



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA**

INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

BACHARELADO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS

FRANCISCA MICHELLE DE CASTRO GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE PLACAS
DE CIRCUITO IMPRESSO: FOTOTRANSFERÊNCIA COM LUZ UV VERSUS
FRESAGEM CNC**

REDENÇÃO-CE

2024

FRANCISCA MICHELLE DE CASTRO GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE PLACAS
DE CIRCUITO IMPRESSO: FOTOTRANSFERÊNCIA COM LUZ UV VERSUS
FRESAGEM CNC**

Monografia apresentada como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energias, na Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-
Brasileira, UNILAB – Campus das Auroras.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olímpio
Moura Carneiro

REDENÇÃO-CE

2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-
Brasileira Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Gomes, Francisca Michelle de

Castro.G633a

Análise comparativa de métodos de fabricação de placas de
circuito impresso: fototransferência com luz UV versus fresagem
CNC

/ Francisca Michelle de Castro Gomes. - Redenção, 2024.
60f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De
Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da
Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira,
Redenção, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro.

1. fresagem CNC (Controle Numérico Computadorizado). 2.
fototransferência com luz UV. 3. Placas de Circuito
Impresso (PCI). I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.91

FRANCISCA MICHELLE DE CASTRO GOMES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE FABRICAÇÃO DE PLACAS
DE CIRCUITO IMPRESSO: FOTOTRANSFERÊNCIA COM LUZ UV VERSUS
FRESAGEM CNC**

Trabalho de Conclusão de Curso, na modalidade monografia, apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Energias, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira, Campus das Auroras, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Energias.

Data de aprovação: 18/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Olímpio Moura Carneiro (Orientador)

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Humberto Ícaro Pinto Fontinele

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

Herivelton Alves De Oliveira

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

“Dedico este trabalho a Deus e à minha família,
especialmente ao meu marido, Anderson Duarte, pelo apoio e amor”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, fonte inesgotável de bênçãos que tem iluminado minha jornada, concedendo-me força, persistência e resiliência para perseguir incansavelmente meus sonhos.

Este trabalho é dedicado a Anderson Duarte, meu grande amor. Sua presença constante em minha vida é marcada pela compreensão, paciência, amor e cumplicidade.

Aos meus pais, Neta e Edice, manifesto minha eterna gratidão pela presença marcante nos momentos difíceis, pelo apoio incansável e pela fé inabalável em minha capacidade.

Estendo minha homenagem aos meus avós e tias-avós, cujo legado de carinho e sabedoria permanecerá para sempre em meu coração.

Aos tios Nilson, Andréia e Fátima, aos primos Michael e Michaelle, e cunhada Priscila agradeço por serem uma extensão amorosa da minha família, compartilhando a alegria e os desafios desta jornada.

Aos amigos que caminharam ao meu lado durante este percurso acadêmico, agradeço pela amizade sincera e pelo apoio mútuo.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para esta fase enriquecedora da minha vida.

RESUMO

Esta pesquisa comparou dois métodos de fabricação de Placas de Circuito Impresso (PCI): fototransferência com luz UV e fresagem CNC, avaliando fatores como tempo de produção e custo. Para a fabricação e simulação, foram utilizados os softwares Proteus® e GRBL Plotter®, utilizando o mesmo circuito para os dois métodos. O método de fototransferência foi executado e se mostrou uma opção econômica e eficiente para a prototipagem de circuitos simples, oferecendo um tempo de produção rápido e custos reduzidos. Apesar de apresentar limitações em circuitos mais detalhados, como pequenas falhas nas trilhas em áreas com exposição irregular à luz UV, o método é ideal para projetos de baixo custo. Já a fresagem CNC, simulada no GRBL Plotter®, destacou-se por especialmente eficiente para circuitos complexos, devido à remoção mecânica do cobre, o que resultou em trilhas bem definidas e consistentes. No entanto, o elevado custo inicial do equipamento, somado à necessidade de manutenção regular e substituição de fresas, torna a CNC menos viável para pequenas produções. Portanto, conclui-se que a fototransferência é mais indicada para prototipagem rápida e econômica, enquanto a fresagem CNC é ideal para projetos que exigem maior precisão e detalhamento técnico.

Palavras-chave: Fototransferência; fresagem; fabricação; Circuito.

ABSTRACT

This research compared two methods of manufacturing Printed Circuit Boards (PCB): phototransfer with UV light and CNC milling, evaluating factors such as production time and cost. For manufacturing and simulation, the Proteus® and GRBL Plotter® software were used, using the same circuit for both methods. The phototransfer method was implemented and proved to be an economical and efficient option for prototyping simple circuits, offering fast production time and reduced costs. Despite having limitations in more detailed circuits, such as small flaws in the tracks in areas with irregular exposure to UV light, the method is ideal for low-cost projects. CNC milling, simulated in GRBL Plotter®, stood out as being especially efficient for complex circuits, due to the mechanical removal of copper, which resulted in well-defined and consistent tracks. However, the high initial cost of the equipment, coupled with the need for regular maintenance and replacement of cutters, makes CNC less viable for small productions. Therefore, it is concluded that phototransfer is more suitable for fast and economical prototyping, while CNC milling is ideal for projects that require greater precision and technical detail.

Key words: phototransfer; milling; manufacturing; Circuit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Placa de circuito impresso	18
Figura 2 -	Componentes de PCI	19
Figura 3 -	Trilhas de uma PCI	20
Figura 4 -	Jumper em uma placa.....	22
Figura 5 -	A caneta para circuito impresso	24
Figura 6 -	Substrato revestido de cobre	25
Figura 7 -	Distribuição de luz na superfície.....	26
Figura 8 -	Método de fototransferência	27
Figura 9 -	Fotopolímeros positivo e negativo	28
Figura 10 -	Máquina de fresagem CNC em operação	29
Figura 11 -	Remoção de cobre na placa realizado por CNC.....	30
Figura 12 -	Estrutura em blocos do funcionamento de uma CNC	31
Figura 13 -	Placa com cobre indesejável removido usando CNC	31
Figura 14 -	Curva de tempo de corrosão por quantidade de cobre	33
Figura 15 -	Demonstração de componentes PTH em uma placa	35
Figura 16 -	Demonstração de componentes SMD em uma placa.....	35
Figura 17 -	Preparação da placa	40
Figura 18 -	Metodologia de confecção da PCI	40
Figura 19 -	Placa em drybox	41
Figura 20 -	Layout da placa	42
Figura 21 -	Processo de cura do fotoresistente	42
Figura 22 -	Placa mergulhada na barrilha leve	43
Figura 23 -	Processo de corrosão da placa	43
Figura 24 -	Processo de soldagem dos componentes	45
Figura 25 -	Código G	46
Figura 26 -	Esquemático e layout do circuito amplificador. (a) esquemático e (b) layout	48
Figura 27 -	Resultado do fotolito	49
Figura 28 -	Placa com layout	50
Figura 29 -	Placa depois da corrosão	50
Figura 30 -	Circuito projetado no software Protheus	53
Figura 31 -	Demonstração da forma de onda do circuito entrada e saída....	54
Figura 32 -	Teste do circuito da PCI.	54
Figura 33 -	Simulação no GRBL Plotter.....	55
Figura 34 -	Placa PCI com os componentes.	58

LISTA DE TABELA

Tabela 01- Precisão do método	51
Tabela 02 - Qualidade final do método	52
Tabela 03 - Tempo de produção dos métodos.....	56
Tabela 04 - Custo de fabricação da PCI	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI - Circuito Integrado

CNC - Controle Numérico Computadorizado

FeCl₃ - Percloroeto de Ferro

IPC - Instituto para Conectividade e Encapsulamento de Circuitos Eletrônicos

PCB - Placas de circuito impresso

PCI - Placas de circuito impresso

PH - Potencial hidrogeniônico

PTH - Montagem técnica através de furo

SMD - Dispositivos de montagem em superfície

SMT - Tecnologia de montagem de superfície

UV - Luz ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Placas de circuito impresso	18
2.2	Método de fabricação de Placas de Circuito Impresso com Caneta de Tinta	24
2.3	Fototransferência Com Luz UV	25
2.4	CNC - Controle Numérico Computadorizado	29
2.5	Técnica de corrosão com $FeCl_3$	32
2.6	Componentes PTH e SMD	34
2.7	Esquemático e Simulação	36
3	METODOLOGIA	38
3.1	Desenvolvimento da placa de teste	38
3.2	Fabricação da PCI pelo método de fototransferência com luz UV	39
3.2.1	Processo de corrosão química da camada de cobre	44
3.3	Processos de posicionamento dos componentes e soldagem manual	44
3.4	Processo de simulação da CNC	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Desenvolvimento da placa de teste	48
4.2	Fototransferência	49
4.2.1	Processo de corrosão química da camada de cobre	50
4.2.2	Análise de precisão do método de fototransferência com luz UV	51
4.2.3	Análise de qualidade do método de fototransferência com luz UV	51
4.3	Simulação	52
4.3.1	Simulação e fabricação real do circuito no método de Fototransferência com Luz UV	52
4.3.2	Processo de simulação da CNC	55
4.4	Comparação dos métodos em pequena escala	55
4.4.1	Tempo de produção	55

4.4.2 Custo da fabricação	57
4.5 Processo de posicionamento dos componentes e soldagem manual para a placa fabricada no método de fototransferência.....	58
5 CONCLUSÃO	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

As placas de circuito impresso (PCI) são componentes fundamentais na fabricação de dispositivos eletrônicos, pois possibilitam a conexão de diversos elementos eletrônicos de forma eficiente e organizada. Dada a importância das PCIs na indústria eletrônica, a escolha do método de fabricação mais adequado é importante para garantir qualidade, custo-benefício e viabilidade técnica. A função de uma placa de circuito impresso numa montagem é dupla: ao mesmo tempo em que serve de suporte para os componentes que formam o circuito também faz a sua interligação ou conexão elétrica, de acordo com a maneira que estes componentes devem operar (NEWTON, 2024).

O uso de placas de circuito impresso é datado da década de 30, quando foi utilizada para aplicação em um rádio, pelo engenheiro austríaco Paul Eilser, utilizando de uma placa de material isolante com trilhas de cobre, muito semelhante à PCIs de fenolite, utilizadas hoje em dia. Contudo o uso de PCIs em larga escala começou durante a segunda guerra mundial, onde eram necessários a utilização de comunicadores que funcionassem de forma confiável, até mesmo em ambientes adversos. Após o fim da segunda guerra houve diversos avanços e descobertas quanto a componentes eletrônicos, que impulsionam ainda mais a popularização o uso de placas de circuito impresso nas mais diversas aplicações (ALCÂNTARA et al., 2015).

Entre os métodos mais utilizados para a fabricação de PCIs, está a fototransferência com luz ultravioleta (UV) e a fresagem CNC (Controle Numérico Computadorizado) destacam-se por suas abordagens distintas e características únicas.

Segundo Varteresian (2002), um dos primeiros passos na fabricação de uma placa de circuito impresso é a criação do layout para cada camada de sinal da placa. Esse layout é representado por plotagens simples em escala (tamanho real) das camadas de sinal.

No método de fototransferência com luz UV a remoção seletiva do cobre com processos de corrosão requer a corrosão do cobre indesejado, enquanto protege o cobre desejado do agente de corrosão. Essa proteção é fornecida por

um revestimento de polímero, chamado de fotorresistente, depositado na superfície do revestimento de cobre. O polímero fotorresistente é inserido no formato do circuito impresso desejado por meio de um processo chamado fotolitografia, que também é um método de fabricação de PCIs. O revestimento padronizado protege as áreas selecionadas do cobre do agente de corrosão, expondo o cobre a ser removido (MITZNER, 2009).

O processo de fototransferência com luz UV também é considerado uma técnica tradicional, que envolve a criação de um layout do circuito em um material fotossensível aplicado à placa de cobre. A placa é então exposta à luz UV através de uma máscara, solidificando as áreas desejadas do layout. Após a exposição, a placa é revelada e o cobre não exposto é removido por meio de um processo de corrosão química. Este método é amplamente apreciado por sua capacidade de produzir circuitos com resolução e precisão consideráveis, sendo amplamente utilizado em laboratórios e pequenas fábricas para a produção de protótipos.

A fresagem é uma alternativa à gravação. Para fresar a placa, uma máquina de controle numérico computadorizado (CNC) é programada com o mapa digital da placa e remove o cobre indesejado. O cobre indesejado pode ser removido para isolar as ilhas e as trilhas do cobre da placa. Retira apenas o cobre suficiente para isolar as trilhas do cobre da placa reduz o tempo de fresagem, mas pode aumentar ou diminuir a impedância das trilhas dependendo da largura ou tamanho da mesma (MITZNER, 2009).

Em contraste a fototransferência com luz UV, a fresagem CNC oferece uma abordagem mais moderna e mecanizada para a fabricação de PCIs. Utilizando uma máquina CNC, a placa de cobre é esculpida diretamente, de acordo com o layout do circuito definido, removendo o material excedente e criando as trilhas do circuito. Este método elimina a necessidade de produtos químicos e é valorizado por sua precisão mecânica e flexibilidade na fabricação, permitindo ajustes rápidos e uma redução no tempo de produção, especialmente em pequenas escalas em séries.

A PCI tanto constitui substrato mecânico para os componentes eletrônicos que formam o circuito (resistores, capacitores, circuitos integrados, transistores,

diodos e componentes magnéticos) como realiza, devido às trilhas de cobre, o contato elétrico entre esses elementos. Convém observar que as propriedades elétricas do circuito estão intimamente ligadas ao dimensionamento dessas trilhas, mais especificamente à sua largura, espessura e espaçamento (MELO et al., 2001).

A relevância deste estudo está na necessidade crescente de identificar métodos de fabricação que sejam não apenas eficientes, mas também sustentáveis para o meio ambiente e economicamente viáveis para diferentes escalas de produção. Este trabalho tem como objetivo comparar esses dois métodos de fabricação de PCIs, fabricando uma placa pelo método de fototransferência e simulando a produção no caso da fresagem CNC, analisando suas vantagens e desvantagens em termos de custo, e tempo de produção, com foco na produção de protótipos em pequena escala.

1.2 JUSTIFICATIVA

A fabricação de placas de circuito impresso (PCIs) é uma etapa necessária para o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. Diante dos diferentes métodos disponíveis, é fundamental identificar o processo que oferece o melhor em relação ao equilíbrio entre custo e tempo.

Este trabalho propõe avaliar dois métodos utilizados para a fabricação de PCIs: o método de fototransferência com luz UV e o método de fresagem CNC. A comparação se justifica pela relevância de ambos os métodos, considerando os contextos acadêmicos e industriais, bem como suas diferentes exigências de equipamentos, materiais e habilidades técnicas.

O circuito escolhido para este estudo possui características que o tornam ideal para a análise: simplicidade no design da PCI, facilidade de montagem e baixa complexidade do circuito eletrônico. Essas características permitem uma avaliação prática e direta dos métodos em termos de tempo de fabricação e custos envolvidos. Essa simplicidade do circuito facilita tanto a obtenção dos componentes necessários quanto nos testes de validação do circuito, usando equipamentos como multímetros e osciloscópios. No entanto, neste trabalho, foi

realizada apenas a fabricação pelo método de transferência com luz UV assegurando a execução do experimento dentro dos recursos disponíveis. Já no caso do método CNC, o processo foi limitado à simulação, sem a produção física da placa.

Dessa forma, este trabalho acadêmico contribui na identificação do método mais eficiente entre os dois abordados para a fabricação de PCIs, oferecendo suporte para decisões técnicas futuras em projetos eletrônicos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

- Analisar os métodos de fabricação de placas de circuito impresso (PCI) para pequena escala de produção utilizando fototransferência com luz UV e fresagem CNC, comparando suas vantagens e desvantagens em termos de custo e tempo de produção.

1.3.2 Objetivos Específicos

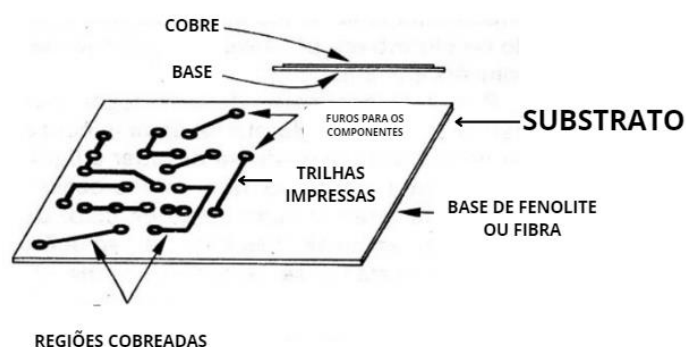
- Apresentar os conceitos existentes dos métodos fototransferência e fresagem;
- Analisar o tempo de produção das através dos métodos de fototransferência e fresagem;
- Analisar a precisão e a qualidade do circuito produzido pelo método de fototransferência.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Placas de circuito impresso

Uma PCB (Printed circuit board) ou PCI (Placa de circuito impresso) consiste em duas partes básicas: um substrato (a placa) e suas trilhas impressas (os traços de cobre), conforme apresentado na figura 01. O substrato fornece uma estrutura que mantém fisicamente os componentes do circuito e as suas trilhas impressas no lugar e fornece isolamento elétrico entre partes condutoras. Um tipo comum de substrato é o FR4, que é um laminado de fibra de vidro/epóxi. É semelhante a tipos mais antigos de placas de fibra de vidro, mas é resistente a chamas. Os substratos também podem ser feitos de Teflon, cerâmica e polímeros especiais (KRAIG, 2009).

Figura 1- Placa de circuito impresso.



Fonte: Adaptado de Newton (2024).

A PCI é um componente básico, utilizado em toda a indústria eletrônica, sendo constituída por uma placa (ou cartão) onde são impressas ou depositadas trilhas de cobre. Enquanto a placa se comporta como um isolante (dielétrico), as trilhas têm a função de conectar eletricamente os diversos componentes e as funções que representam (MELO et al., 2001).

Os PCB constituem um componente estratégico muito importante para produtos eletrônicos. Portanto, não é nenhuma surpresa que a indústria mundial de PCB seja um mercado em expansão (KHANDPUR, R. S, 2005).

A fabricação de placas de circuito impresso (PCI) é um processo importante no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos. A escolha do método de fabricação impacta diretamente na qualidade, no custo e no tempo de produção. Diversos métodos de fabricação de PCIs têm sido aprimorados ao longo dos anos, variando desde técnicas manuais para pequenas produções, como gravação de trilhas com caneta, método da fita adesiva ou processos fotográficos, até processos automatizados para grandes escalas industriais, como silkscreen e método CNC.

Uma gama de métodos evoluiu para anexar componentes a PCBs. As combinações de métodos escolhidos para um produto têm um impacto substancial no custo final, facilidade de montagem, disponibilidade de componentes, facilidade de teste e facilidade de retrabalho, conforme apresentado na Figura 2, observa-se os componentes e seus diferentes tipos de terminais. As cinco combinações básicas de fixação são: somente furo passante, furo passante misturado com montagem de superfície em um lado, montagem de superfície apenas em um lado, montagem de superfície em ambos os lados e montagem de superfície em ambos os lados com furo passante (COOMBS, 2008).

Figura 2 - Componentes de PCI.



Fonte: Adaptado de Queiroz (2022).

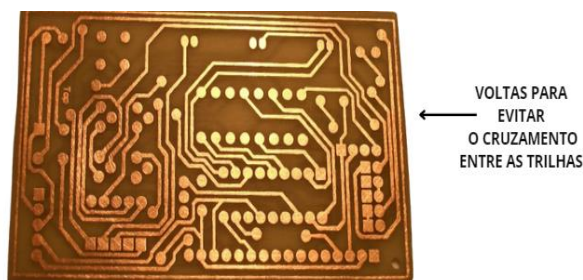
A ampla utilização das placas de circuito impresso (PCI) começou por volta de 1943, quando foram aplicadas em equipamentos de rádio destinados ao uso militar. Esses dispositivos eram altamente resistentes para suportar as

condições adversárias impostas pelo cenário de guerra. Posteriormente, com a descoberta dos semicondutores e a criação do transistor, as PCIs conseguiram avanços tecnológicos expressivos, principalmente no que se refere aos métodos de fabricação (SOUZA et al., 2018).

Uma evolução natural ocorreu em diversas áreas. Componentes menores foram desenvolvidos e tornaram-se popular, basicamente destinado a diminuir o tempo entre a falha da unidade e o reparo, devido a fácil substituição. O uso de componentes de menores dimensões no projeto de equipamentos eletrônicos deu origem a uma nova técnica de roteamento e montagem entre componentes, que é popularmente conhecida como placa de circuito impresso. A placa de circuito impresso fornece tanto a estrutura física para montagem quanto segurando componentes eletrônicos, bem como a interconexão elétrica entre os componentes (KHANDPUR, 2005).

Nem sempre o processo de fabricação de uma placa de circuito impresso é realizado com uma simples transferência das trilhas condutoras para uma placa de cobre. Em muitos casos, o projeto deve partir de um diagrama esquemático que não contém a disposição dos componentes, exigindo, portanto, um planejamento cuidadoso para definir o layout das trilhas antes de transferi-las para a placa. Um dos desafios nesse processo é garantir que as trilhas de cobre, que funcionam como os fios condutores na PCI, não se cruzem. Diferentemente de fios convencionais, as trilhas em um PCI não podem se sobrepor, conforme apresentado na Figura 3 a seguir. Logo, o que torna necessário um planejamento estratégico e habilidades técnicas para organizar o circuito de forma eficiente, evitando problemas de sobreposição e garantindo o correto funcionamento do projeto (NEWTON, 2024).

Figura 3 - Trilhas de uma PCI.



Fonte: Adaptado Guse (2024).

PCBs de face única (Single sided) custam menos do que as de dois lados, ou seja, de duas faces (Double sided). Projetar a placa com um circuito de um lado pode reduzir muito o custo da placa. No entanto, com componentes de tecnologia de montagem de superfície (SMT), um design de dois lados pode ter um custo geral menor. Quando o design é mais complexo, o posicionamento dos componentes se torna mais crítico. Os componentes devem estar organizados de modo que eles forneçam o roteamento de trilha mais curto e eficiente possível. O custo e o tamanho do circuito, bem como o nível de tecnologia, determinarão se o design precisa ser face unilateral ou aumentado para face bilateral (BAY AREA CIRCUITS, 2016).

As placas unilaterais são fabricadas principalmente pelo método de impressão e gravação, ou pela técnica de corte, usando uma matriz que carrega uma imagem do padrão de roteamento das trilhas e a matriz é fotogravada ou gravada à máquina (KHANDPUR, R. S, 2005).

Normalmente, os componentes são usados para saltar sobre trilhas condutores, mas se isso não for possível, o jumper fios são usados. O número de fios jumper em uma placa não pode ser aceito além de um pequeno número por razões económicas, resultando na necessidade de placas múltiplas camadas (KHANDPUR, R. S, 2005).

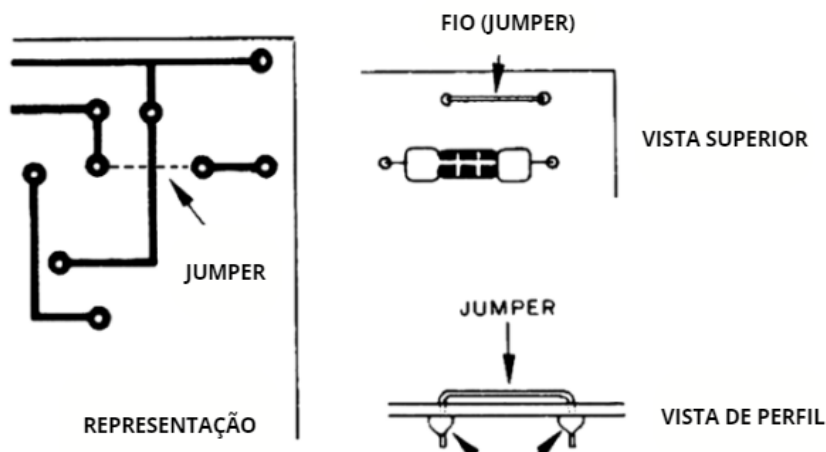
Uma placa de dupla face, por exemplo, possui o cobreamento em suas duas faces, neste caso as trilhas de cobre condutoras podem ser Impressas dos dois lados. Para fazer a ligação das trilhas na parte superior (as vezes chamadas de top) com as trilhas da face inferior (as vezes chamadas de bottom), pode-se utilizar os furos metalizados ou mesmo os jumpers.

A placa com montagem técnica através de furo (PTH) de dupla face possui circuitos em ambos os lados de um substrato isolante, que são conectados metalizando a parede de um orifício no substrato que cruza o circuito em ambos os lados. Essa tecnologia, que é a base para a maioria dos circuitos impressos produzidos, está se tornando popular em casos em que a complexidade e densidade do circuito são altas (GUSE, 2024).

Em casos de circuitos complexos, onde não se consegue obter o não cruzamento das trilhas, é possível contornar este problema com algumas

soluções. Pode-se utilizar o jumper, que é um pedaço de fio que passa “por cima ou por baixo” da placa, conforme mostra a figura 4. Interligando dois pontos distintos do circuito, fazendo a função de trilha.

Figura 4 - Jumper em uma placa.



Fonte: Adaptado de Newton (2024).

PCBs de dupla face (Double sided) permitem a instalação de mais componentes e roteamento mais apertado. Projetos com circuitos mais complexos em uma placa de um lado são mais simples quando uma camada adicional é colocada. O design de dupla face se presta a ter um lado com traços correndo principalmente em uma direção e o outro lado 90 graus diferente. Isso permite que solte facilmente uma via e siga em uma direção diferente na placa. O posicionamento cuidadoso dos componentes, com roteamento eficiente do bloco de circuito, é crítico para um layout de contagem de vias baixo e organizado. Muitos roteadores automáticos básicos funcionam dessa maneira, sendo esta é uma ferramenta comumente presentes nos softwares de projeto e simulação. Quando a ferramenta de roteamento automático não consegue realizar o melhor resultado, o layout manual torna-se melhor. O design de dupla face também pode dar a chance de fazer uso de boas técnicas de aterramento e plano de energia, o que é necessário para projetos de alta frequência. Montar componentes em ambos os lados de uma PCB pode ter muitos benefícios, como a redução do tamanho da placa (BAY AREA CIRCUITS, 2016).

Independentemente de utilizarmos uma placa de circuito impresso (PCI) de face simples ou dupla, durante o processo de desenvolvimento do design da PCI, é fundamental considerar certos cuidados ao projetar as trilhas e a posição dos componentes no circuito. O distanciamento adequado entre as trilhas, especialmente nas proximidades de circuitos de alta potência, e outros aspectos relacionados, são determinantes para evitar incompatibilidade eletromagnética ou capacitâncias indesejadas, que podem comprometer o funcionamento do circuito. Para assegurar a eficiência no design das PCIs, foram estabelecidos padrões específicos, dentre os quais se destaca o padrão da IPC.

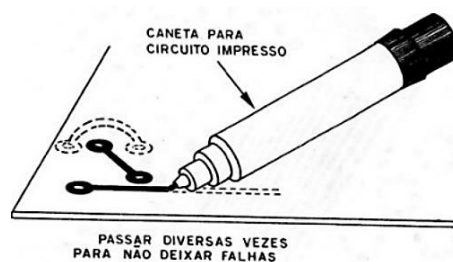
O IPC é a organização comercial global que representa determinados aspectos da indústria, incluindo design, fabricação de placas impressas e montagem e teste de eletrônicos. O padrão principal do IPC, que abrange o design de PCB, é o IPC-2221, “Padrão Genérico para Design de Placas Impressas”. O IPC também fornece padrões para fabricantes, que fornecem especificações para desempenho e aceitabilidade, incluindo IPC-6011, “Especificação Genérica de Desempenho para PCBs”, IPC-6012, “Especificação de Qualificação e Desempenho para Placas Impressas Rígidas” e IPC-A-600H, “Aceitabilidade de Placas de Circuito Impresso” (BAY AREA CIRCUITS, 2016).

O mundo das PCIs, que tradicionalmente utiliza o processo subtrativo, no qual camadas de material são removidas para criar o design, provavelmente passará por uma transição para um processo aditivo, no qual o material é adicionado camada por camada para formar a estrutura desejada. Também pode se esperar um aumento na utilização de circuitos flexíveis e uma evolução para PCB mais ecológicos, sem a utilização de chumbo, por exemplo. Previsivelmente, os vários tipos de placas de circuito impresso, tanto as que existem atualmente como as que serão desenvolvidas, manterão a sua função como parte essencial da electrónica e, em alguns casos, poderão até alcançar um lugar mais significativo na indústria eletrônica (KHANDPUR, R. S, 2005).

2.2 Método de fabricação de Placas de Circuito Impresso com Caneta de Tinta

Os conjuntos mais comuns para a elaboração de placas de circuito impresso utilizam canetas especiais desenvolvidas especificamente para esse fim. Conforme ilustrado na Figura 5. Essas canetas possuem uma tinta especial que adere facilmente à película de cobre, mas não é corroída pelo percloroeto de ferro. A composição exata da tinta utilizada nas canetas para a elaboração de placas de circuito impresso pode variar conforme o fabricante, mas geralmente é formulada com os seguintes componentes: resinas, pigmentos ou corantes, solventes, aditivos e agentes de proteção (NEWTON, 2024).

Figura 5 – A caneta para circuito impresso



Fonte: Adaptado Newton (2024).

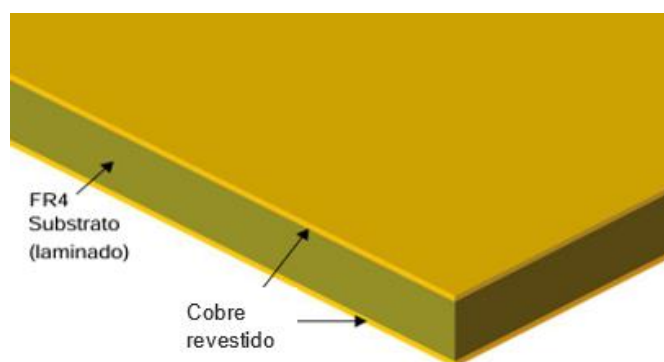
O desenho das regiões ou tiras condutoras pode ser feito ou copiado diretamente na placa utilizando-se a caneta. É fundamental ter extremo cuidado ao utilizar a caneta, garantindo que sua tinta seja aplicada de maneira uniforme nas áreas que devem ser cobertas, pois qualquer falha no processo pode resultar em interrupções nas tiras condutoras (NEWTON, 2024).

A placa deve estar bem limpa antes da utilização da caneta. Após o desenho ser feito na placa, ela pode ser colocada no banho de percloroeto pelo tempo necessário para a corrosão das áreas não cobertas pela tinta. O montador deve acompanhar o processo de perto. Após a corrosão, a placa deve ser lavada em água corrente e a tinta removida com um algodão embebido em acetona, benzina ou outro solvente equivalente. Os processos de acabamento e furação da placa são realizados posteriormente (NEWTON, 2024).

2.3 Fototransferência Com Luz UV

Um dos processos utilizado para a obtenção de uma PCI é conhecido como “subtrativo” e tem como ponto de partida um laminado, que sofre prensagem com uma folha de cobre sobre uma ou ambas as faces, esse processo também é utilizado no método de fototransferência com luz UV, conforme se pretenda obter uma placa de simples ou dupla face. Logo, a Figura 6 apresenta um substrato revestido de cobre em ambas as faces (MELO et al., 2001).

Figura 6- Substrato revestido de cobre.



Fonte: Adaptado de Mitzner (2009).

A transferência de imagem envolve basicamente a transferência do padrão condutor do fotolito para o material base revestido de cobre ou qualquer outro laminado revestido de metal (KHANDPUR, 2006).

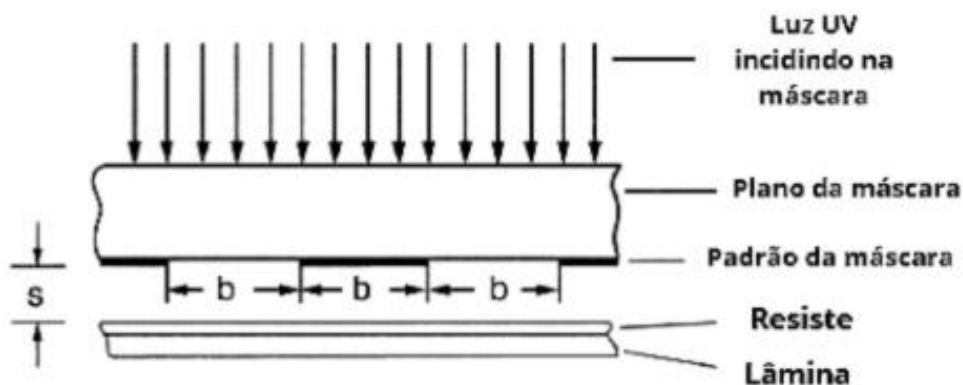
Esse método é bastante utilizado para produção de placas com várias cópias de PCIs. Primeiro, cria-se uma matriz (chamada de fotolito), que é uma imagem do circuito a ser produzido. Essa matriz é colocada sobre a placa de circuito impresso virgem, junto com substâncias especiais, e, através de um processo fotográfico, a imagem do desenho é transferida para a placa. (NEWTON, 2024).

Após o alinhamento do fotolito com a placa, o fotoresiste ou photo resist, substância aplicada na placa, é exposto à luz ultravioleta (UV) de alta intensidade. No fotoresiste positivo, a luz UV torna as áreas expostas mais solúveis, permitindo que essas regiões sejam removidas no processo

subsequente, criando o padrão desejado para a fabricação do circuito. Esse processo de exposição é importante para permitir etapas posteriores, como a deposição de filmes finos, corrosão ou dopagem do material. Nos métodos de impressão por contato e proximidade, a resolução da imagem transferida é limitada pela difração da luz. Esse fenômeno ocorre quando a luz passa pela borda de uma área opaca na máscara, espalhando-se e, assim, suavizando ou distorcendo as bordas da imagem. Esse efeito pode comprometer a precisão da fabricação, especialmente quando se trabalha com padrões muito pequenos, onde a resolução é fundamental. (SOUZA, 2008).

Erros no alinhamento da máscara com a lâmina podem ocorrer devido à falta de uniformidade no plano da lâmina ou outras distorções no alinhamento. Conforme ilustrado na Figura 7, a distribuição típica da intensidade da luz incidente sobre a superfície de um fotoresiste é alterada após passar por uma máscara composta por uma grade periódica, que possui áreas opacas e transparentes (SOUZA, 2008).

Figura 7 – Distribuição de luz na superfície.



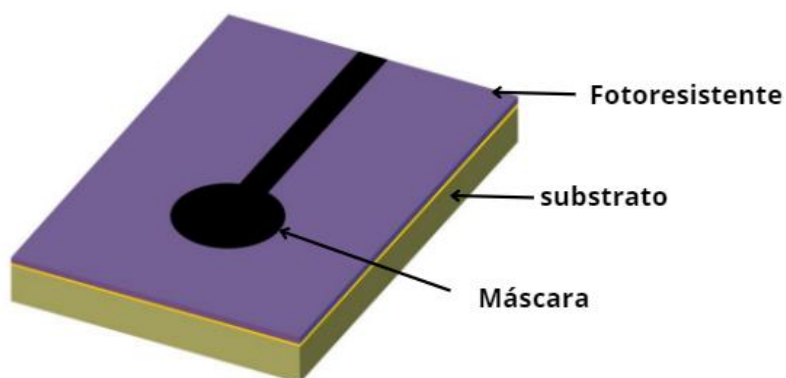
Fonte: Adaptado do Souza (2008).

A imagem fotográfica é transferida para um laminado revestido de cobre pela técnica de serigrafia. Esta técnica tem sido usada há muito tempo para impressão de tecidos, painéis e assim por diante, e atinge seu grau máximo de precisão quando aplicada à fabricação de PCI. A técnica é particularmente adotada para impressão e gravação de baixo custo e placas impressas

revestidas, quando a resolução e definição finais não requerem muita exatidão (KHANDPUR, 2005).

O processo em questão ocorre utilizando um polímero fotossensível, na forma de tinta ou filme (mais utilizado na indústria), que é aplicado sobre a superfície de um substrato, formando uma fina camada, conforme mostrado na Figura 8. No caso do uso da tinta, para garantir uma camada fina e uniforme, o substrato é submetido a um processo de centrifugação, sendo posteriormente sujeito a um procedimento de secagem em forno com temperatura controlada (DUARTE, 2017).

Figura 8 – Método de fototransferência



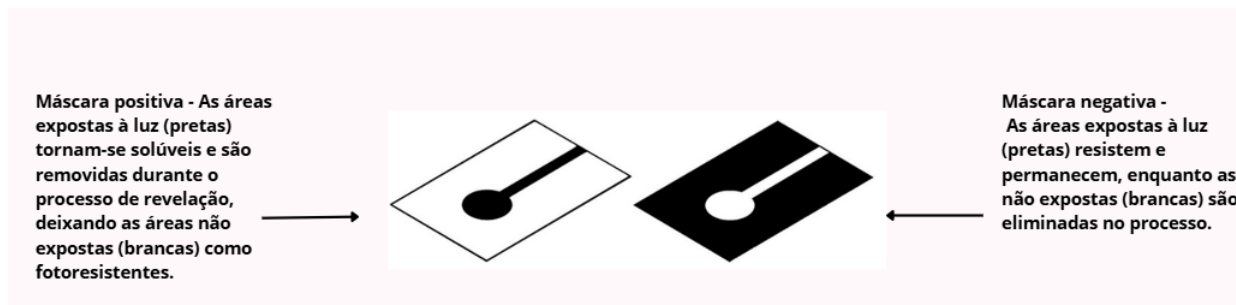
Fonte: Adaptado de Mitzner (2009).

Após a secagem, o substrato é exposto a radiação UV, quando as regiões expostas são sensibilizadas rapidamente. essa etapa faz-se uso de um fotolito que contém os padrões gráficos dos circuitos a serem produzidos. A agilidade do procedimento dar-se em virtude de que, ao absorver a radiação UV ocorrem modificações do tipo positivas ou negativas nas cadeias poliméricas da tinta (ou filme) exposta (DUARTE, 2017).

Quando submetido ao processo de revelação, as regiões do polímero que foram expostas a radiação comportam-se de maneira oposta àquelas não expostas. Dessa forma, os fotopolímeros podem ser do tipo positivo ou negativo, quando positivo as regiões não expostas são removidas na revelação, por outro lado, quando negativo ocorre o contrário, ou seja, na revelação remove-se as

regiões do polímero que foram expostas a radiação UV, conforme apresentado na Figura 9 a seguir (DUARTE, 2017).

Figura 09 - Fotopolímeros positivo e negativo.



Fonte: Adaptado de Mitzner (2009).

Na sequência, é feita a limpeza química do cobre, que recebe uma camada de material sensível à luz ultravioleta, conhecido como fotoresistente. Em seguida, procede-se à deposição de um filme que reproduz a morfologia do circuito desejado, sendo este exposto à luz ultravioleta (revelação fotográfica) (MELO et al., 2001).

Na última camada, as áreas escuras do filme atuam como proteção para o fotoresistente, bloqueando a radiação ultravioleta e permanecendo intactas após o processo de revelação, deixando a cobertura abaixo exposta. Já as áreas claras, ao serem atingidas pela luz ultravioleta, sofrem devido à polimerização das moléculas, formando uma camada protetora sobre o cobre (MELO et al., 2001).

Procede-se, então, à remoção da região menos resistente do photo resist, sendo que o cobre debaixo das outras partes, sensibilizadas pela luz e, portanto, mais resistentes, permanece protegido. Utilizando-se um processo de ataque ou corrosão. Todo o cobre que ficou exposto é removido. Finalmente, a porção mais resistente do photo resist é retirada, aplicando-se um processo mecânico de usinagem, ficando impressas na placa as trilhas de cobre que reproduzem o formato do circuito desejado. No final, são realizados tratamentos superficiais e de acabamento, além de testes elétricos e inspeção visual em toda a superfície da placa. A sequência de procedimentos anteriormente descrita é a base para a fabricação das camadas internas de uma PCI multilayer, ressaltando-se que a

fase de testes é mais complexa, em razão da necessidade de se averiguar a integridade das várias camadas, principalmente com relação às regiões isolantes e aos condutores (MELO et al., 2001).

2.4 CNC - Controle Numérico Computadorizado

O controle numérico computadorizado são comandos realizados pela interpretação de instruções contendo especificações sobre como deverá ser feita a movimentação da fresa na máquina. Máquinas CNC primitivas começaram a ser usadas na década de 60, onde as especificações das instruções eram transmitidas por cartões perfurados. Somente a partir da década de 80, esses dados começaram a ser armazenados em forma digital, através de fitas magnéticas (ALCÂNTRA, 2015).

As máquinas CNC equipamentos que também são capazes de fabricar peças elaboradas computacionalmente, a partir de mecanismos automatizados, projetados por meio de instruções especificadas em código, para o sistema de controle. Essas máquinas são uma evolução do controle numérico, que substituíram o controle de um hardware por um computador com software instalado. Na figura 10 podemos observar uma CNC (SANTOS et al., 2022).

Figura 10 – Máquina de fresagem CNC em operação.



Fonte: Adaptado de Björnsson (2022).

O método de fresagem CNC é uma alternativa eficiente para a fabricação de placas de circuito impresso (PCIs), pois realiza todos os processos de produção de forma automatizada e integrada. Através da remoção mecânica do cobre das áreas indesejadas, a fresadora cria as trilhas condutoras, perfura os pontos de inserção de componentes e realiza o corte final da placa em uma única operação. Esse processo oferece uma vantagem significativa em relação ao método tradicional de corrosão química, pois elimina variáveis que podem gerar falhas, como a remoção inadequada de cobre, que pode resultar em circuitos abertos ou curtos-circuitos. Além disso, a fresagem CNC permite a fabricação de múltiplas placas simultaneamente e suporta a produção de placas com múltiplas camadas ou faces, aumentando a versatilidade e produtividade do método. Ao contrário dos métodos químicos, a fresagem CNC utiliza programação de precisão, garantindo maior controle sobre o processo de fabricação e reduzindo a probabilidade de erros, como é apresentado na Figura 11 a seguir. Essa característica torna o método mais rápido e seguro, além de ser ideal para grandes produções, onde a eficiência e a qualidade são essenciais (LEONHARDT, 2019).

Figura 11 – Remoção de cobre na placa realizado por CNC.

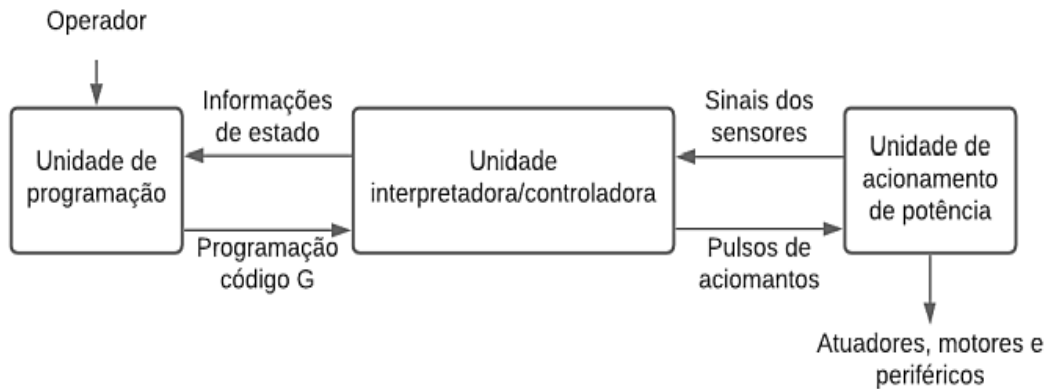


Fonte: Adaptado de Leonhardt (2019).

Na CNC um computador é parte integrante do equipamento e tem a função de ler e enviar as instruções diretamente para o controlador da máquina, como é mostrado na figura 12 a seguir. As instruções são padronizadas e possui um formato conhecido. Atualmente essas instruções são comumente chamadas de código G. O código G é uma linguagem de letras e números que possuem

uma notação abreviada e muito compacta, que estabelecem um conjunto de funções que controlam os movimentos das diversas partes da máquina CNC (TILL, 2021).

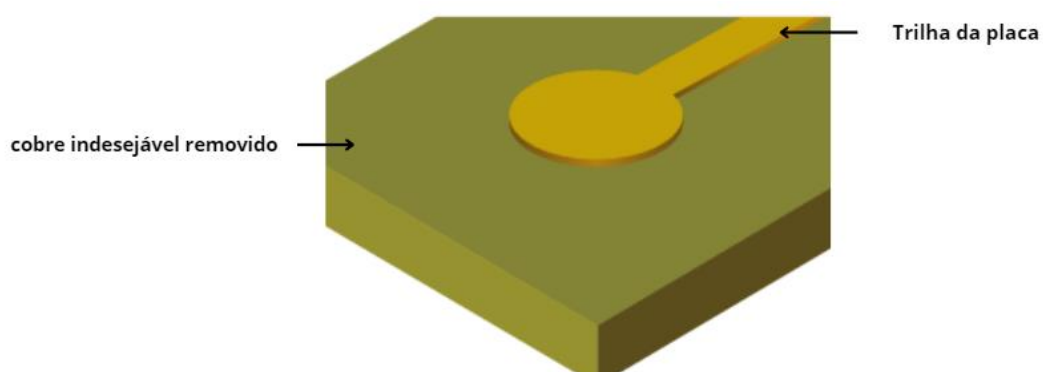
Figura 12 - Estrutura em blocos do funcionamento de uma CNC.



Fonte: Adaptado de Till (2021).

Sendo assim, o controle numérico computadorizado é a melhor alternativa para obter placas de circuitos impressos fiéis ao desenho projetado, já que controle da ferramenta de usinagem é feito de forma computacional, que recebe as informações sobre os detalhes do projeto e os converte em instruções para a movimentação da ferramenta de usinagem. Essa ferramenta deve ser escolhida de forma que com ela seja possível alcançar o resultado da aplicação desejada, devendo ser observado o tamanho da ferramenta, tipo de corte ou material utilizada. Na Figura 13 apresenta a fresagem fazendo a remoção do cobre indesejável (ALCÂNTRA, 2015).

Figura 13 – Placa com cobre indesejável removido usando CNC.



Fonte: Adaptado de Mitzner (2009).

Apesar do método de fresagem CNC oferecer maior rapidez e eficiência na confecção de placas de circuito impresso, este apresenta uma desvantagem significativa para entusiastas e instituições de ensino, que os altos custos envolvidos, uma vez que o processo exige a aquisição de equipamentos específicos, como as máquinas fresadoras CNC. Esses equipamentos demandam um investimento inicial elevado, além de custos adicionais relacionados à manutenção e ao treinamento para seu uso adequado, o que pode torná-los inacessíveis para pequenos laboratórios (LEONHARDT, 2019).

As máquinas CNC são usadas para aplicações que seja necessária uma maior precisão, aumento do rendimento de trabalho e agilidade no processo. Essas máquinas passaram ser usadas nas mais diversas aplicações, visando obter essas características (ALCÂNTRA, 2015).

Atualmente, há uma grande quantidade de equipamentos que se utilizam da tecnologia CNC, tais como impressoras 3D, torno CNC, máquinas de medição por coordenadas, entre outros. Esse método pode ser aplicado também em diversas áreas, como confecção de próteses, radioterapia veterinária e muitas outras áreas de aplicação. Estas máquinas podem ser utilizadas no aprendizado de programação, eletrônica e processos de usinagem de peças, utilizando comando numérico com manufatura assistida por computador (CAM do inglês computer Aided Manufacturing), que consiste no uso de um software que controla ferramentas de máquinas e equipamento ligado no processo de fabricação (SANTOS, 2022).

2.5 Técnica de corrosão com $FeCl_3$

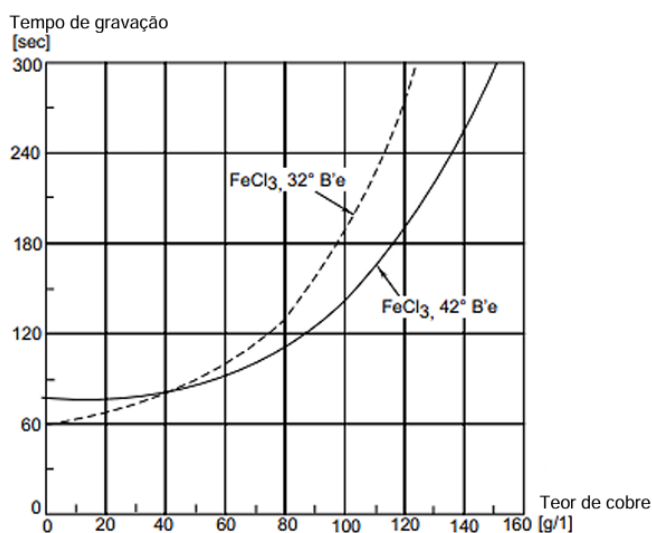
O cloreto férrico é um composto químico inorgânico formado pela combinação de ferro e cloro, representado pela fórmula química $FeCl_3$. Este composto é reconhecido por sua aparência característica: cristais ou pó de cor marrom-avermelhada, que são altamente solúveis em água. Ao se dissolver em água, o Cloreto Férrico forma uma solução ácida, resultando em uma série de propriedades químicas que o tornam extremamente útil em diversas aplicações industriais (AVANZI QUÍMICA, 2024).

A solução de corrosão com cloreto férrico é amplamente utilizada no processo de impressão e gravação na indústria de PCI. O cloreto férrico possui alta taxa de corrosão e alta capacidade de dissolução de cobre. É usado com tintas de tela, fotorresistente (filme úmido e filme seco) e placas folheadas a ouro. À medida que o ácido cloreto férrico ataca o estanho, esta solução não é adequada para PCIs folheadas a estanho ou chumbo-estanho. (KHANDPUR, R. S, 2005)

Quimicamente, o Cloreto Férrico é composto por um íon de ferro na sua forma trivalente (Fe^{3+}) e três íons de cloro (Cl^-). A estrutura do FeCl_3 permite que ele se dissolva facilmente em água, formando uma solução que é fortemente ácida devido à liberação de íons de hidrogênio (H^+). Essa solução ácida é um poderoso agente oxidante, capaz de reagir com várias substâncias, o que amplia ainda mais suas aplicações. (AVANZI QUÍMICA, 2024)

Para fins de monitoramento e para saber a concentração exata de teor cobre no cloreto férrico, uma análise do produto químico tem que ser feita. Uma solução menos precisa, mas prática, é usar o método colorimétrico de comparação de cores com soluções padrão de teor de cobre conhecido. Em média, para gravar 1kg de cobre, é necessário 5,1 kg de cloreto férrico, com temperatura de ataque na faixa de 20 a 45 °C (KHANDPUR, 2005). Na Figura 14 pode ser observado a curva de tempo de corrosão por quantidade de cobre.

Figura 14 – Curva de tempo de corrosão por quantidade de cobre.



Autor: Adaptado de Khandpur (2005).

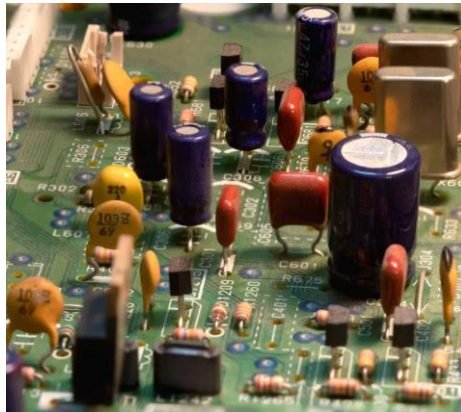
O cloreto férrico é amplamente utilizado na indústria de placas de circuito impresso (PCI) devido à sua alta solubilidade, acidez e capacidade oxidante, que garantem eficiência na dissolução de cobre nos processos de gravação. Apesar de sua incompatibilidade com materiais folheados no estanho, seu uso é essencial e pode ser otimizado por meio do monitoramento da concentração de cobre na solução.

2.6 Componentes PTH e SMD

A montagem de placas de circuito impresso (PCI) pode ser realizada utilizando duas principais tecnologias. A primeira é a tecnologia de montagem em superfície (SMT), na qual os componentes SMD (do inglês *surface-mounted technology*, ou seja, dispositivos de montagem em superfície) são soldados diretamente na superfície de um dos lados da placa, permitindo o uso eficiente de ambas as faces da PCI, otimizando o espaço e reduzindo o tamanho geral da placa. A segunda é a tecnologia de montagem com furos (THT), que utiliza componentes PTH (do inglês *pin through hole*, ou seja, pinos passantes). Nesse método, os pinos dos componentes são inseridos em furos previamente perfurados na placa e a soldagem é feita no lado oposto (QUEIROS, 2022).

Os componentes PTH constituem uma categoria de componentes eletrônicos amplamente utilizada na indústria. Logo, recebem esse nome devido ao método de montagem, que envolve a inserção dos terminais dos dispositivos eletrônicos em furos perfurados em placas de circuito impresso (PCBs), como apresentado na figura 15. A montagem PTH é um dos métodos mais antigos de fabricação de placas de circuito impresso e tem sido amplamente empregada em muitas aplicações ao longo dos anos (GUSE, 2023).

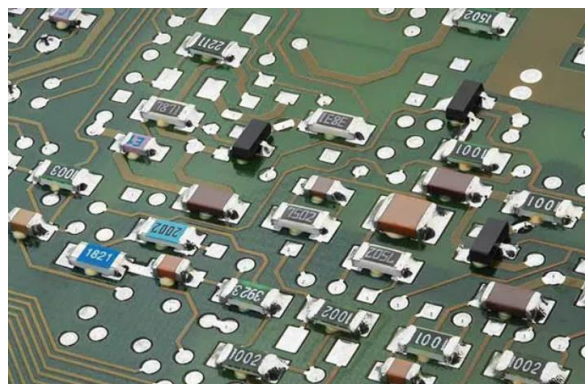
Figura 15 – Apresentação de componentes PTH em uma placa.



Fonte: adaptado de Guse (2023)

A introdução da tecnologia SMD representou um marco importante na eletrônica, comparável à criação dos circuitos integrados. Essa tecnologia consiste na colocação e soldagem de componentes eletrônicos, sejam eles passivos ou ativos, diretamente na superfície de uma Placa de Circuito Impresso (PCI), como mostrado na figura 16. A adoção de componentes SMD oferece diversas vantagens em relação aos componentes tradicionais, incluindo a miniaturização das placas, maior rapidez na resposta dos circuitos, avanços na automação industrial e a redução de custos de produção (CORDEIRO, 2016).

Figura 16 – Apresentação de componentes SMD em uma placa.



Fonte: Adaptado de Guse (2023).

2.7 Esquemático e Simulação

A etapa inicial na elaboração de uma placa de circuito impresso (PCI) envolve o desenvolvimento do esquemático do circuito, onde são definidas as conexões entre os componentes eletrônicos, para garantir o funcionamento adequado do circuito. A partir desse esquemático, é gerado o layout da placa, permitindo ajustes como o tamanho de furos, trilhas e áreas de contato (ilhas). Dependendo do software utilizado, é possível também simular o comportamento do circuito antes de sua construção física, facilitando os testes em um protoboard (RODRIGUES, 2019).

O software do PROTEUS® VSM é uma ferramenta ideal para os estudantes e profissionais que desejam desenvolvimento de aplicações analógicas e digitais. Ele permite desenvolvimento completo de projetos através esquemáticos, simulações e layouts (PCB). O grande diferencial do PROTEUS com relação a outros softwares é a capacidade de simular circuitos elétricos e circuitos microcontrolados, pois além de fornecer componentes animados, também possui as ferramentas necessárias para depurar o software desenvolvido para o microcontrolador, acompanhando seu comportamento na simulação do hardware (AVACOM ELETRÔNICA LTDA, 2010).

Embora o software Proteus® seja amplamente utilizado para simulações de circuitos eletrônicos e desenvolvimento de projetos, algumas desvantagens são observadas. Interface complexa pode dificultar o aprendizado para iniciantes devido à sua complexidade e à quantidade de ferramentas disponíveis. Além disso, a ferramenta não é totalmente gratuita, que representa um obstáculo para estudantes ou profissionais com recursos limitados. Outro ponto negativo refere-se às limitações na modelagem, especialmente em simulações de alta precisão, circuitos complexos.

Assim como o PROTEUS® VSM, que possibilita simulação e desenvolvimento de circuitos, o GRBL-Plotter complementa o processo de fabricação ao oferecer uma solução prática para a gravação ou fresagem da placa física. Dessa maneira, GRBL-Plotter® é uma ferramenta para a automação de processos de fabricação em máquinas CNC, incluindo fresadoras e plotters usadas na produção de PCI. O software permite a conversão de arquivos

vetoriais e de G-code em comandos executados pela máquina, proporcionando controle preciso sobre o movimento e as operações de corte ou gravação (GRBL-Plotter, 2024).

3 METODOLOGIA

Nessa seção são apresentados os procedimentos adotados na fabricação e simulação das placas de circuito impresso (PCI) utilizando dois métodos distintos: fototransferência com luz UV e fresagem CNC. O objetivo é comparar os resultados obtidos em termos de custo, tempo dos métodos. Enquanto o método de fototransferência é realizado de forma prática, o método de fresagem CNC é simulado e analisado em software de CAD/CAM.

3.1 Desenvolvimento da placa de teste

O passo inicial no desenvolvimento do circuito de teste envolveu a criação do esquemático utilizando o módulo ISIS do software PROTEUS® da Labcenter, nesta etapa é realizado a criação do esquema do circuito, selecionando os itens corretos na biblioteca e configurando cada componente para as características ideais para o funcionamento desejável. Após o roteamento, ainda no módulo ISIS no PROTEUS®, foi necessário simular o circuito, foram utilizadas as ferramentas de medição do próprio software. Pontos importantes do circuito são verificados através da medição de tensão.

O circuito utilizado possui a função de distorcer de forma controlada o sinal de entrada. Para testar este circuito foi necessário usar o gerador de sinais do módulo ISIS, é configurado para injetar uma forma de onda senoidal, e para observar a forma de onda obtida na saída do circuito, é utilizado o osciloscópio, comparando o sinal de entrada com o de saída. Essa etapa é necessária, pois permite verificar o funcionamento previsto do circuito, assegurando que os componentes estejam corretamente configurados, roteados e que o projeto atenda aos requisitos técnicos antes de avançar para a sua montagem física.

Após concluir a simulação do esquemático no ISIS, o próximo passo é utilizar o módulo ARES do software para desenvolver o layout da Placa de Circuito Impresso (PCI). Este módulo é fundamental, pois permite ao usuário organizar virtualmente a disposição dos componentes, trilhas e pads, de acordo com o projeto realizado. O ARES oferece diversas ferramentas para ajustar

manualmente parâmetros importantes, como a espessura das trilhas, o tamanho dos pads e as dimensões gerais da placa, garantindo que o design esteja de acordo com as exigências do projeto e otimizando o processo de fabricação do circuito impresso.

Na etapa de geração da máscara de fototransferência, o arquivo PDF exportado é editado no software Adobe Photoshop CC. Essa edição da máscara é necessária para preparar o arquivo para o processo de corrosão do substrato da Placa de Circuito Impresso (PCI).

A edição do arquivo PDF é realizada para inverter o padrão de núcleos do layout, garantindo que as áreas destinadas à proteção durante o processo de corrosão permaneçam intactas. Essa configuração é fundamental para a execução correta do procedimento. Além disso, a imagem deve ser espelhada, garantindo o alinhamento preciso da máscara com a superfície do substrato no momento da aplicação.

Após as edições necessárias, a máscara de fototransferência resultante está pronta para ser utilizada no processo de transferência do padrão para a placa, estabelecendo o layout circuito para a produção da PCI.

3.2 Fabricação da PCI pelo método de fototransferência com luz UV

O processo de fabricação de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) utilizando o método de fototransferência com luz UV inicia-se com a preparação adequada da placa de cobre. Primeiramente, a superfície da placa é cuidadosamente limpa com álcool isopropílico e lã de aço, mostrados na figura 17. Isso é feito para remover as impurezas da placa que possam vir a interferir ou prejudicar a aderência ou cura da tinta UV, que é aplicada na etapa posterior. É importante se ter cuidado para que após a limpeza não ocorra nenhum tipo de contato com a face onde a tinta será aplicada, para não contaminar a mesma.

Figura 17 - Preparação da placa.



Fonte: Autor (2024).

Com a placa devidamente limpa, aplica-se o fotoresiste. Essa camada foi aplicada com pincel por toda a superfície, no centro da placa foi aplicada uma maior quantidade de tinta UV em forma de X, para que fosse espalhada de forma uniforme durante a centrifugação. A centrifugação tem como objetivo garantir a cobertura total e uniforme da superfície de cobre. A figura 18 ilustra as etapas desse processo de fabricação

Figura 18 - Metodologia de confecção da PCI



Fonte: Autor (2024)

Logo, após a aplicação da tinta e centrifugação da placa, a PCI deve ser mantida em um ambiente escuro, para evitar exposição acidental à luz, pois isso resultará em padrões indesejados ou perda total da funcionalidade do fotoresiste. O método de geração de fotoresistente com tinta UV é conhecido como wet film resist, neste caso a máscara do circuito será posicionada em cima do fotoresistente e levemente pressionada por um acrílico transparente, que tem a função de eliminar falhas de sombreamento. Esse método é mais frágil em comparação ao dry film resist, e pode resultar na fixação da tinta na máscara e não na placa. Existem várias soluções para evitar esse problema, em que uma delas é colocar a placa em uma drybox com temperatura e tempo controlado, foi utilizado 60° por 5 minutos. Em seguida a Figura 19 mostra a placa na drybox para a secagem.

Figura 19 – Placa em drybox.



Fonte: Autor (2024).

O próximo passo consistiu na criação da máscara do circuito, que é o layout do design produzido em um software CAD. O próprio módulo Ares do software Proteus® da labcenter possui uma função para a impressão da arte na configuração correta, oferecendo opções de máscara positiva ou negativa. Na máscara positiva, as áreas protegidas permanecem no circuito, enquanto as expostas são corroídas. Já na máscara negativa, as áreas expostas permanecem, e as protegidas são removidas. Para este trabalho, foi utilizada a configuração negativa, que atende às necessidades do processo de gravação.

Esse layout foi impresso em um material transparente, como o acetato, que será usado para proteger as trilhas do circuito durante a exposição à luz UV. Conforme pode ser observado na figura 20 o layout da PCI.

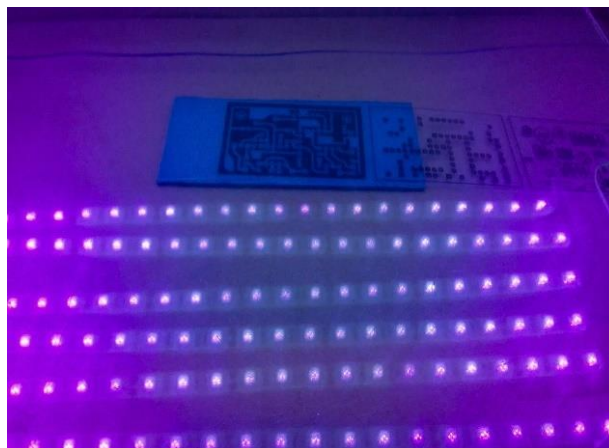
Figura 20 - Layout da placa.



Fonte: autor (2024).

A máscara foi então posicionada sobre a placa revestida com fotoresistente e junto de um acrílico transparente, e o conjunto é exposto à luz ultravioleta por um tempo determinado pelo fabricante da tinta. Também a distância entre a placa de circuito impresso e os emissores de luz UV foi feita de acordo com o estabelecido pelo fabricante. As áreas expostas à luz endurecem, enquanto as áreas protegidas pela máscara permanecem solúveis no revelador. Conforme ilustrado na figura 21, localizada abaixo, o PCI em contato com luz UV.

Figura 21 - Processo de cura do fotoresistente.



Fonte: Autor (2024)

Após a exposição, a placa é imersa em uma solução reveladora (Barrilha leve, que serve para aumentar o pH da água, substância alcalina) para remover o fotoresistente não endurecido, revelando as trilhas condutoras que devem ser preservadas. A seguir, na Figura 22, apresenta-se o processo de revelação.

Figura 22 - Placa mergulhada na barrilha leve.



Fonte: Autor (2024)

Em seguida, a placa foi submetida ao processo de corrosão, onde é mergulhada em uma solução de percloreto de ferro, que dissolve o cobre exposto, se o percloreto de ferro usado for antigo o processo poderá demorar muito nessa etapa. Após a corrosão, o fotoresistente restante é removido com lã de aço e isopropílico, deixando o circuito impresso visível. Na Figura 23 a seguir é mostrado a placa sendo mergulhada no percloreto de ferro.

Figura 23 – Processo de corrosão da placa.



Fonte: Autor (2024)

Finalmente, a placa é perfurada com um micro retifica, nos locais de inserção de componentes. Assim, concluindo o processo de fabricação. Esse método foi amplamente utilizado devido à sua precisão e facilidade de uso em prototipagem, porém requer manuseio cuidadoso de produtos químicos, como o agente corrosivo. Logo, para obter alguns dados foi utilizado um osciloscópio para medir a forma de onda da placa.

3.2.1 Processo de corrosão química da camada de cobre

O processo de remoção seletiva do filme metálico foi realizado através de corrosão química úmida. A corrosão da camada de cobre ocorreu com o uso de uma solução aquosa de Percloreto de Ferro (FeCl_3). Para acelerar a taxa de corrosão, a solução foi mantida em agitação. Após a conclusão do processo de corrosão seletiva ao filme metálico, a placa foi lavada com água corrente para remover o Percloreto de Ferro residual e interromper o processo de corrosão. Por fim, a remoção do polímero fotossensível, que define o padrão do circuito, foi realizada utilizando lã de aço.

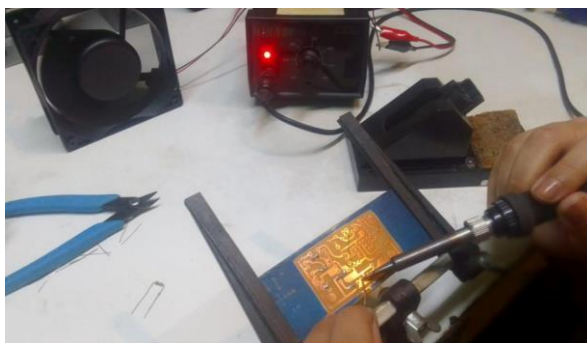
3.3 Processos de posicionamento dos componentes e soldagem manual

Essa etapa foi conduzida com atenção para garantir a precisão e a qualidade das conexões no método de fototransferência com luz UV, considerando que, no método de fresagem CNC, a placa não foi fabricada, apenas o processo foi simulado. Ressalta-se que o procedimento seria o mesmo para o método CNC, caso a placa tivesse sido confeccionada. Após a preparação da placa, os componentes eletrônicos foram posicionados manualmente sobre a PCI. Cada componente foi colocado nos locais apropriados, conforme o layout estabelecido no projeto. Essa etapa exigiu atenção para garantir que os componentes ficassem corretamente alinhados com os pads de soldagem na placa. Por boa prática, a soldagem deve iniciar dos

componentes de menor altura, como resistores e outros componentes de encapsulamento semelhantes e depois os componentes de maior altura, capacitores eletrolíticos e encapsulamentos semelhantes. A pré-forma dos terminais para facilitar a fixação dos componentes na placa também faz parte das boas práticas de soldagem.

O processo de soldagem manual utilizou uma estação de solda do fabricante Hikari, modelo HK-936A e estanho 60/40. A ponta da estação de solda foi aquecida a uma temperatura de aproximadamente 280°C para a soldagem dos componentes. Em seguida, foi posicionado, aplicado o estanho diretamente nos terminais dos componentes e ilhas, garantindo que a solda fluísse e criasse uma conexão firme entre os terminais e as trilhas da placa, por fim, foram removidos os excessos dos terminais. Esse processo foi realizado para verificar a funcionalidade previa do circuito da placa. Esse processo de soldagem manual foi feito um componente por vez conforme apresentado na figura 24 abaixo.

Figura 24 – Processo de soldagem dos componentes.



Fonte: Autor (2024).

Os pontos de solda foram inspecionados visualmente para assegurar a formação de uma junta sólida e livre de defeitos, como solda fria ou excesso de material. A técnica de soldagem manual permitiu uma maior flexibilidade e controle no processo.

3.4 Processo de simulação da CNC

Após finalizar o layout no software PROTEUS® no módulo ARES é exportado o layout em formato svg, com as cores invertidas e o circuito

espelhado. O SVG exportado do PROTEUS® é importado no software GRBL Plotter®. Esse software cria o código G a partir da imagem da imagem importada. Logo, uma parte do código G é mostrado na figura 25.

Figura 25 – Código G

Min.	Max.	Dimension
X: 0.000	85.290	85.290
Y: 0.000	49.290	49.290
Z: -2.000	2.000	4.000

Path length: 5134.3 Est. time: 00:06:23

```

1  ( Use case: ? )
2  { Source: G:\Users\Michelle\OneDrive\Área de Trabalho\TCC_2.SVG }
3  {<Header>}
16 G54 (Setup - GCode-Header)
17 G90
18 G00 Z2.000
19 M3 S1000 (Start Job)
20 {<Collection Id="1">}
21 {<Figure Id="374" Geometry="path" PenColor="ffffff" PenWidth="0.1" Layer="1">}
22 G00 X2.640 Y46.650
23 G01 Z-2.000 F1000 (PD)
24 G01 X82.640 Y46.650 F2000
25 G01 X82.640 Y2.650
26 G01 X2.640 Y2.650
27 G01 X2.640 Y46.650
28 G00 Z2.000 (FU)
29 {</Figure>}
30 {<Figure Id="375" Geometry="path" PenColor="ffffff" PenWidth="0.1" Layer="1">}
31 G00 X2.640 Y46.650
32 G01 Z-2.000 F1000 (PD)
33 G01 X82.640 Y46.650 F2000
34 G01 X82.640 Y2.650
35 G01 X2.640 Y2.650
36 G01 X2.640 Y46.650
37 G00 Z2.000 (FU)
38 {</Figure>}
39 {<Figure Id="376" Geometry="path" PenColor="none" PenWidth="0.1" Layer="1">}
40 G00 X4.307 Y43.958
41 G01 Z-2.000 F1000 (PD)
42 G01 X4.426 Y44.008 F2000
43 G01 X4.557 Y43.990
44 G01 X4.658 Y43.913
45 G01 X4.708 Y43.794
46 G01 X4.710 Y43.760
47 G01 X4.690 Y43.663
48 G01 X4.613 Y43.562
49 G01 X4.494 Y43.512
50 G01 X4.363 Y43.530
51 G01 X4.262 Y43.607
52 G01 X4.212 Y43.726
53 G01 X4.230 Y43.857
54 G01 X4.307 Y43.958
55 G00 Z2.000 (FU)
56 {</Figure>}
57 {<Figure Id="377" Geometry="path" PenColor="none" PenWidth="0.1" Layer="1">}
58 G00 X6.092 Y45.437
59 G01 Z-2.000 F1000 (PD)
60 G01 X6.042 Y45.556 F2000
61 G01 X6.060 Y45.687
62 G01 X6.137 Y45.788
63 G01 X6.256 Y45.838
64 G01 X6.387 Y45.820
65 G01 X6.488 Y45.743
66 G01 X6.538 Y45.624
67 G01 X6.540 Y45.590
68 G01 X6.520 Y45.493
69 G01 X6.443 Y45.392
70 G01 X6.394 Y45.342
  
```

Fonte: Autor (2024).

Em seguida é necessário configurar o software com o diâmetro de fresa adequado, localização do ponto 0 da placa, velocidades de avanço e retração, quantidade de voltas para a isolamento das trilhas e deslocamentos para o nivelamento da mesa para somente depois inicia o processo de fresagem. Algumas configurações são mais críticas que as outras, como por exemplo o desnivelamento da placa de circuito impresso, que pode vim a danificar a fresa por excesso de pressão, ou se caso o diâmetro real da fresa seja diferente do apontado no software, podendo causar o rompimento de trilhas e ilhas ou diminuir a distância de isolamento das ilhas do cobre não utilizado, aumentando a chances de curto no processo de soldagem ou o fechamento de curto-circuito, dependendo do sinal que passa pela trilha.

Nesse trabalho optou-se por realizado o processo de mais rápido, que consiste na isolação somente das trilhas do cobre que não vai ser usado na placa. Portanto, finalizado o processo de fabricação da PCI utilizando a CNC, pois a placa não foi fabricada, só houve a simulação.

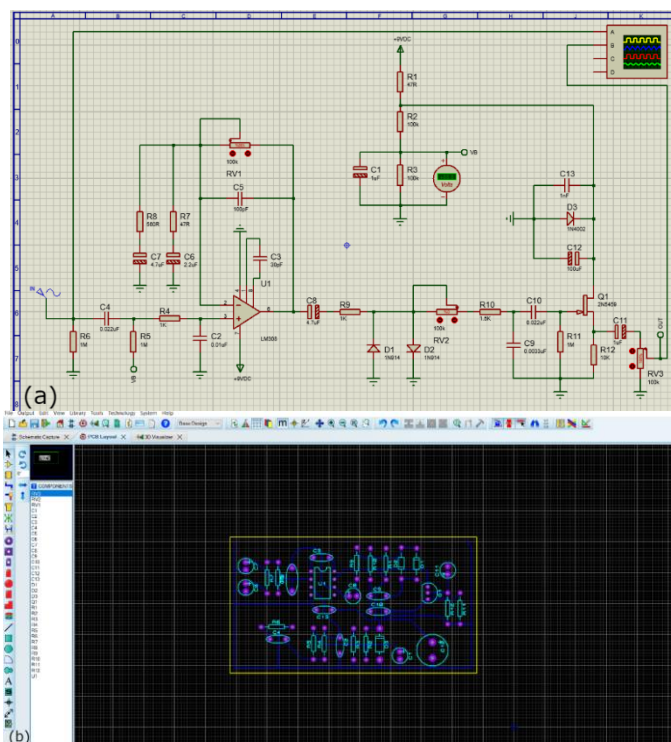
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desenvolvimento da placa de teste

O circuito utilizado tem a função de distorção com clipagem do sinal de entrada. O esquemático é baseado no CI de amplificador operacional único LM308. Este circuito é muito utilizado na indústria de áudio. A distorção é produzida usando um circuito de ganho variável com diodos cortando a forma de onda. O estágio de distorção é seguido por um filtro de tom e um estágio de buffer de saída que termina com um controle de tom.

Esse circuito foi selecionado para aplicação nos métodos de fototransferência e CNC devido à sua simplicidade e facilidade para verificar os sinais de saída, permitindo a comprovação eficiente do seu funcionamento. Após realizar a simulação em software e confirmar o correto funcionamento do circuito, o layout correspondente foi gerado a PCI. A figura 26 a seguir apresenta os resultados obtidos para os layouts em ambos os métodos.

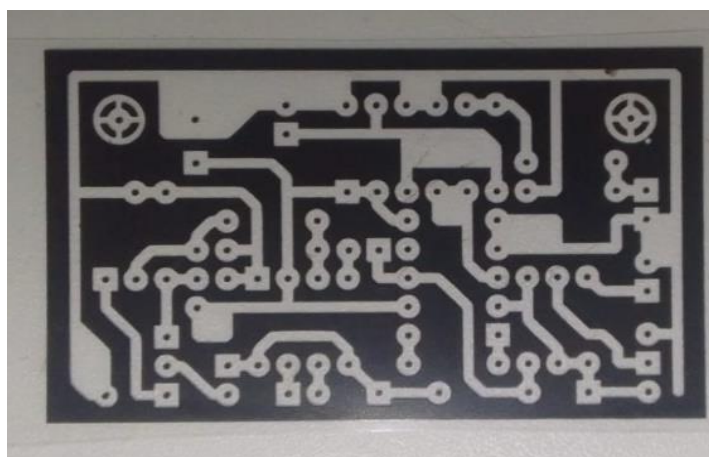
Figura 26 – esquemático e layout do circuito amplificador. (a) esquemático e (b) layout.



4.2 Fototransferência

A utilização do layout impresso, conhecido como fotolito, apresentou uma resolução adequada para o circuito proposto, pode-se observar que foram utilizadas trilhas de espessura (1mm) e ilhas de dimensões (2mm) as mesmas estão nítidas e não possuem falhas, possibilitando uma redução no tamanho da placa de circuito impresso. Quanto menor a espessura das trilhas ou a dimensão das ilhas, mais difícil é o processo de criação do fotolito. A boa qualidade do fotolito possibilitou a continuidade das etapas no processo de fabricação da placa. Conforme apresentado na figura 27.

Figura 27 - Resultado do fotolito.

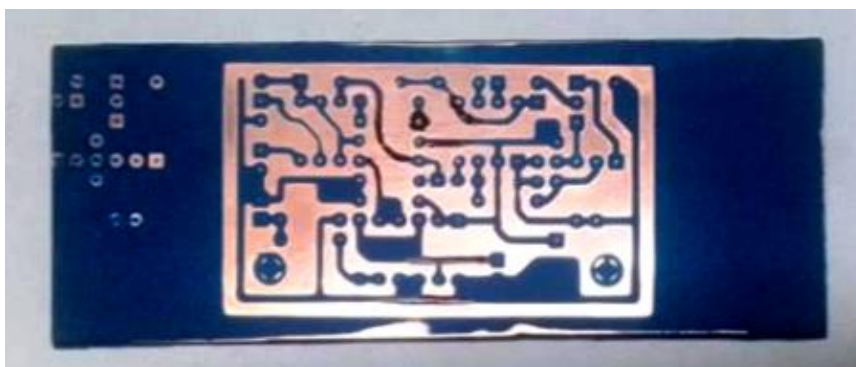


Fonte: Autor (2024).

Em seguida, os resultados do processo de fototransferência são apresentados nas Figuras 28. Pode-se notar que a transferência do layout do circuito amplificador operacional foi realizada de maneira aceitável para uma baixa escala de produção ou para prototipagem de circuitos. Algumas falhas de transferência apareceram devido a sombreamento na etapa de iluminação UV, mas que foram corrigidas facilmente utilizando um marcador permanente de ponta fina, garantindo uma reprodução nítida dos detalhes do circuito, mostrando a eficácia do método utilizado. Observou-se que o tempo de exposição excessiva causa dificuldades de remoção da tinta UV, enquanto o baixo tempo de exposição faz com que a tinta UV não permaneça na superfície de cobre durante o processo de corrosão. Pode-se constatar também que a distância da luz UV

para placa causa um impacto no tempo de cura do fotoressistente. Para este projeto foram utilizados 5 minutos de exposição com o distanciamento de 10cm, conforme descrição de cura do fabricante da tinta UV.

Figura 28 – Placa com layout

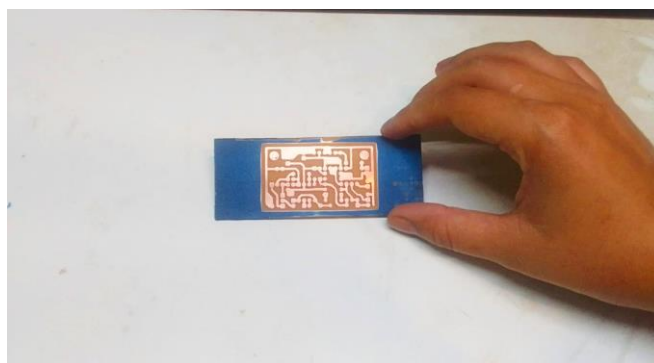


Fonte: Autor (2024).

4.2.1 Processo de corrosão química da camada de cobre

Esta fase do processo de fabricação foi conduzida conforme descrito na seção Metodologia, obtendo resultados satisfatórios e com boa consistência. A Figura 29 apresenta o resultado alcançado no circuito fabricado, demonstrando a eficiência da corrosão na placa utilizando o FeCl_3 , também pode-se observar que a agitação acelerou o processo de corrosão. A temperatura também influencia no processo de corrosão, neste caso foi utilizado o FeCl_3 em temperatura ambiente e mantido agitado, a etapa de corrosão durou 5 minutos.

Figura 29 – Placa depois da corrosão.



Fonte: Autor (2024).

4.2.2 Análise de precisão do método de fototransferência com luz UV

A fototransferência apresenta uma precisão satisfatória, sendo uma técnica eficaz para a prototipagem de circuitos simples. Os dados obtidos sobre a precisão do método podem ser analisados de forma comparativa na Tabela 01, localizada abaixo.

Tabela 01- Precisão do método.

Método	Precisão
Fototransferência com luz UV	Durante o processo de fabricação pelo método de fototransferência, as trilhas foram medidas com um paquímetro para verificar sua precisão em relação ao layout projetado. As medições mostraram uma variação mínima de 0,1 mm, considerada aceitável para protótipos. Contudo, pequenos desvios foram observados em áreas mais detalhadas, possivelmente causados por exposição irregular à luz UV ou falhas no processo de corrosão. Se houver sombras no vidro entre a fonte de luz e a placa, podem surgir defeitos no circuito, especialmente quando a largura das trilhas é muito fina, tornando o processo de transferência mais difícil.

Fonte: Autor (2024).

4.2.3 Análise de qualidade do método de fototransferência com luz UV

Com base nas simulações e no processo de fabricação, foi constatada uma boa qualidade no método de fototransferência UV, conforme demonstrado na Tabela 02 a seguir.

Tabela 02 – Qualidade final do método.

Método	Qualidade final
Fototransferência com luz UV	É importante considerar que resíduos de cobre podem surgir em áreas onde o percloroeto de ferro não realiza a corrosão completa, o que pode ser causado por uma limpeza inadequada ou por variações na concentração da solução. Além disso, falhas na exposição à luz UV, como sombras ou áreas mal cobertas, podem levar a defeitos nas trilhas, indicando que a qualidade final da placa pode ser afetada por esses fatores operacionais e técnicos. Contudo, a inspeção visual da placa produzida pelo método de fototransferência, revelou um bom acabamento geral, com trilhas bem definidas e sem falhas significativas. Embora tenha algumas limitações em circuitos com detalhes muito finos.

Fonte: Autor (2024).

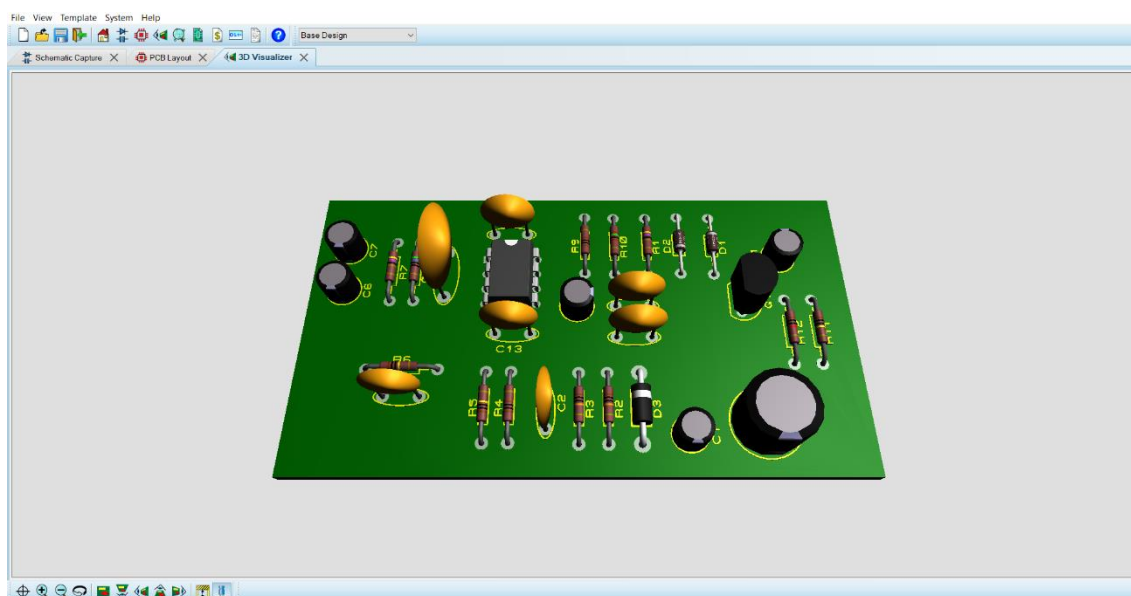
4.3 Simulação

4.3.1 Simulação e fabricação real do circuito no método de Fototransferência com Luz UV

Com o uso do software Proteus®, foi possível projetar e simular o funcionamento do circuito proposto. Para a etapa de projeto foram utilizados os módulos Isis e Ares, onde a parte da esquemático e simulação foram no ISIS e Desing de PCB no ARES. Foi notado uma vasta biblioteca de componentes para a montagem do circuito, para a etapa de simulação o módulo ISIS conta com ferramentas como multímetros, geradores de funções e Osciloscópio. Na parte

de design de PCB com o módulo ARES, notou-se uma gama de ferramentas para ajudar a manter o desing sem falhas, o software indica quando as trilhas estão muito próximas, evitando curto-circuito e não permite que as conexões sejam feitas erradas ou que as trilhas se cruzem. O desenvolvimento também resultou na geração de uma imagem 3D da placa de circuito impresso, permitindo uma visualização clara do layout e da disposição dos componentes. Conforme mostrado na figura 30.

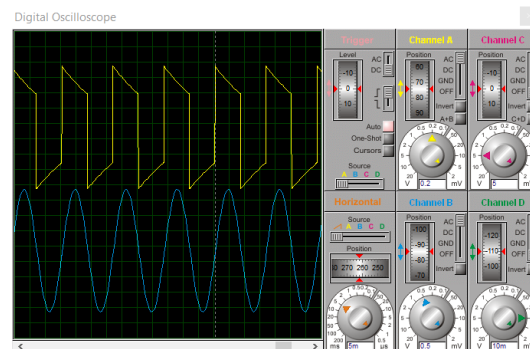
Figura 30 – Circuito projetado no software Protheus.



Fonte: Autor (2024).

Utilizando o osciloscópio na etapa de simulação do ISIS, foi possível constatar o funcionamento do circuito, onde é injetado um sinal com forma de onda senoidal (Em azul) e na saída temos o sinal amplificado já cortado nos picos e vales (em amarelo). A ilustração do processo pode ser observada na Figura 31 logo abaixo.

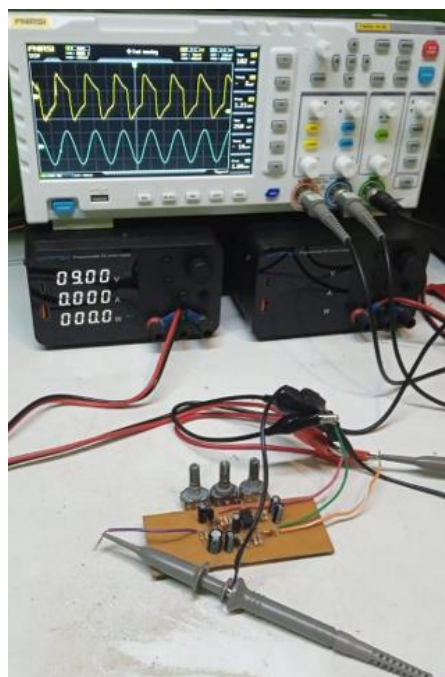
Figura 31 - Demonstração da forma de onda do circuito entrada e saída.



Fonte: Autor (2024).

Após a fabricação da PCI pelo método de fototransferência com luz UV, o circuito foi testado utilizando um osciloscópio, confirmando o funcionamento esperado, conforme observado na simulação no Proteus. Um sinal senoidal foi injetado (representado em azul), e o sinal amplificado, já com os picos e vales cortados, foi exibido na saída (representado em amarelo). A ilustração desse processo pode ser vista na Figura 32, apresentada logo abaixo, demonstrando o comportamento do circuito fabricado em relação à simulação inicial.

Figura 32 – Teste do circuito da PCI.

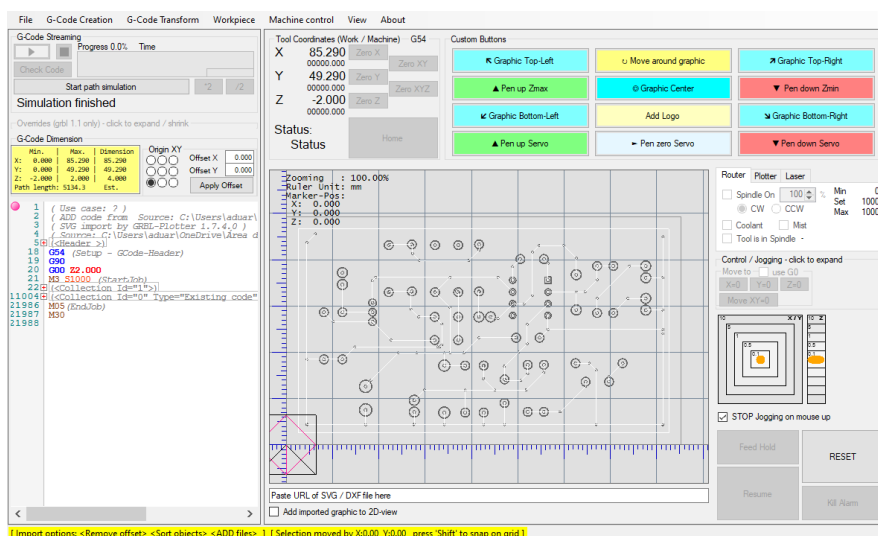


Fonte: Autor (2024).

4.3.2 Processo de simulação da CNC

Como se trata do mesmo circuito utilizado no método de fototransferência, a simulação segue os mesmos princípios. No entanto, com os dados obtidos, foi possível inserir o layout no software GRBL Plotter, que gerou o código G. A simulação resultante forneceu as informações necessárias, conforme ilustrado na imagem a seguir, permitindo a análise dos passos do processo automatizado, como a retirada do cobre na placa, mostrando a produção das trilhas na PCI. Conforme mostrado na figura 33.

Figura 33 - Simulação no GRBL Plotter®.



Fonte: Autor (2024).

4.4 Comparação dos métodos em pequena escala

4.4.1 Tempo de produção

Apesar de utilizar o mesmo layout em ambos os métodos, o tempo de produção nos métodos de CNC e fototransferência com luz UV depende de fatores específicos de cada processo. Na CNC, o tempo varia conforme o diâmetro da fresa utilizada, já no método de fototransferência, o tempo está

diretamente ligado ao processo de corrosão do cobre. Os tempos comparativos de produção entre os dois métodos são apresentados na Tabela 03.

Tabela 03 - Tempo de produção dos métodos.

Método	Etapas	Tempo	Tempo de produção
Fototransferência com luz UV	Limpeza	5 min	O tempo de produção no método de fototransferência com luz UV é influenciado por diversas etapas manuais, que incluem a preparação da placa, a aplicação do fotoresiste, a exposição à luz UV, a revelação e a corrosão. Observou-se que o tempo total necessário pode variar de acordo com a complexidade do layout e o nível de precisão exigido. Um aspecto crítico desse processo é o tempo de corrosão do cobre, que depende da concentração e eficiência do percloreto de ferro. Assim, a duração da corrosão impacta significativamente o tempo final de produção. Estima-se que o processo completo, desde a preparação da placa até a finalização, foi de aproximadamente 45 minutos.
	Aplicação da tinta UV	5 min	
	Centrifugação	5 min	
	Exposição UV e Cura	5 min	
	Corrosão	15 min	
	Furação	10 min	
Fresagem CNC	Limpeza	5 min	O tempo total estimado para a produção do circuito utilizando fresagem CNC foi consideravelmente maior do que no processo de fototransferência, devido à natureza mecânica do corte das trilhas e da perfuração dos furos. Embora o processo simulado tenha demonstrado alta precisão, a execução prática requer mais tempo, especialmente em placas de maior complexidade. Além disso, o tempo de produção na fresagem CNC é influenciado pelo diâmetro da fresa utilizada, fresas de maior diâmetro podem acelerar o corte, mas podem ser menos eficazes em circuitos com detalhes finos, o que também pode impactar o tempo total de fabricação. Estima-se que o processo completo, desde a preparação da placa até a finalização, foi de aproximadamente 3 horas e 15 minutos.
	Processo de roteamento com broca de 0,5mm	3 horas	
	Preparação para o processo de furação	5 min	
	Furação	5 min	

Fonte: Autor (2024).

4.4.2 Custo da fabricação

O custo para a produção prática das PCI pelo método de fototransferência foi relativamente baixo, já o método de fresagem CNC, embora simulado, demonstrou que os custos iniciais de aquisição do equipamento e manutenção da fresadora seriam mais elevados. Conforme apresentado na tabela 04 a seguir.

Tabela 04 - Custo de fabricação da PCI.

Método	Custo de fabricação
Fototransferência com luz UV	Para este trabalho, considerando a fabricação de uma placa, o custo total estimado foi em torno de aproximadamente R\$ 260 por unidade. Esse custo é considerado acessível para a produção de protótipos e pequenas escala, especialmente em projetos educacionais ou de baixo volume.
Fresagem CNC	Embora o método de fresagem CNC tenha sido apenas simulado neste estudo, o custo inicial do equipamento seria significativamente mais alto em comparação com a fototransferência. No mercado, uma fresadora CNC pode variar de R\$ 1.500 a R\$ 7.500, com as de menor valor apresentando qualidade inferior, especialmente para a fabricação de circuitos de alta precisão. Além do custo de aquisição, há despesas contínuas com manutenção do equipamento e substituição periódica das fresas, o que torna esse método menos viável para pequenas produções ou protótipos. Devido a esses fatores, a fresagem CNC se mostra mais apropriada para produções maiores ou em ambientes industriais.

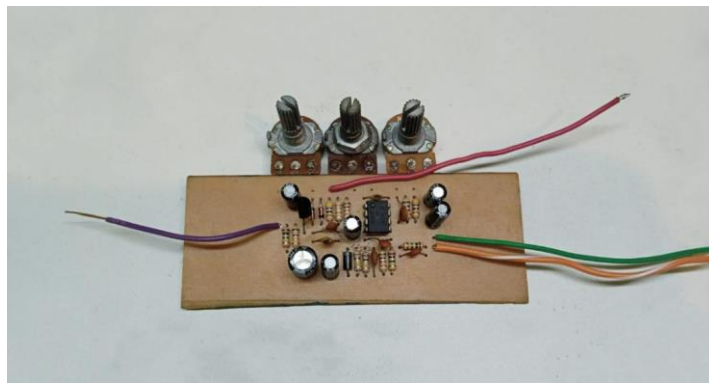
Fonte: Autor (2024)

4.5 Processo de posicionamento dos componentes e soldagem manual para a placa fabricada no método de fototransferência

A placa foi submetida a teste de continuidade elétrica utilizando um multímetro. Todas as trilhas conduziram a corrente corretamente, e nenhum curto-circuito foi detectado. Esse resultado indica que, apesar de pequenos desvios nas medidas das trilhas, a funcionalidade dos circuitos não foi comprometida.

Os resultados obtidos após o processo de soldagem manual dos componentes foram satisfatórios, pois os componentes foram posicionados manualmente sobre seus respectivos pads, utilizando estanho para a soldagem. Conforme mostrado na Figura 34, o procedimento manual realizado para o posicionamento dos componentes PTH e a aplicação do estanho garantiu que os componentes fossem corretamente fixados, resultando em um acabamento funcional e adequado ao projeto.

Figura 34 – Placa PCI com os componentes.



Fonte: Autor (2024).

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram comparados dois métodos de fabricação de Placas de Circuito Impresso: fototransferência com luz UV e fresagem CNC. A análise abrangeu desde os aspectos de tempo de produção até os custos envolvidos em cada método, além da verificação do desempenho dos circuitos fabricados.

Os resultados indicaram que o método de fototransferência com luz UV é uma solução acessível e eficaz para a prototipagem de circuitos simples de pequena escala. A precisão das trilhas obtidas foi considerada satisfatória, e o custo relativamente baixo. No entanto, o método apresenta limitações em detalhes muito finos e na uniformidade da exposição à luz UV, o que pode resultar em pequenas falhas nas trilhas, as quais foram corrigidas. O tempo de produção estimado para a fabricação do circuito amplificador foi de aproximadamente 45 minutos, e o circuito funcionou conforme o esperado, validando a eficácia da técnica aplicada.

Por outro lado, o método de fresagem CNC apresenta um custo inicial elevado, com equipamentos variando entre R\$ 1.500 e R\$ 7.500. Além disso, é necessário considerar os gastos recorrentes com manutenção e a substituição periódica das fresas, o que torna esse método menos atrativo para aplicações de pequena escala ou para a produção de protótipos.

Portanto, conclui-se que a escolha do método mais adequado depende do contexto de aplicação. O método de fototransferência é mais indicado para projetos que requerem rapidez e baixo custo, como em ambientes educacionais ou na prototipagem rápida. Já a fresagem CNC é mais apropriada para produções maiores ou projetos que demandam detalhes finos e maior repetibilidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, Yuri Marinho; PEREIRA, Jander; SANTANA, Lucas. **Desenvolvimento de uma mesa fresadora CNC para placas de circuito impresso para telecomunicações**. XIV SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, Universidade Salvador (UNIFACS), 2015, Salvador, 2015.

MELO, P. R. S., GUTIERREZ, R. M. V., ROSA, S. E. S. **Complexo eletrônico: Placas de circuito impresso: mercado atual e perspectivas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 14, p. 112-1136, jan. 2001.

COOMBS, Clyde F. **Printed circuits handbook**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, p. 1-1224, 2008.

MITZNER, Kraig. **Complete PCB design using OrCAD Capture and PCB editor**. Burlington: Newnes, 2009.

SOUZA, Amanda et al. **PCIFLEX - FABRICAÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO FLEXÍVEL**, 2018. Trabalho de Conclusão de curso (TÉCNICO INTEGRADO EM ELETRÔNICA) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

RODRIGUES, Lucas Melo et al. **Fabricação de placa de circuito impresso (PCI) usando método fotográfico e redução significativa de soluções químicas**. 2019. P. 26-33. Trabalho Técnico (Laboratório de Instrumentação Eletrônica) – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 26–33, 2019.

MALAVAZI, André. **Projeto e fabricação de sondas neurais baseadas em MEMS**. 2016. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.

SANTOS, Guilherme. **Nova proposta de tinta condutiva de baixo custo, para aplicação em placas de circuito impresso**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2018.

SILVA, Gabriela et al. **FUV: Foto Expositora Ultravioleta para Produção de Placas de Circuito Impresso**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico

em Eletrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Campus Natal Zona Norte, Natal, 2017.

PLATT, Charles. **Make: Electronics: Learning by Discovery**. 1. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2009.

QUEIRÓS, Mauro. **Célula de trabalho para montagem de pequenos componentes em PCB**. 2022. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2022.

CAVALCANTE, Marcus et al. **MINIMIZE - Método Manual para Redução de Dimensões Físicas, Peso e Dissipação de Potência Elétrica em Sistemas Eletrônicos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Eletrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

SOUZA, Beijamim. **Etapas do Processo Fotolitográfico**. 2008. Monografia (Especialização em Microeletrônica com ênfase em Microfabricação de Circuitos Integrados) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LEONHARDT, Samuel. **Adaptação de Impressora 3D para Criação de Placas de Circuito Impresso**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário de Goiás, Uni-Anhanguera, Goiânia, 2019.

Newton, Braga. **Como Fazer Placas de Circuito Impresso (ART2611).2024.2024**. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/projetos-educacionais/11144-como-fazer-placas-de-circuito-impresso-art2611.html>. Acesso em 25 jun. 2024.

CORDEIRO, Daniel. **Uso do compensador Pid No controle de temperatura de um forno Elétrico A resistência para soldagem de componentes SMD**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO, Ouro Preto, Minas Gerais, 2016.

UHLMANN, Iracyanne. **APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DO LEAN MANUFACTURING EM UM PROCESSO DE SMT: ESTUDO DE CASO.**2015. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Processos) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, Belém, Pará, 2015.

KHANDPUR, R. S.. **Printed Circuit Boards: Desing, Fabrication, Assembly and Testing.** Nova Deli: Tata Mcgraw-hill Education, 2005.

AVANZI QUÍMICA. **Cloreto Férrico: O Que É, Suas Utilizações e Como Manipular com Segurança.** Disponível em: <https://avanziquimica.com.br/blog/blog-p/cuidados-produtos-quimicos/cloreto-ferrico-o-que-e-suas-utilizacoes-e-como-manipular-com-seguranca>. Acesso em 18 set.2024.