dessas placas. Além disso, descreve-se o design do padrão de testes e o método empregado para a validação dos resultados, permitindo uma análise comparativa entre os processos de confecção.

A metodologia foi estruturada em três etapas principais: levantamento teórico e técnico, desenvolvimento experimental e testes e validações. Na primeira etapa, foi realizado um levantamento bibliográfico e documental, com a finalidade de reunir informações técnicas sobre a fabricação de PCIs, os processos de produção por LDI e fresagem e o funcionamento de máquinas CNC. Foram consultados livros técnicos, artigos científicos, manuais de equipamentos e normas técnicas da área.

Na segunda etapa, o projeto experimental foi conduzido no Laboratório Maker do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE), utilizando uma máquina CNC laser e uma CNC Router para a produção das placas. Diversos testes foram realizados, variando parâmetros como velocidade de avanço, profundidade de corte e tipo de fresa na CNC router; já para a CNC laser, foram variadas a potência do laser, a velocidade de gravação e o preenchimento de linhas, com o intuito de observar seus efeitos na qualidade da placa produzida.

A Figura 3 trata-se do design utilizado na realização dos testes, o qual foi definido a partir de um conjunto básico de trilhas com três diferentes espessuras: 10, 15 e 20 mils (milésimos de polegada), distribuídas vertical e horizontalmente de maneira retilínea, além de trilhas em forma senoidal para verificação da impressão de curvas. Este padrão foi utilizado por permitir avaliar de maneira simples e comparativa a capacidade do processo de fabricação em reproduzir trilhas com diferentes larguras e geometrias, analisando resolução, uniformidade e possíveis defeitos. Esse tipo de padrão é comum em estudos de prototipagem de PCIs, pois facilita a comparação entre técnicas e segue práticas alinhadas às recomendações das normas IPC quanto à verificação de limites de fabricação.

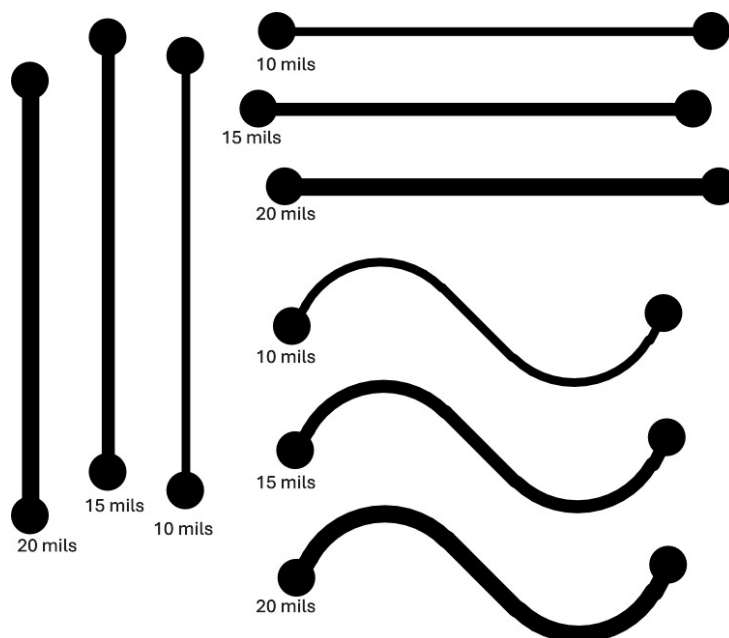
Placas profissionais confeccionadas com fotolito, que é uma das técnicas que apresenta a melhor qualidade, permitem confeccionar PCI com largura mínima de trilha em torno de 6 mils. No entanto, esse valor representa o limite industrial obtido em condições altamente controladas e com equipamentos de precisão que não refletem a realidade operacional deste estudo. Portanto, foi considerado que, para as técnicas de LDI e fresagem, uma largura de 10 mils já seria um resultado satisfatório quando comparada à técnica de fotolito e suficiente para a maioria das aplicações de confecção de PCI do IF Maker Pesqueira. Por outro lado, trilhas com largura de 20 mils devem ser possíveis de serem confeccionadas por qualquer técnica de fabricação de PCI.

Já os movimentos testados nas CNCs com a confecção de trilhas na horizontal, vertical e em curvas são devidos a possibilidade de que, na montagem mecânica das máquinas, os motores, os fusos e as correias não possuam a mesma precisão em ambos os eixos. Na diagonal, a precisão tende a ser reduzida, visto que o menor passo na diagonal é superior ao passo horizontal ou vertical.

Nas extremidades de cada trilha, há uma ilha para facilitar a realização dos testes de continuidade com o auxílio de um multímetro.

A terceira etapa consistiu na validação dos resultados, com análise qualitativa: acompanhamento visual, observações sobre acabamento, precisão e falhas nas trilhas.

Figura 3 – Design de testes.



Fonte: Autores (2025).

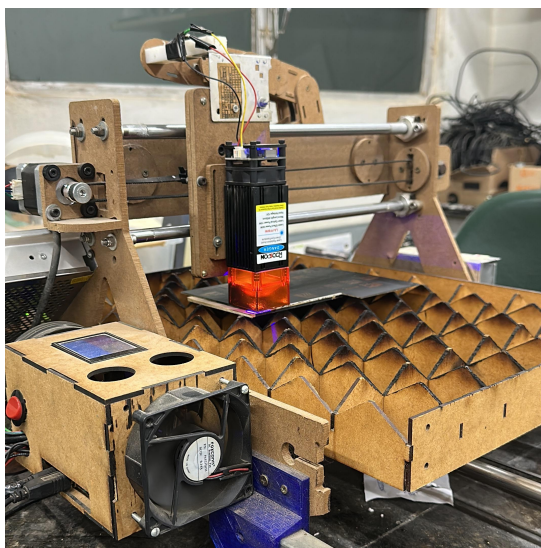
A metodologia adotada permitiu integrar teoria e prática, contribuindo para a melhoria do processo de confecção de PCI a partir das técnicas estudadas, com base em parâmetros testados e otimizados experimentalmente.

3.1 Metodologia aplicada ao LDI com dry film e Microusinagem a laser

3.1.1 CNC Laser

A CNC laser utilizada nos testes trata-se de um projeto desenvolvido e construído no IF Maker Pesqueira por um docente da instituição, com a utilização de uma placa controladora de CNC padrão como meio de coordenação e comunicação entre o ambiente virtual e a estrutura mecânica. A máquina conta com um sistema de movimentação Core-XY, a partir de dois motores estacionários que trabalham em conjunto por meio de correias. O equipamento conta com um módulo laser Rddspon modelo LA-FF80W com 80 W de potência e comprimento de onda de 445 nm. A CNC Laser pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 – CNC Laser IF Maker Pesqueira.



Fonte: Autores (2025).

3.1.2 LaserGRBL

Para o controle e alteração dos parâmetros de impressão da CNC laser, foi utilizado o GRBL na sua versão v7.14.0. Ele é um firmware de código aberto, desenvolvido em linguagem C. Sua função é gerenciar e executar o controle de movimento de máquinas CNC e outros equipamentos automatizados. Mesmo sendo gratuito e possuindo uma interface simples, o GRBL segue padrões industriais de operação, o que o tornou uma das soluções mais difundidas no meio da automação e prototipagem digital. Distribuído sob licença livre GPLv3, o projeto se destaca por sua eficiência, acessibilidade e ampla adoção de plataformas de código aberto (CARNEIRO¹ et al., 2019).

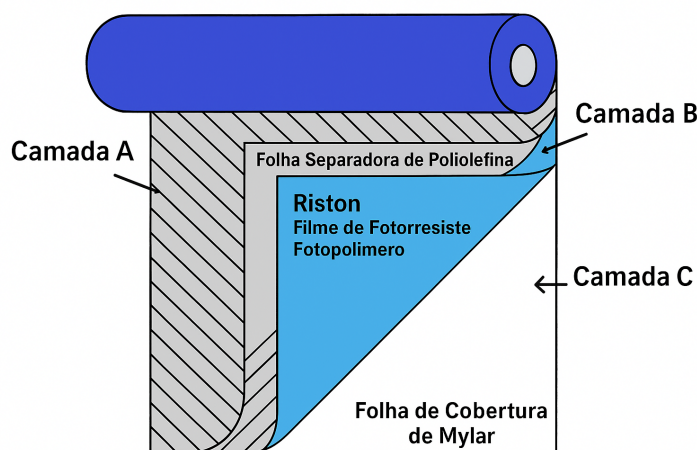
A definição dos parâmetros ajustáveis para a aplicação do método LDI a partir de uma CNC a laser foi realizada com base nas características do equipamento mostrado na Figura 4 e em suas variáveis, como a potência de emissão, a velocidade de gravação e o espaçamento entre linhas. Além disso, a ferramenta de conversão adotada foi a de rastreamento linha por linha. Outros parâmetros como brilho, contraste e clipe branco presentes no software, não foram alterados para garantir a qualidade original do design.

3.1.3 Materiais de revestimento

Dry film

O dry film, também chamado de fotorresiste negativo sólido, é uma fina película de resina fotossensível bastante utilizada na produção de circuitos impressos. Sua aplicação é relativamente simples quando comparada aos fotorresistentes líquidos, pois não requer o processo de espalhamento uniforme (*spin coating*) (SHUFU; YA; WEI, 2023). A Figura 5 a seguir mostra como é composta a estrutura do dry film:

Figura 5 – Componentes do dry film. (A) Camada de poliéster (PET) - atua como suporte de proteção mecânica; (B) Camada fotossensível - é a parte ativa do filme, responsável por resistir à corrosão; (C) Camada de polietileno (PE) - protege o filme contra poeira, riscos e danos durante o manuseio.



Fonte: Hernández et al. (2017).

A camada fotossensível contém resina acrílica alcalina, compostos fotopolimerizáveis e fotoiniciadores. Esses componentes reagem quando expostos à luz UV, formando uma rede polimérica que se fixa firmemente à superfície metálica da placa Shufu, Ya e Wei (2023).

Experimentalmente, observou-se que, para a fotopolimerização do dry film, a potência do laser não pode ser superior a 5% para um deslocamento de 1000 mm/min; caso contrário, o material é evaporado.

Tinta de uso geral

No processo de microusinagem a laser, a escolha do revestimento foi fundamentada na metodologia apresentada por Nowak et al. (2013), que define que o material deve apresentar ausência de danos térmicos nas proximidades do local de incidência do laser, proteção completa durante o ataque químico durante a corrosão do cobre e facilidade de remoção da tinta após a corrosão. Neste trabalho, foi utilizada a tinta acrílica spray preta fosca de uso geral da marca TEK BOND, a qual atende aos requisitos. Essa cor foi escolhida por apresentar maior absorção da energia do laser, menor reflexão e maior contraste quando comparada a outras cores.

Experimentalmente, observou-se que, para a evaporação da tinta, a potência do laser não pode ser inferior a 10% para um deslocamento de 800 mm/min; caso contrário, o material não é totalmente evaporado.

3.1.4 Confeção das PCIs

O processo foi iniciado com a limpeza das placas de cobre e a aplicação do material fotossensível, como mostra a Figura 6. Durante a aplicação, foi notória certa dificuldade em separar as películas protetoras do dry film; dessa forma, foi necessário imergi-lo na água, facilitando, assim, a retirada da película. O excesso de água foi re-

tirado com um raspador de silicone, e a placa foi colocada para secar por cerca de um dia. Em relatos na internet Costa (2018) aponta que esse processo de secagem pode ser acelerado caso haja uma laminadora ou um ferro de passar, desde que a temperatura seja controlada de maneira a não queimar o material. De forma semelhante, para a microusinagem a laser, as placas foram revestidas com a tinta, não sendo necessário mais de 30 minutos para a secagem total da mesma. O resultado pode ser visto na Figura 7.

Após o processo de limpeza e aplicação do dry film, foi realizado um teste preliminar para a identificação aproximada dos níveis de potência que evitam a evaporação do dry film. Para tal, um conjunto de trilhas dispostas de maneira ordenada, como mostrado na Figura 8, foi gravado na PCI com potências que variam entre 1% e 32%. Neste teste, foi possível identificar configurações básicas que melhor se adequaram ao material exposto, de maneira que sua principal função foi a identificação de em que nível de potência o material fotossensível era evaporado pelo laser, antes de partir, de fato, para o design proposto na Figura 3.

Figura 6 – Aplicação do dry film.



Fonte: Autores (2025).

Figura 7 – Aplicação da tinta spray preto fosco.

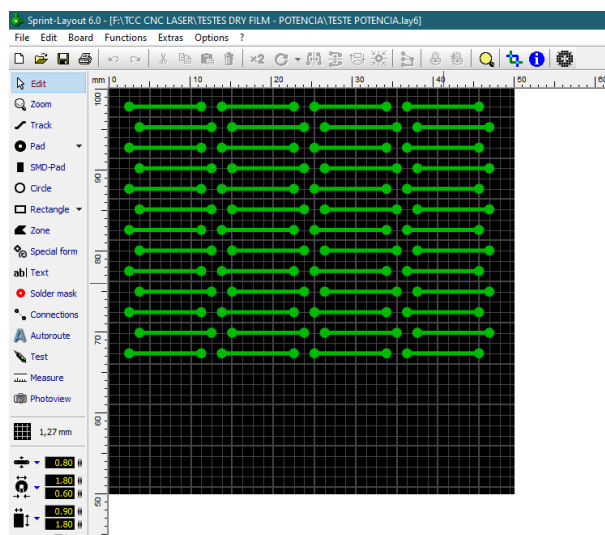


Fonte: Autores (2025).

De maneira semelhante, o mesmo foi aplicado na microusinagem a laser; porém, foi adotada uma estratégia de otimização do processo, na qual se adicionou uma borda ao redor de cada trilha, visto que, para o caso do revestimento com tinta, não é necessário remover a tinta de áreas da placa que não possuem trilhas. Essa modificação permitiu que, ao inverter a imagem durante a preparação do arquivo de usinagem, a área efetiva de extração fosse reduzida, diminuindo o tempo total de processamento e os riscos de danos térmicos ao próprio laser, seja pela operação contínua do laser em baixa potência ou pela possível reflexão do feixe na superfície metálica do cobre.

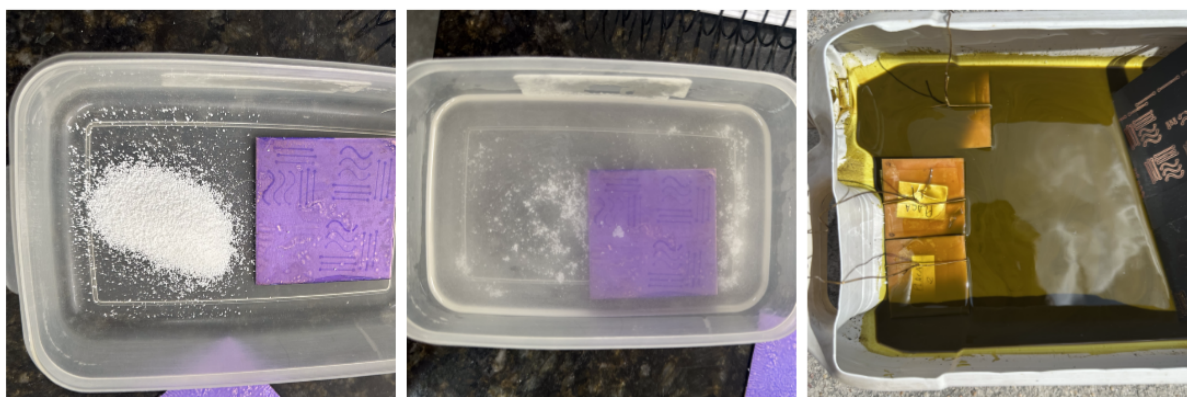
Após a exposição das placas ao laser para transferência do design da Figura 3, as placas com revestimento em dry film foram lavadas em uma solução de água e carbonato de sódio para a retirada do dry film não exposto. No caso de revestimento com tinta, esta etapa não é necessária. Em seguida, as placas foram corroídas no perclorato de ferro. Os processos são mostrados na Figura 9.

Figura 8 – Trilhas teste potência, velocidade e preenchimento.



Fonte: Autores (2025).

Figura 9 – Revelação das placas em carbonato de sódio e água e corrosão no perclorato de ferro.



Fonte: Autores (2025).

A Tabela 1 apresenta os parâmetros alterados na realização dos testes utilizando o dry film, onde para este a velocidade foi mantida constante a fim de garantir maior controle experimental e facilitar as análises. O controle ativo de potência feito pela máquina foi realizado no modo M3 (potência constante) com gravações no sentido horizontal e vertical. Já as Tabelas 2, 3 e 4 apresentam as variações dos parâmetros de potência e velocidade para a microusinagem, mantendo-se o espaçamento constante.

Tabela 1 – Parâmetros de testes com dry film.

Indicador	Potência	Velocidade	Espaçamento	Modo	Sentido
Teste 01	2%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 02	2%	1000 mm/min	8.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 03	2%	1000 mm/min	10.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 04	3%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 05	3%	1000 mm/min	8.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 06	4%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 07	4%	1000 mm/min	5.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 08	4%	1000 mm/min	15.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 09	4%	1000 mm/min	20.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 10	5%	1000 mm/min	15.000 linhas/mm	M3	Vertical
Teste 11	3%	1000 mm/min	20.000 linhas/mm	M3	Horizontal
Teste 12	3%	1000 mm/min	15.000 linhas/mm	M3	Horizontal

Fonte: Autores (2025)

Tabela 2 – Variáveis do teste A - microusinagem.

Potência	Velocidade	Espaçamento
10%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm
20%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm
30%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm
40%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm
50%	1000 mm/min	12.000 linhas/mm

Fonte: Autores (2025)

Tabela 3 – Variáveis do teste B - microusinagem.

Potência	Velocidade	Espaçamento
50%	200 mm/min	12.000 linhas/mm
50%	400 mm/min	12.000 linhas/mm
50%	600 mm/min	12.000 linhas/mm
50%	800 mm/min	12.000 linhas/mm

Fonte: Autores (2025)

Tabela 4 – Variáveis do teste C - microusinagem.

Potência	Velocidade	Espaçamento
10%	200 mm/min	12.000 linhas/mm
10%	400 mm/min	12.000 linhas/mm
10%	600 mm/min	12.000 linhas/mm
10%	800 mm/min	12.000 linhas/mm

Fonte: Autores (2025)

3.2 Metodologia aplicada a fresagem

3.2.1 Softwares

Durante a fabricação das primeiras placas no IF Maker Pesqueira, o Autodesk Eagle foi utilizado para a elaboração dos esquemas elétricos e do layout da placa. Para a geração do G-code, necessário para os processos de usinagem, como corte, furação e desenho das trilhas, foi empregada uma ferramenta externa, o GCAM, uma extensão utilizada separadamente para essa finalidade. Atualmente, esses softwares não são mais utilizados no IF Maker, uma vez que houve uma dificuldade no uso dessas ferramentas para a confecção de PCI. A troca foi feita pelo KiCad 9, FlatCAM 8.4 e UGS Platform 1.17.

O fluxo de trabalho na fresagem inicia-se com a criação do design esquemático da PCI no KiCad, software que permite a criação de esquemas eletrônicos (diagramas de circuitos) e o layout de placas de circuito impresso com nível profissional, gerando arquivos no formato Gerber (.gbr). Esses arquivos são, então, importados para os softwares FlatCAM, que convertem os arquivos de design da PCI (Gerber e Excellon) em código G, que são as instruções de movimento para a máquina, e UGS Platform, que envia o código gerado pelo FlatCAM para a máquina CNC (que geralmente usa um controlador como o GRBL) e permite controlar fisicamente o processo de fresagem e perfuração. Estes permitem a conectividade com a controladora da CNC router para que ela realize todas as instruções de movimento do equipamento nos eixos X, Y e Z, além de parâmetros como velocidade de avanço, velocidade de rotação e profundidade de corte (PY2MAJ, 2021).

O controle do processo é feito por meio do software UGS Platform, que interpreta o G-code e gerencia a operação da CNC Router. Eventuais falhas, como erros no percurso ou falhas no funcionamento do spindle, podem ser corrigidas com a execução de procedimentos simples, como o reinício controlado da conexão entre o software e a máquina, conforme descrito no POP 002 (BATISTA; BARBOSA; NETO, 2023)

3.2.2 CNC Router

A Router CNC é uma máquina controlada por computador (CNC) que usa uma fresa para cortar, gravar e esculpir materiais com alta precisão. Ela segue instruções digitais (G-code) geradas a partir de projetos de software para automatizar o processo de usinagem. É muito utilizada em marcenaria, comunicação visual e prototipagem, trabalhando com materiais como madeira, plásticos e metais leves.

É fundamental seguir corretamente os procedimentos de operação da CNC router para garantir a segurança dos operadores, a precisão do trabalho e a durabilidade da máquina. A operação realizada de maneira inadequada pode resultar em acidentes graves, danos à máquina e a peças de trabalho defeituosas. Além disso, para o bom funcionamento da CNC, é necessária a realização da limpeza periódica e da lubrificação. A Figura 10 mostra a router do IF Maker.

Figura 10 – CNC Router IF Maker Pesqueira.



Fonte: Autores (2025).

A equipe do projeto Oficinas 4.0 (2023) do Campus elaborou documentos do tipo Procedimento Operacional Padrão (POP) para a execução de tarefas e procedimentos na CNC Router do IF Maker. Tais documentos orientam os profissionais envolvidos sobre as diretrizes de atuação. Os POPs detalham os passos necessários para a execução segura e precisa de operações de usinagem CNC (BATISTA; BARBOSA; NETO, 2023).

3.2.3 Fresas

A função das fresas é remover o material indesejado das placas de circuito impresso para formar as trilhas e as ilhas (locais de conexão dos componentes). A escolha correta do tipo de fresa é crucial na fabricação de PCIs, principalmente ao utilizar CNC para fresagem. Essa decisão garante boa precisão das trilhas e furos, um acabamento limpo e menor desgaste da ferramenta.

Tomando como base a durabilidade, foram utilizadas fresas do tipo piramidal para a realização deste projeto. A fresa piramidal é um tipo específico semelhante à V-bit utilizada em routers CNC, que se destaca por sua ponta extremamente fina e sua geometria em forma de pirâmide. Elas possuem um formato cônico que termina em uma ponta muito fina, geralmente com um diâmetro de corte de 0,1 mm ou 0,2 mm,

fabricadas em metal duro (carbureto de tungstênio), proporcionando alta resistência e maior durabilidade. Além de estarem disponíveis em vários ângulos, por exemplo: 10°, 20°, 30°, 60°, 90°, que determinam a largura do sulco em relação à profundidade.

Para a realização dos testes, as fresas escolhidas foram com ângulo de 10° e diâmetros de 0,1 mm e 0,2 mm; ângulo de 20° e diâmetros de 0,1 mm e 0,2 mm; e ângulo de 45° com diâmetros de 0,1 mm e 0,2 mm, mostradas na Figura 11.

Figura 11 – Fresas utilizadas nos testes.

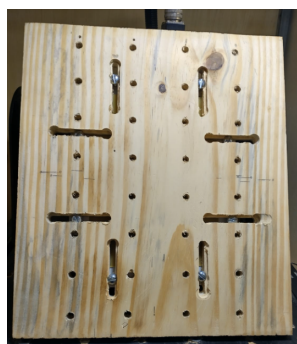


Fonte: Autores (2025).

3.2.4 Base para fixação

O processo foi iniciado com a fixação da placa de cobre a mesa da CNC Router. Observou-se que a superfície continha algumas irregularidades e, devido a isso, foi necessário criar uma base plana e regular de madeira para ser acoplada a mesa do equipamento. Foram feitos furos para fixação da nova base à mesa da CNC e fendas para fixação de placas de diferentes tamanhos, como mostrado na Figura 12a. Já a Figura 12b mostra os detalhes de como foram feitas as fendas com a intenção de proporcionar mobilidade aos parafusos, para que estes pudessem ser deslocados de acordo com o tamanho das placas que foram utilizadas nas usinagens.

Figura 12 – Base de madeira desenvolvida para fixação do material.



(a) Estrutura geral da base de madeira.

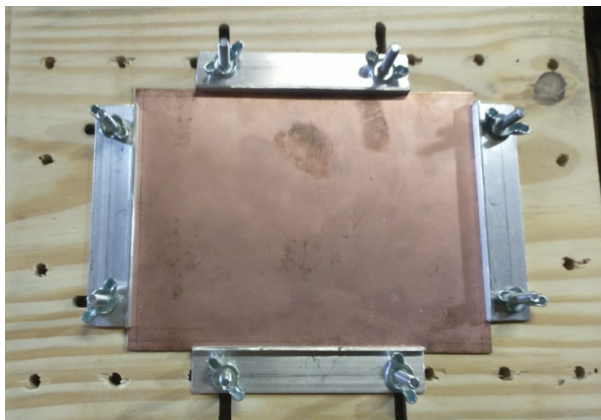


(b) Detalhe da ranhura para ajuste dos parafusos.

Fonte: Autores (2025).

Na parte superior do suporte, foi utilizado um sistema de fixação em alumínio para prender a placa, juntamente com EVA para melhor fixação e também para reduzir vibrações durante o processo de usinagem. O EVA foi posicionado tanto entre o alumínio e a placa quanto entre a placa e a base de madeira. Após a fixação adequada da placa a nova base foi então parafusada à mesa da CNC, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Placa de cobre fixada na base de madeira com sistema de fixação em alumínio.



Fonte: Autores (2025).

Nos parafusos que prendem a placa de circuito a madeira, foram utilizadas porcas borboleta para facilitar a troca rápida da placa durante os testes. Já para a fixação da base de madeira à mesa da CNC empregaram-se os mesmos parafusos originalmente utilizados no sistema padrão da máquina.

3.2.5 Confeção das PCIs

Dando início ao processo de usinagem, alguns parâmetros foram escolhidos para serem variados, esses parâmetros estão apresentados na Tabela 5. Foi variado o ângulo e o diâmetro das fresas, a profundidade do corte (cut Z) e a velocidade x - y (feedrate). Para a profundidade foi utilizada -0,06 e -0,1 mm e na velocidade x - y 60 e 80 mm/min. Esses valores foram utilizados em todas as fresas escolhidas. Após esse processo, deu-se início aos experimentos; 24 arquivos de teste foram gerados.

Para garantir a precisão na usinagem, especialmente para PCIs, utiliza-se o autonivelamento automático (auto leveling ou height mapping), Figura 14. Essa técnica mapeia a superfície da placa e permite que a máquina compense automaticamente as imperfeições do material, ajustando a altura da ferramenta (eixo Z) em tempo real, com a placa de cobre fixada e a fresa já alocada na CNC. Neste trabalho, foi verificado o nível de cobre a cada 5 mm nos eixos X e Y.

Logo após a etapa de autonivelamento, deu-se início à obtenção dos resultados experimentais, conforme apresentado na Figura 15.

Para determinar quais testes apresentaram melhor desempenho, foram avaliados o acabamento das trilhas, a presença de rebarbas e a qualidade do isolamento. Além

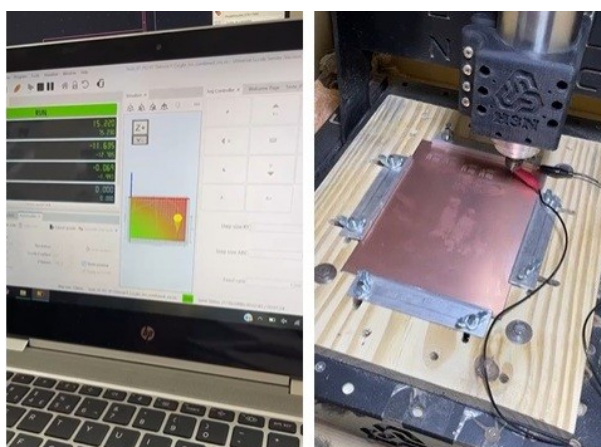
disso, realizou-se teste de continuidade para verificar possíveis curtos ou falhas de conexão.

Tabela 5 – Parâmetros de testes com fresagem.

Testes	Fresa Pirâmidal	Profundidade	Velocidade x- y
Teste 01	20° x 0,1 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 02	20° x 0,2 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 03	20° x 0,1 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 04	20° x 0,2 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 05	20° x 0,1 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 06	20° x 0,2 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 07	20° x 0,1 mm	-0,1 mm	80 mm/min
Teste 08	20° x 0,2 mm	-0,1 mm	80 mm/min
Teste 09	10° x 0,1 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 10	10° x 0,2 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 11	10° x 0,1 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 12	10° x 0,2 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 13	10° x 0,1 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 14	10° x 0,2 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 15	10° x 0,1 mm	-0,1 mm	80 mm/min
Teste 16	10° x 0,2 mm	-0,1 mm	80 mm/min
Teste 17	45° x 0,1 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 18	45° x 0,2 mm	-0,06 mm	60 mm/min
Teste 19	45° x 0,1 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 20	45° x 0,2 mm	-0,06 mm	80 mm/min
Teste 21	45° x 0,1 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 22	45° x 0,2 mm	-0,1 mm	60 mm/min
Teste 23	45° x 0,1 mm	-0,1 mm	80 mm/min
Teste 24	45° x 0,2 mm	-0,1 mm	80 mm/min

Fonte: Autores (2025)

Figura 14 – Processo de autonivelamento realizado na CNC antes da usinagem.



Fonte: Autores (2025).

Figura 15 – Testes de usinagem sendo realizados na placa de cobre.



Fonte: Autores (2025).

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da execução dos procedimentos de confecção de placas de circuito impresso pelos métodos LDI (dry film e microusinagem a laser) e fresagem mecânica, bem como a influência de parâmetros correspondentes a cada uma das técnicas aplicadas. Primeiramente, são apresentados os resultados referentes à utilização do método LDI com dry film e microusinagem a laser; em seguida, os resultados obtidos pelo método de fresagem.

4.1 Resultados do LDI com dry film

As Figuras 16a e 16b apresentadas a seguir referem-se aos testes 01, 02 e 03 da Tabela 1. Estes testes foram realizados com uma potência de 2% e o espaçamento variando entre 8.000, 10.000 e 12.000 linhas/mm. Ficou evidenciado que a energia aplicada não foi eficiente durante a exposição, de modo a garantir o endurecimento adequado do polímero, fazendo com que, durante a etapa de revelação, as trilhas expostas fossem totalmente removidas. Isso evidenciou a necessidade de aumentar a potência de modo a garantir a polimerização eficaz do dry film.

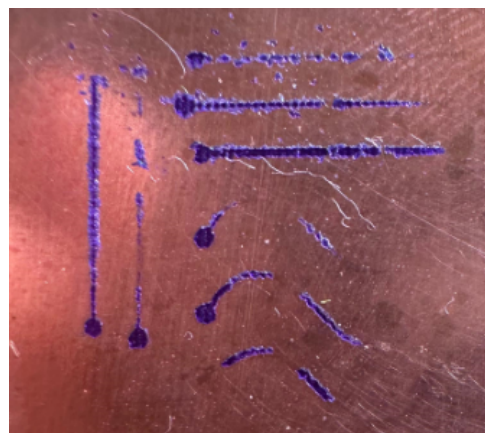
As Figuras 17a, 17b, 17c e 17d referem-se aos testes 04, 05, 06 e 07 da Tabela 1. É possível observar falhas bem acentuadas nas Figuras 17b e 17d, onde o espaçamento entre linhas apresentava menor densidade, resultando em uma exposição insuficiente. Já na Figura 17c, o aumento da potência intensificou a polimerização sem reduzir a resolução em relação ao que foi apresentado na Figura 17a.

As Figuras 18a, 18b e 18c referem-se aos testes 08, 09 e 10 da Tabela 1. Os resultados indicam que, para uma potência de 4%, tanto no espaçamento de 15.000 quanto no de 20.000 linhas/mm, foram produzidas trilhas bem definidas. Porém, houve distorções geométricas em uma parte da placa no teste com o maior espaçamento entre trilhas. Quando a potência foi elevada para 5%, observou-se a evaporação ou queima do dry film em algumas partes, comprometendo a geometria das trilhas. Isso mostra que, acima desse nível de potência, o feixe ultrapassa o limite adequado para a aplicação da técnica com dry film.

Figura 16 – Resultados testes 01, 02 e 03.



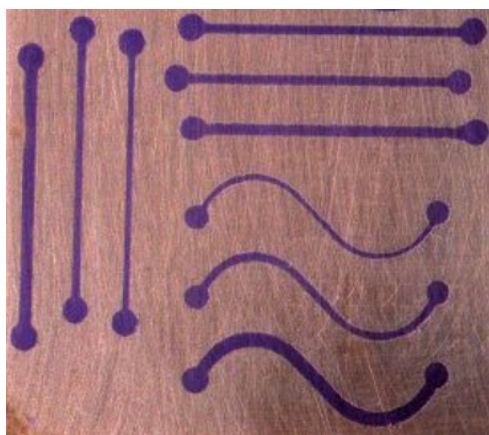
(a) Potência 2% e espaçamento 12.000 linhas/mm.



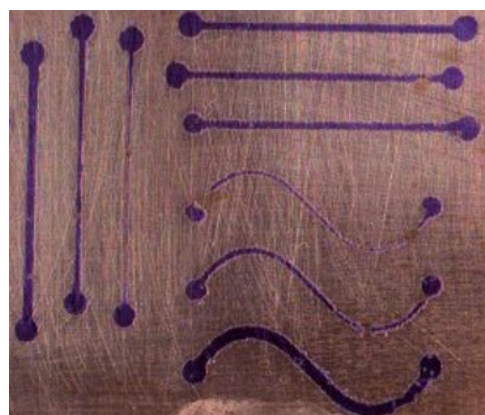
(b) Potência 2% e espaçamento 8.000 linhas/mm.

Fonte: Autores (2025).

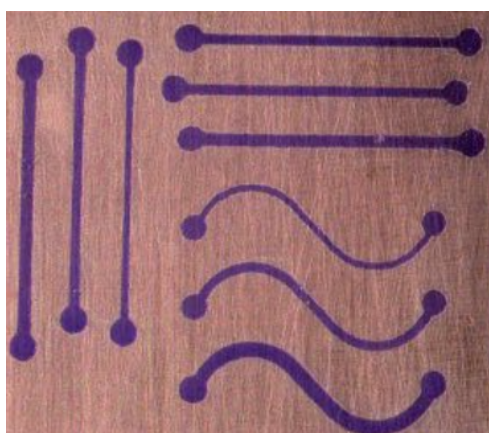
Figura 17 – Resultados testes 04, 05, 06 e 07.



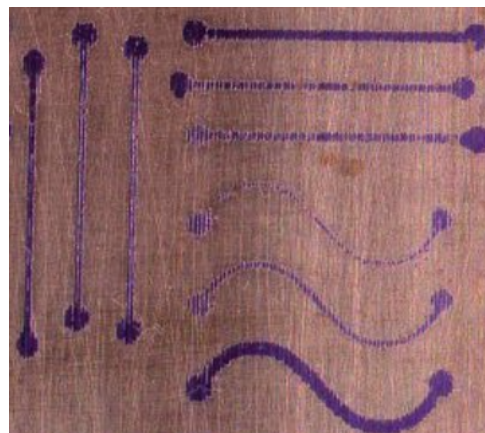
(a) Potência 3% e espaçamento 12.000 linhas/mm.



(b) Potência 3% e espaçamento 8.000 linhas/mm.



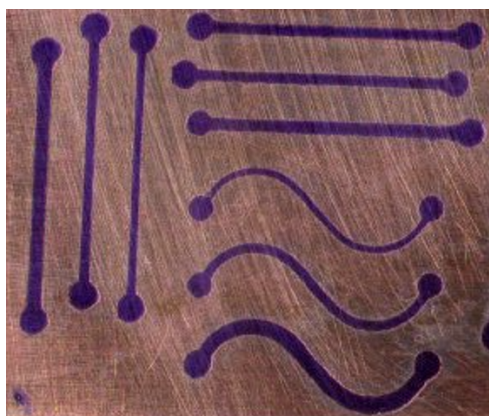
(c) Potência 4% e espaçamento 12.000 linhas/mm.



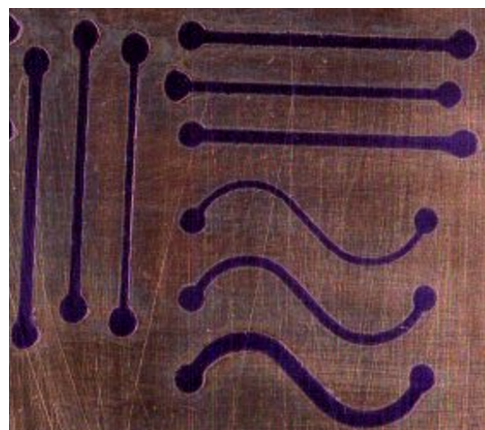
(d) Potência 4% e espaçamento 5.000 linhas/mm.

Fonte: Autores (2025).

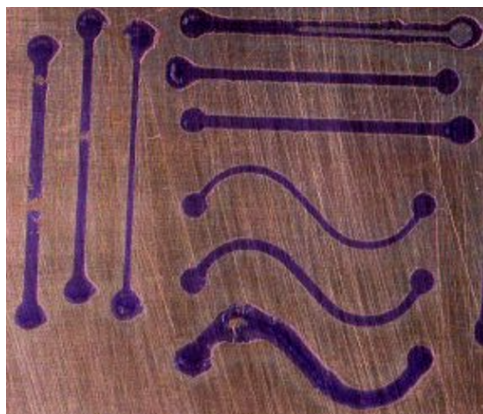
Figura 18 – Resultados testes 08, 09 e 10.



(a) Potência 4% e espaçamento 15.000 linhas/mm.



(b) Potência 4% e espaçamento 20.000 linhas/mm.



(c) Potência 5% e espaçamento 15.000 linhas/mm.

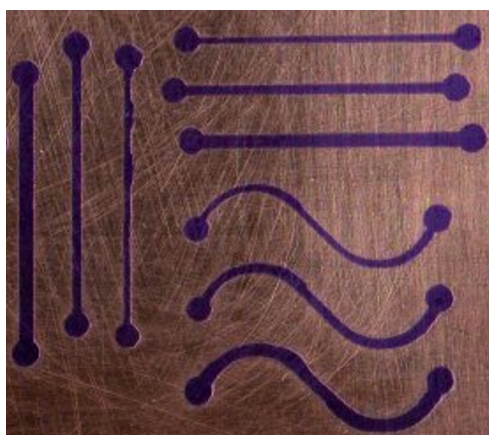
Fonte: Autores (2025).

É possível identificar que, em todos os testes apresentados nas Figuras 17 e 18, as trilhas retilíneas horizontais apresentaram, visualmente, a mesma espessura. Isso mostra que a orientação, horizontal ou vertical, adotada durante o processo de gravação influenciou diretamente a resolução da espessura das trilhas.

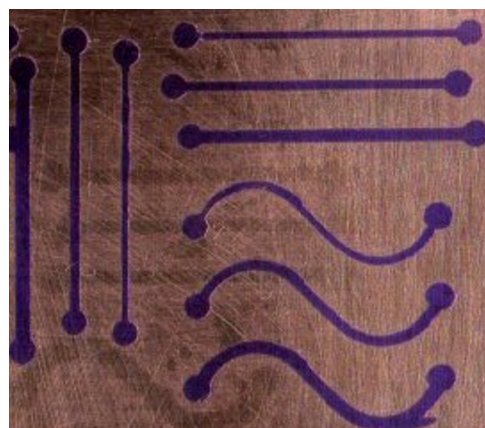
Em todos os testes anteriores, a CNC estava configurada para realizar a varredura da imagem e a gravação a laser, linha a linha, na vertical. Os próximos testes foram realizados com a varredura da imagem na horizontal, com o objetivo de observar se haveria ganho de resolução nas trilhas horizontais.

As Figuras 19a e 19b referem-se aos testes 11 e 12 da Tabela 1. É possível observar que as trilhas se apresentaram com bom acabamento e uniformidade, apresentando algumas irregularidades perceptíveis nas trilhas senoidais e na trilha de 10 mils na vertical em todos os casos. Também é notório que as trilhas horizontais, que antes apresentavam a mesma espessura, se distinguem visivelmente.

Figura 19 – Resultados dos testes 11 e 12.



(a) Potência 3% e espaçamento 20.000 linhas/mm; gravação horizontal.



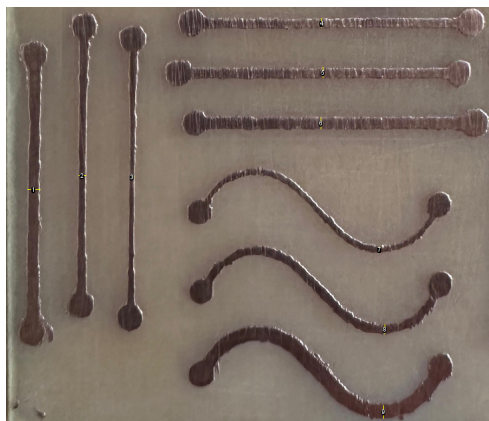
(b) Potência 3% e espaçamento 15.000 linhas/mm; gravação horizontal.

Fonte: Autores (2025).

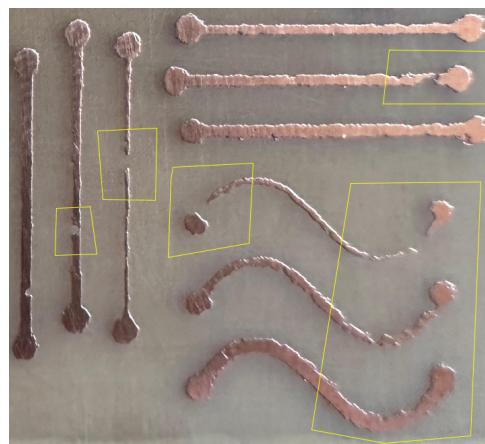
As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados das placas após o processo de corrosão do cobre não protegido pelo dry film. A concentração do percloroeto de ferro III e a temperatura da solução não foram levadas em consideração como parâmetros variáveis do sistema. Além disso, todas as placas foram corroídas no mesmo período, levando cerca de 23 minutos para que o cobre não protegido fosse totalmente removido. O controle de qualidade da corrosão foi manual, interrompendo o processo de corrosão no momento em que foi observado que todo o cobre das áreas expostas ao agente corrosivo já tinha sido removido.

Nas Figuras 20a, 20c, 21a, 21b, 22a e 22b, as trilhas analisadas foram aprovadas nos testes de continuidade e isolamento. Em contrapartida, as trilhas apresentadas nas Figuras 20b, 20d e 21c mostraram falhas que comprometeram seu desempenho, evidenciando descontinuidades e falta de integridade das trilhas.

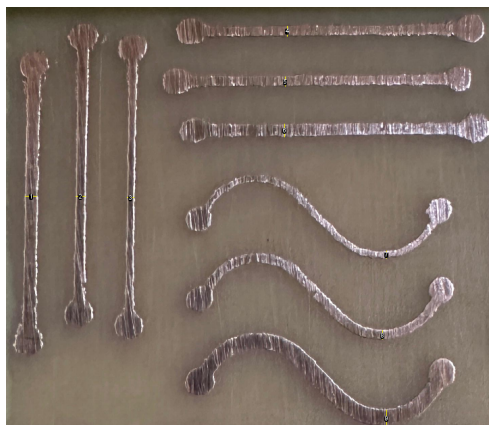
Figura 20 – Resultados após o processo de corrosão do cobre - placa 01.



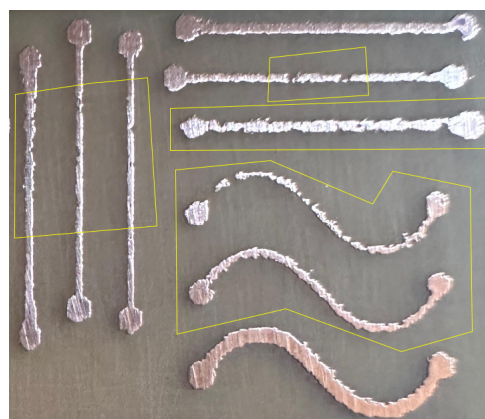
(a) Teste 04.



(b) Teste 05.



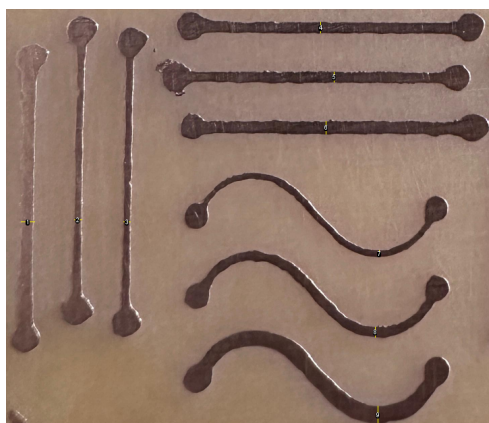
(c) Teste 06.



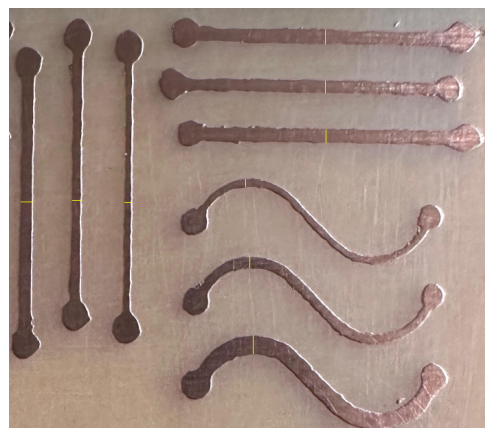
(d) Teste 07.

Fonte: Autores (2025).

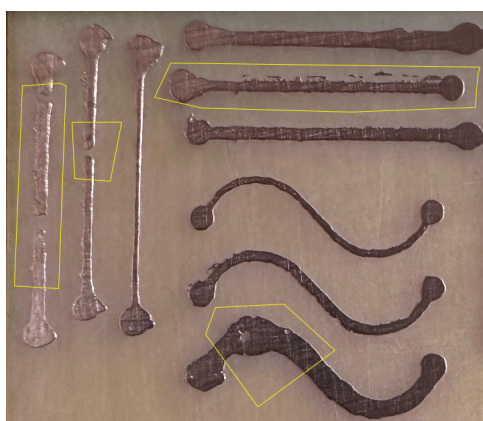
Figura 21 – Resultados após o processo de corrosão do cobre - placa 02



(a) Teste 08.



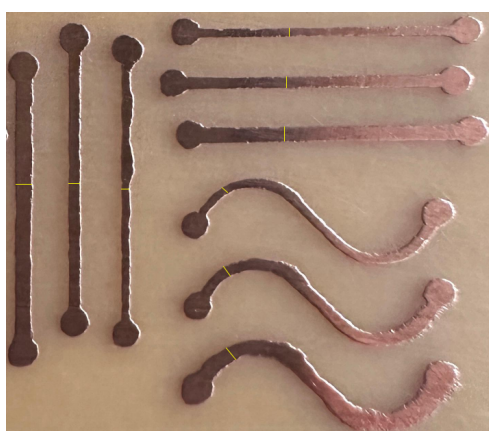
(b) Teste 09.



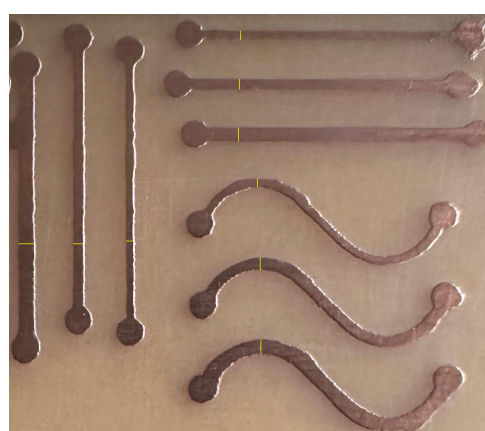
(c) Teste 10.

Fonte: Autores (2025)

Figura 22 – Resultados após o processo de corrosão do cobre - placa 03.



(a) Teste 11.



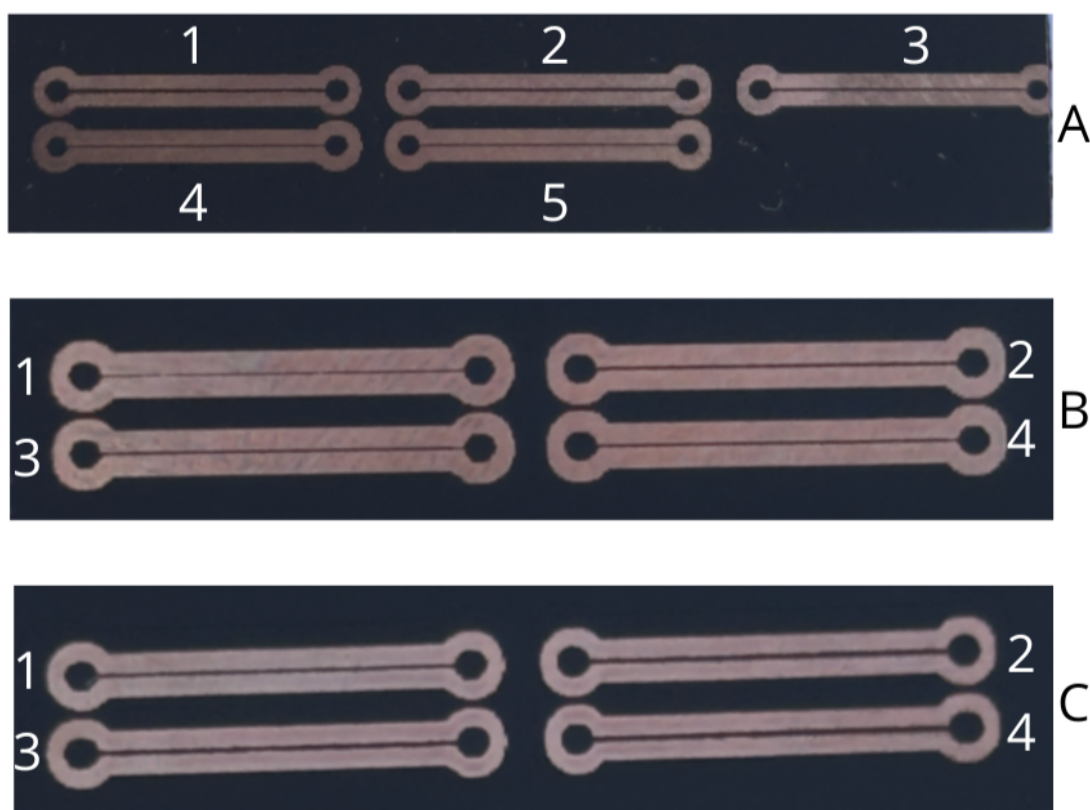
(b) Teste 12.

Fonte: Autores (2025).

4.2 Resultados da microusinagem a laser

Na Figura 23 foram realizados testes para a confecção de trilhas de 10 mils de espessura. O teste A apresenta 5 trilhas nas quais a velocidade e o espaçamento se mantiveram constantes, enquanto a potência foi variada em passos de 10% até o máximo de 50%. Nos testes B e C, a potência foi mantida em 50% e 10%, respectivamente, havendo alteração de velocidade em um intervalo de 200 a 800 mm/min, com passos de 200 mm/min. Analisando cada uma das trilhas, é possível notar que potências de laser mais elevadas ocasionaram o afinamento das trilhas, como foi visto nos testes A e B. Já o teste C, apesar de apresentar algumas pequenas variações de estabilidade (rebarbas nas bordas das trilhas), foi o que apresentou os melhores resultados, sem comprometer a espessura da trilha.

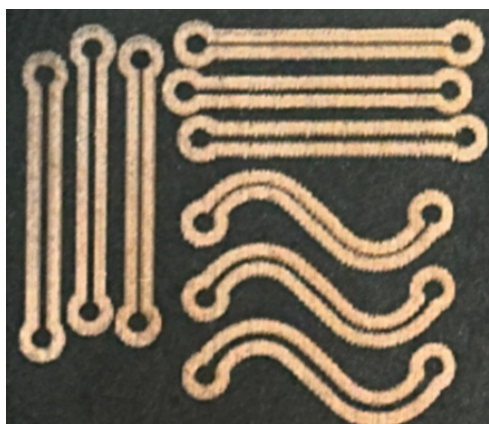
Figura 23 – Teste de potência do laser, velocidade e espaçamento microusinagem.



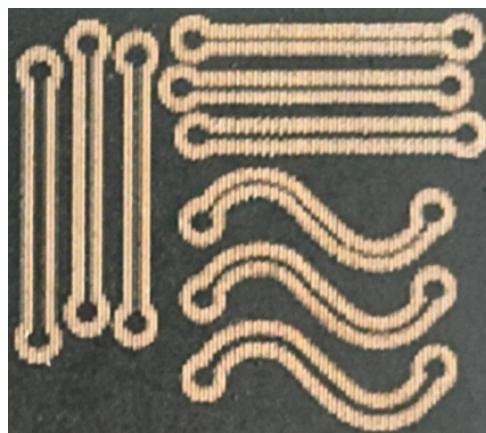
Fonte: Autores (2025).

As Figuras 24a, 24b, 24c e 24d apresentam os resultados referentes à configuração descrita na legenda. É possível observar que ambos os espaçamentos avaliados (8.000 e 5.000 linhas/mm) apresentaram falhas após a corrosão química, evidenciadas por irregularidades nas bordas, principalmente nas trilhas de 10 e 15 mils, resultando em descontinuidades das trilhas. Nota-se que o grau dessas irregularidades varia conforme o espaçamento utilizado, demonstrando que esse parâmetro exerce influência direta na qualidade final das trilhas.

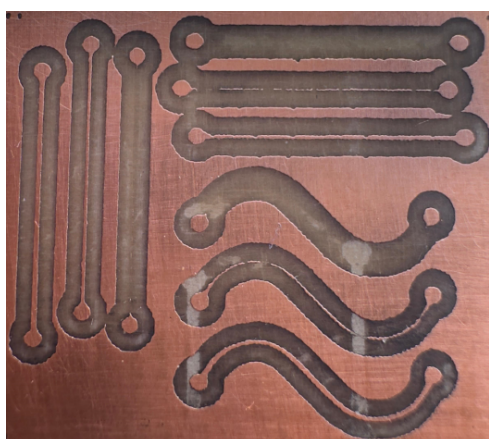
Figura 24 – Resultado da placa 1 após corrosão química.



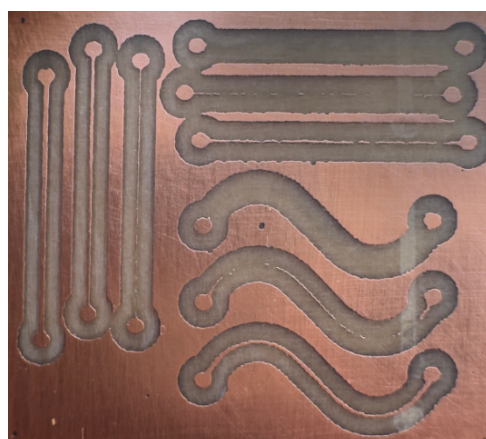
(a) Potência 10%, velocidade 400 mm/min e 8.000 linhas/mm, gravação vertical.



(b) Potência 10%, velocidade 400 mm/min e 5.000 linhas/mm, gravação vertical.



(c) Potência 10%, velocidade 400 mm/min e 8.000 linhas/mm, corroída.

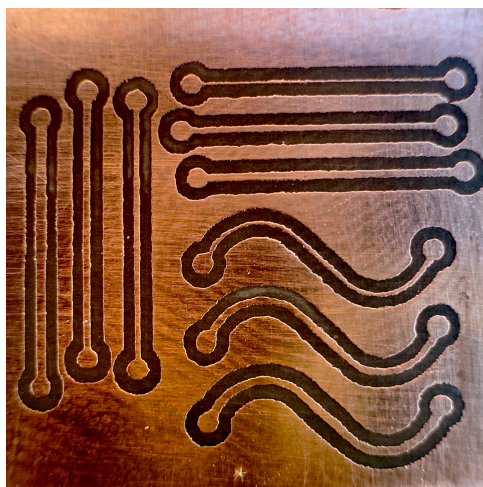


(d) Potência 10%, velocidade 400 mm/min e 5.000 linhas/mm, corroída.

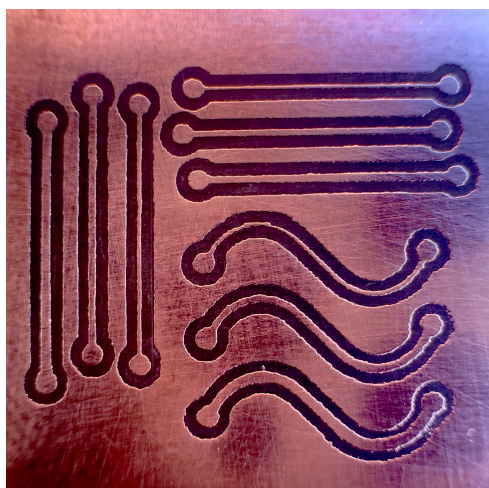
Fonte: Autor (2025).

As Figuras 25a, 25b e 25c apresentam os resultados referentes às mudanças no sentido de gravação: vertical, horizontal e diagonal, respectivamente, mantendo-se a potência, a velocidade e o espaçamento constantes. Nas orientações vertical e horizontal, observam-se irregularidades moderadas, mas sem interrupção na continuidade das trilhas. Já a gravação diagonal apresentou falhas mais evidentes nas trilhas de menor espessura, onde ocorreu a descontinuidade das trilhas.

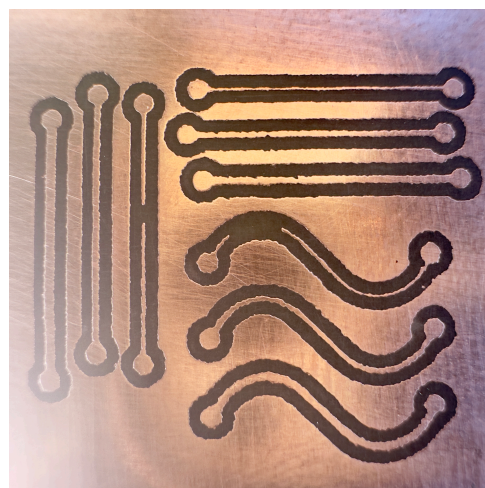
Figura 25 – Resultado da placa 1 após corrosão química.



(a) Potência 10%, velocidade 800 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação vertical.



(b) Potência 10%, velocidade 800 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação horizontal.

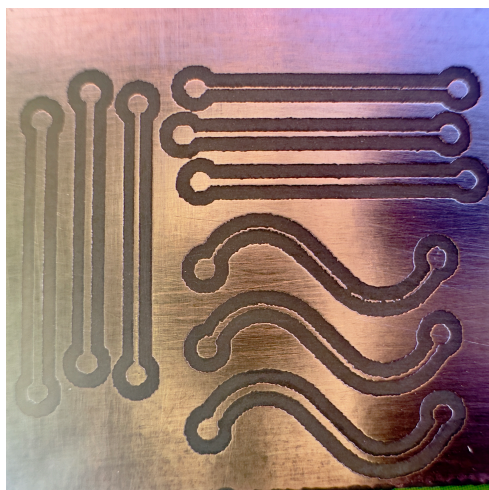


(c) Potência 10%, velocidade 800 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação diagonal.

Fonte: Autor (2025).

A Figura 26 apresenta os resultados referentes ao aumento de potência e à sua influência na qualidade das trilhas. Nas condições das Figuras 26a e 26b, as trilhas apresentaram definição satisfatória, porém com leves irregularidades nas bordas, indicando desgaste da tinta por ação térmica excessiva. Já as condições das Figuras 26c e 26d foram notórias falhas mais acentuadas e perdas na continuidade das trilhas.

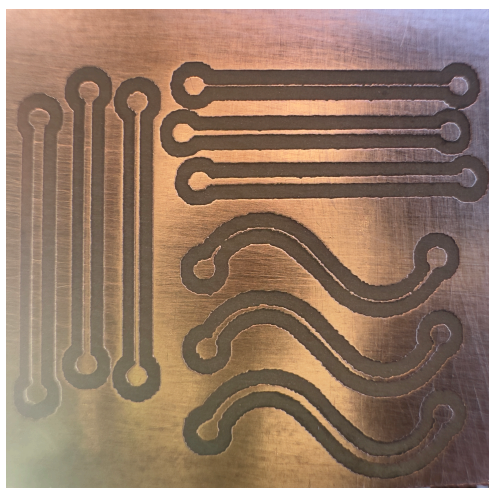
Figura 26 – Resultado da placa 2 após corrosão química.



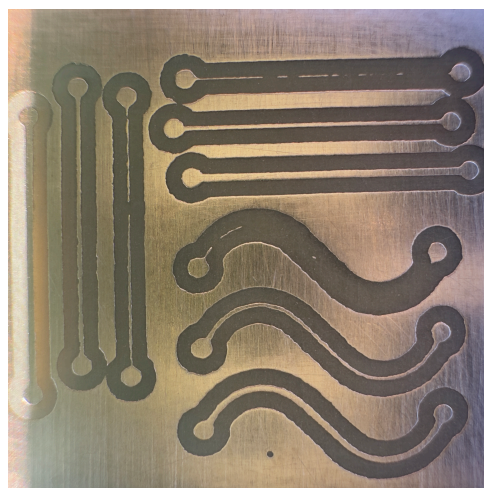
(a) Potência 50%, velocidade 600 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação vertical.



(b) Potência 50%, velocidade 800 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação vertical.



(c) Potência 60%, velocidade 800 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação horizontal.



(d) Potência 60%, velocidade 1000 mm/min e 12.000 linhas/mm, gravação horizontal.

Fonte: Autor (2025).

Nas Figuras 25a, 25b e 26b, todas as trilhas analisadas foram aprovadas nos testes de continuidade e isolamento. Em contrapartida, as trilhas apresentadas nas Figuras 26a, 26c, 26d mostraram falhas que comprometeram seu desempenho, evidenciando descontinuidades e falta de integridade nas trilhas.

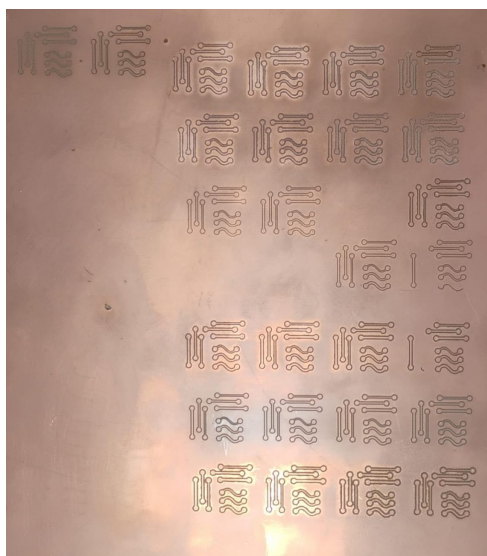
4.3 Resultados da Fresagem

Foi utilizado o design desenvolvido para a realização dos testes, definidos com os seguintes parâmetros de configuração.

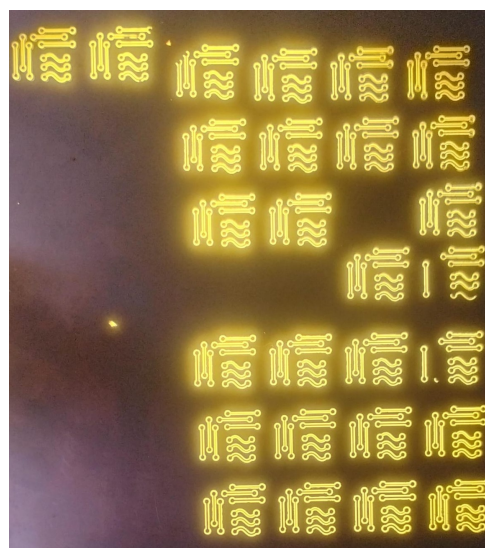
- Tipo da fresa: piramidal;
- Ângulo da fresa: 10°, 20° e 45°;
- Diâmetro da ponta: 0,1 e 0,2 mm;
- Velocidade x - y: 60 e 80 mm/min;
- Velocidade z: 35 mm/min;
- Profundidade do corte: 0,06 e 0,1 mm;
- Velocidade de rotação: 10000 rpm.

As figuras 27a e 27b apresentam a placa de circuito impresso com todos os testes que foram realizados.

Figura 27 – Testes realizados por meio da técnica de fresagem



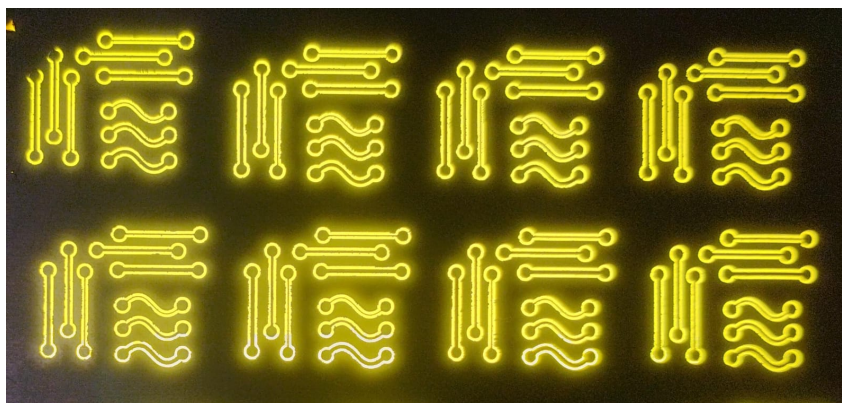
(a) Placa de circuito com os testes na face de cobre.



(b) Placa de circuito sendo iluminada pela face posterior ao cobre.

Os testes que apresentaram mais rebarbas foram os testes de 01 a 08, com as fresas de 20° x 0,1 mm e 20° x 0,2 mm conforme a Figura 28.

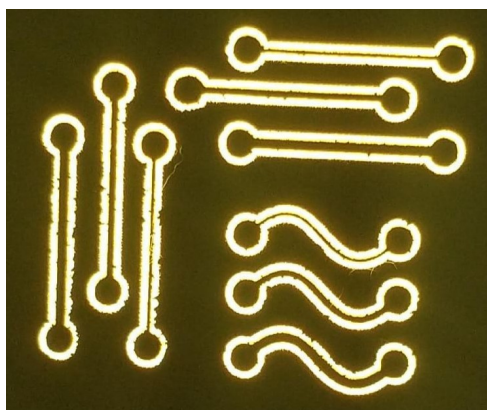
Figura 28 – Testes de 01 a 08.



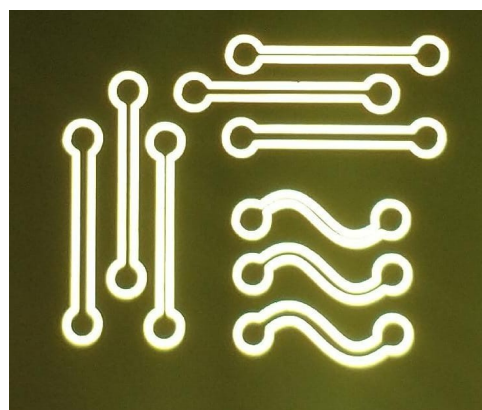
Fonte: Autores (2025).

Os testes com a fresa de $45^\circ \times 0,2$ mm apresentaram pouca rebarba, enquanto nos testes com as fresas de $10^\circ \times 0,1$ mm, $10^\circ \times 0,2$ mm e $45^\circ \times 0,1$ mm encontramos melhores resultados. Na Figura 29a é possível ver algumas trilhas de um dos testes que possuem rebarbas, comparadas a outro teste que não apresentou rebarbas.

Figura 29 – Resultado das trilhas.



(a) Trilhas com rebarbas.

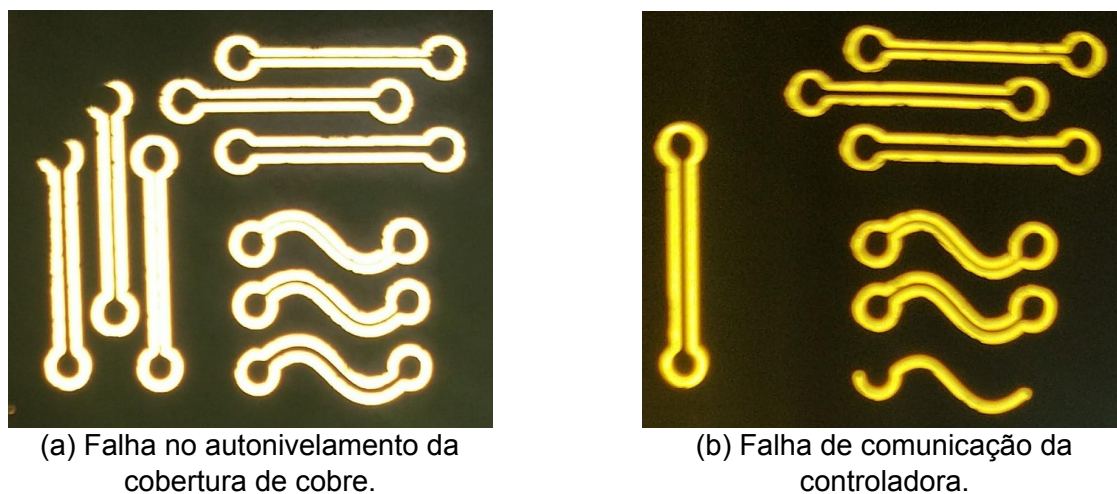


(b) Trilhas sem rebarbas.

Fonte: Autores (2025).

No Teste 5, foi possível perceber um autonivelamento irregular da placa de cobre, pois a fresa não retirou todo o cobre necessário para isolar a trilha. No Teste 15, percebemos a perda de comunicação com a CNC, não completando todos os movimentos configurados.

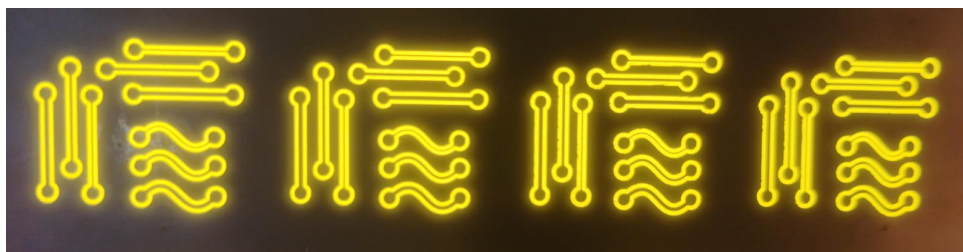
Figura 30 – Falhas.



Fonte: Autor (2025).

Realizamos também os testes de isolamento e continuidade, nos quais as trilhas de 10 mils de espessura do Teste 10 apresentaram descontinuidade. Tivemos como melhores resultados os testes 17, 19, 21 e 23 como é possível observar na Figura 31. Estes resultados foram obtidos com o uso da fresa piramidal de $45^\circ \times 0,1$ mm e apresentaram trilhas sem rebarba, passando também pelos testes de isolamento e continuidade.

Figura 31 – Testes 17, 19, 21 e 23 respectivamente.



Fonte: Autores (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS / CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos ao longo deste trabalho, foi possível avaliar de forma abrangente o desempenho e as limitações do método Laser Direct Imaging com dry film, microusinagem a laser e fresagem, baseados no uso de CNC laser e CNC Router, aplicados para confecção de placas de circuito impresso no IF Maker Pesqueira. Ressaltamos que, neste estudo, por motivos de restrição orçamentária, não foi considerada a possibilidade de aquisição de nenhum outro equipamento além dos já disponíveis no IF Maker Pesqueira. Portanto, todas as análises de desempenho se aplicam exclusivamente a tais equipamentos.

A análise sistemática dos parâmetros ajustáveis, bem como as respostas dos materiais e equipamentos, permitiu identificar não apenas a viabilidade prática de cada

técnica, mas também fatores que influenciam diretamente a qualidade final das trilhas, o tempo de processamento e o controle dimensional.

A técnica de LDI com dry film apresentou melhor desempenho utilizando uma potência entre 3% e 4%, velocidade de 1.000 mm/min, espaçamento de 15.000 linhas/mm e gravação no sentido horizontal. Para o LDI baseado na microusinagem, os melhores parâmetros foram 10% de potência, velocidade de 800 mm/min, espaçamento de 12.000 linhas/mm e gravação também na horizontal. De modo geral, verificou-se que, para ambas as técnicas, espaçamentos a partir de 12.000 linhas/mm garantem boa resolução durante a etapa de exposição.

O LDI com dry film, quando comparado as demais metodologias, foi a que exigiu parâmetros significativamente mais sensíveis e ajustes muito mais estreitos. Pequenas variações, especialmente na potência, mesmo em passos mínimos de 1%, demonstraram alterar de forma decisiva a qualidade da exposição do polímero, o que evidencia a necessidade de controle fino do processo. Além disso, verificou-se que o espaçamento entre linhas desempenha um papel fundamental na definição da resolução final, sendo capaz de impactar positiva ou negativamente o resultado, dependendo do ajuste realizado.

Embora a potência seja um parâmetro relevante, os testes mostraram que não é necessário utilizar toda a capacidade do módulo laser disponível (80 W) para a aplicação do método LDI com dry film, indicando que máquinas com potência inferior também seriam capazes de realizar o processo com eficiência. Por outro lado, notou-se um resultado inesperado durante os testes: a constatação de que o sentido de movimentação da CNC laser, seja no eixo vertical ou horizontal, afetou diretamente a espessura das trilhas dispostas horizontalmente, sendo perceptível que esse comportamento define a distribuição de energia ao longo das trilhas. Dessa forma, tornou-se evidente que a precisão do plano de movimentação XY da máquina é mais determinante para a qualidade das trilhas do que possuir um módulo laser de alta potência.

Ao avaliar as técnicas que utilizam a CNC laser foi observado que os materiais de revestimento influenciaram os resultados. No caso do LDI com dry film, verificou-se que as condições de transporte e armazenamento provocaram falhas de uniformidade no polímero, resultando em áreas com ausência parcial do material e, consequentemente, trilhas falhadas após a revelação e corrosão. Diante dessa limitação, recomenda-se a realização de novos testes com tinta fotossensível, que possui o mesmo princípio ativo do dry film. Essa recomendação é reforçada pelo fato de que não foram encontrados estudos aplicando o dry film em CNC a laser, e sim somente utilizando equipamentos específicos para LDI baseados em sistemas galvanométricos, mais adequados para exposição precisa. Já a microusinagem a laser apresentou maior estabilidade, tanto na aplicação mais simples da tinta quanto pela maior flexibilidade nos ajustes de parâmetros, produzindo resultados mais consistentes.

Outro aspecto importante observado refere-se ao uso do perclorato de ferro já diluído, uma variável que não foi tratada como parâmetro de teste por uma questão de restrição de tempo, mas que demonstra potencial influência nos resultados, tendo em vista que a concentração, a temperatura e o tempo de exposição da placa à solução podem acarretar no afinamento das trilhas ou na formação de irregularidades nas bordas.

Durante a realização dos testes na CNC Router surgiram alguns problemas que dificultaram a execução dos mesmos. Um deles foi a má fixação da placa de circuito impresso na CNC, causando vibração da placa durante a usinagem. Para diminuir a vibração, fizemos uma base de madeira com um sistema de fixação em alumínio. O que reduziu consideravelmente a vibração da placa.

O outro fato foi que a CNC Router do laboratório apresentou algumas inconsistências na execução dos comandos programados e, devido a isso, precisou passar por manutenção, o que impossibilitou a segunda tentativa de realização do teste 16, que apresentou falha por perda de comunicação com a CNC e não completou os movimentos configurados. Até o momento da entrega deste trabalho, a CNC Router encontra-se em manutenção.

A configuração de fresagem identificada como mais eficiente foi adotada no IF Maker Pesqueira para a produção de placas para o projeto Rede Inova Solar: fresa piramidal de 45° com diâmetro da ponta de 0,1 mm.

O LDI demonstra ser uma alternativa de baixo custo quando comparado à fresagem, especialmente para projetos que exigem uma solução econômica tanto em termos de equipamentos quanto de insumos. Materiais utilizados no processo químico, como dry film e tinta de uso geral foram adquiridos por aproximadamente R\$ 80,00, valor significativamente inferior ao das fresas, cujo conjunto utilizado neste estudo custou cerca de R\$ 150,00, aumentando o custo operacional da fresagem. Além disso, equipamentos a laser adequados ao LDI podem ser encontrados por valores em torno de R\$ 1200,00, enquanto fresadoras apropriadas para usinagem de PCIs apresentam custo inicial mais elevado, partindo de aproximadamente R\$ 4000,00, o que torna o LDI adequado para prototipagem acessível quando o laboratório ainda não tiver os equipamentos disponíveis.

Observou-se ainda que a técnica de fresagem apresenta uma limitação na densidade de trilhas, pois a menor distância possível entre trilhas é determinada pelo diâmetro da fresa. Esse fator destaca o potencial do LDI, que, teoricamente, permite uma maior densidade de trilhas, já que o processo químico de corrosão não impõe essa restrição mecânica. Assim sendo, recomenda-se que estudos futuros investiguem qual é a densidade máxima de trilhas alcançável com o LDI baseado na CNC laser do IF Maker Pesqueira.

No geral, as três técnicas avaliadas demonstraram boa resolução e viabilidade para a produção de protótipos de PCI. Os resultados obtidos indicam que a fresagem apresentou melhor acabamento superficial, com bordas mais regulares e trilhas mais limpas quando comparada ao LDI com dry film e à microusinagem a laser.

REFERÊNCIAS

- BARBUCHA, R; KOCIK, M et al. Comparison between conventional and laser method of imaging tracks on PCB. v. 6598, p. 103–108, 2007.
- BARBUCHA, Robert; MIZERACZYK, Jerzy. Recent progress in direct exposure of interconnects on PCBs. **Circuit World**, Emerald Group Publishing Limited, v. 42, n. 1, p. 42–47, 2016.

BATISTA, Ygo Neto; BARBOSA, João Victor Alves; NETO, Luiz Leite.

Procedimentos Operacionais Padronizados: POPs CNC Router IF Maker

Pesqueira. [S.l.: s.n.], 2023. Repositório online. Disponível em:

<https://1drv.ms/f/s!AuNzKMjUo5uVhL41wEKdaR045Le96Q>. Acesso em: 25 jun. 2025.

BEZERRA, Tamires Pimentel. **Desenvolvimento de modelos matemáticos para avaliação de processos corrosivos em placas de circuito impresso**. 2019. Tese (Doutorado) – PUC-Rio.

BRAGA; RABELO; CARDOSO, 2012. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO, 2012.

CARNEIRO¹, Larissa Vanile Santos et al. PLOTTER THOMPSON, 2019.

CHOI, JH. Some Fundamental Aspects of UV Laser Direct Imaging. **Circuit World**, MCB UP Ltd, v. 21, n. 4, p. 18–21, 1995.

COSTA, Deriks Karlay Dias et al. Protótipo de impressão de PCI usando laser, para prototipagem em laboratório. Universidade Federal do Pará, 2019.

COSTA, Rodrigo. **CONFECCIONANDO PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI) COM DRY FILM - MÉTODO FOTOGRÁFICO**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=qN0sPk-DxQo>. Acesso em: 08 de maio de 2025.

GONZALEZ, B Joel et al. A low-cost, open-source maskless photolithography stepper for microfabrication. **arXiv preprint arXiv:2510.15082**, 2025.

HERNÁNDEZ, R et al. Study of photosensitive dry films absorption for printed circuit boards by photoacoustic technique. **International Journal of Thermophysics**, Springer, v. 38, n. 8, p. 114, 2017.

KLOTZBACH, Udo et al. Laser micromachining. In: FABRICATION and Characterization in the Micro-Nano Range: New Trends for Two and Three Dimensional Structures. [S.l.]: Springer, 2011. P. 29–46.

MELO, Paulo Roberto de Sousa; RIOS, Evaristo Carlos Silva Duarte; GUTIERREZ, Regina Maria Vinhais. Placas de circuito impresso: mercado atual e perspectivas. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2001.

NOWAK, MR et al. Laser prototyping of printed circuit boards. **Opto-Electronics Review**, Springer, v. 21, n. 3, p. 320–325, 2013.

PURCHIARONI, Stefano. **INCREDIBLE: Make PCB with LASER!!!!** [S.l.: s.n.], 2022.

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=h-6Fr1l5vco>. Acesso em: 22 de abril de 2025.

PY2MAJ. **TUTORIAL GERBER x CNC x PCB - Fresando parte não cobreada do PCB - Convertendo G-CODE no FLATCAM**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=TlFHCkn5Yo>. Acesso em: 11 de maio de 2025.

SHUFU, JIANG; YA, WU; WEI, ZHENG. Research progress of photosensitive dry film related technologies. **Journal of Technology**, Shanghai University of Applied Technology Editorial Department of Journal of ..., v. 23, n. 1, p. 38–42, 2023.

SUWANDI, Dedi. Dry film photoresist application to a printed circuit board (PCB) using a maskless photolithography method. Engineering Archive, 2020.

UEMATSU, Teruhiro. High sensitivity dry film photoresist for laser direct imaging system, p. 1036–1039, 2001.

UV LIGHT USINAGEM DE PCB/PCI. **O QUE SÃO ARQUIVOS GERBER?** [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em:

<https://uvlight-solutions.com/home/o-que-sao-arquivos-gerber-.html>.

Acesso em: 02 de fevereiro de 2025.

VERBELEN, Yannick; VAN BELLE, Davy; TIETE, Jelmer. Experimental analysis of small scale pcb manufacturing techniques for fablabs. **nternational Journal of Engineering Innovations and Research**, v. 2, n. 2, p. 136, 2013.