

# Plotter de placas de circuito impresso

Luigi Sartor Piucco  
Graduando de Eng. Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
luigi.sp@aluno.ifsc.edu.br

Lucas Mondardo Cunico  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
lucas.cunico@ifsc.edu.br

Vilmar Menegon Bristot  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
vilmar.bristot@ifsc.edu.br

**Abstract**—No desenvolvimento de produtos eletrônicos, após o projeto final é frequentemente preciso confeccionar uma placa de circuito impresso para suportar e interconectar os componentes específicos. Com o desenvolvimento de metodologias ágeis e ciclos de projeto cada vez mais rápidos, no entanto, torna-se necessária a produção de tais placas diretamente no laboratório, para rápida prototipagem. A máquina que possibilita essa iteração veloz é distinta da tecnologia de manufatura seriada, e se propõe neste trabalho a criação de tal equipamento para uso do Campus Criciúma, de forma a propiciar melhores capacidades de prototipagem à instituição. O princípio de funcionamento é baseado em um sistema de movimentação 2D (implementado com motores de passo e driver correspondente), com um elemento de pintura fina capaz de produzir traços e preencher regiões com tinta (acoplado a um atuador linear que abaixa/levanta o marcador de acordo com a característica do movimento, entre reposicionamento com traço e apenas reposicionamento). O controle é implementado por meio do *firmware* de código aberto Klipper3D, com um componente no computador *host* acoplado que comunica via USB com a máquina. A precisão, exatidão e repetibilidade obtidas foi compatível com o uso para prototipagem, mensuradas meio de microscopia.

**Palavras-chave**—placa de circuito impresso, plotagem, fabricação

## I. INTRODUÇÃO

A placa de circuito impresso (PCI) se tornou um elemento fundamental do desenvolvimento eletrônico. Trata-se de um substrato planar de material dielétrico onde são feitos furos *e/* ou colocados colchões metálicos (*pads*) para encaixar componentes passivos (como resistores e capacitores), componentes ativos (circuitos integrados/CI) e fixadores (parafusos, conectores, pinos, solda etc.). Entre os terminais externamente acessíveis dos componentes montados, são passadas trilhas de material condutor (normalmente cobre) sobre o substrato de forma a interconectar os componentes e permitir sua interação eletromagnética, como fios em uma instalação elétrica. [1], [2]

No Campus Criciúma do IFSC, alguns dos cursos ofertados produzem PCI e fazem uso dessa técnica em seus trabalhos, mais especificamente no formato de PCI rígida unilateral. Elas são confeccionadas com um método artesanal via transferência térmica, que possui alta taxa de retrabalho e não é próximo dos métodos comuns usados em laboratórios de eletrônica. No meio industrial, vem sendo adotado o uso de máquinas de prototipagem, projetadas para rapidamente entregar pequenas remessas para testes antes da finalização do design. O objetivo deste trabalho é construir uma *plotter* para realizar a etapa de reprodução do desenho, incluindo teste para validar sua precisão. Na Seção I é fundamentado o conceito essencial e

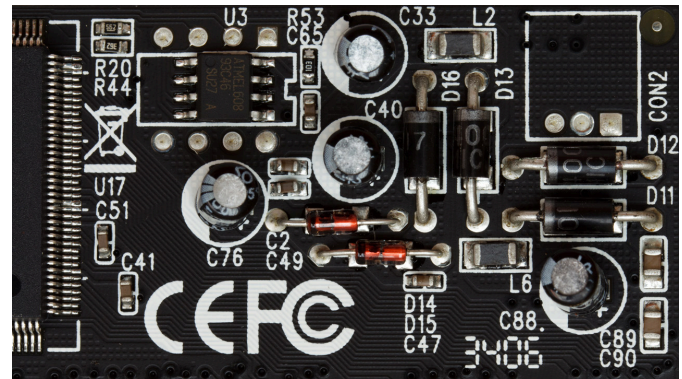


Figura 1. Fotografia de uma PCI, em seu estado final. [3]

é apresentado o objetivo do trabalho, para motivar o passo-a-passo elaborado e fundamentado na Seção II, cuja aplicação, descrita pela Seção III, resulta na Seção IV.

A produção de uma PCI ocorre por manufatura subtrativa, usando um agente P para proteger uma região do cobre pré-aplicado e outro agente C para corroer a região desprotegida. Em ambiente de produção industrial, o agente P é uma máscara que se liquefaz quando exposta à luz UV; no processo, ele é aplicado em toda placa, em seguida um conjunto de fotolitos e uma mesa emissora de luz UV são usados para remover o agente onde não deve haver cobre na placa pronta [2]. Em ambiente de pesquisa (como no IFSC), o agente P é tinta de impressão, aplicada por uma impressora de mesa sobre um papel, que é transferido por serigrafia térmica para a face de cobre. Quando restar apenas áreas que devem ser condutoras cobertas pelo agente P, a placa é exposta ao agente C, que remove o cobre onde não deve haver condutividade. Existem passos posteriores, como furação para pinos de componentes e corte para encaixe em um produto final [2]. Um exemplo de PCI finalizada é apresentado na Figura 1. Este trabalho oferece uma alternativa ao método de aplicação do agente P: cobertura aditiva e apenas sobre regiões que devem conduzir na placa pronta, por meio do dispositivo desenvolvido. O intuito é melhorar o processo disponível no campus, removendo a variabilidade da transferência por aquecimento.

Na área da prototipagem eletrônica, distinta da produção em massa, existem múltiplas alternativas para produção de placas em ambiente de pesquisa. A Tabela I sumariza opções consideradas além da usada. O método escolhido para este trabalho é o da deposição de tinta, especificamente por contato entre uma caneta e a placa. A escolha foi realizada por lógica abdução (eliminação sucessiva): o isolamento por corte com

TABELA I  
MÉTODOS ENCONTRADOS COMO POSSÍVEIS PARA PROTOTIPAGEM DE PCI.

Método	Considerações
Impressão por plotter e corrosão	Método escolhido
Isolamento por corte com fresa	Requisitos mecânicos elevados; Controle complexo;
Serigrafia de impressão e corrosão	Alta taxa de retrabalho; Tempo monótono gasto em aula; Não permite realizar outras atividades enquanto espera pela transferência;

fresa tem requisitos mecânicos mais rígidos em termos da capacidade de força do movimento, além de que o caminho a ser traçado passa a ser o contorno do caminho intuitivo das trilhas, dificultando a programação; a serigrafia de um desenho impresso já é utilizada e possui alta taxa de retrabalho, além de ocupar tempo de aula na espera monótona pela transferência térmica.

## II. METODOLOGIA

O passo-a-passo para desenvolvimento do sistema foi conforme a lista a seguir:

- 1) Estudo bibliográfico;
- 2) Escolha de componentes necessários;
- 3) Projeto CAD/CAM;
  - a) Encapsulamento externo;
  - b) Eixo Y;
  - c) Eixo X;
  - d) Cabeça de impressão;
  - e) Projeto elétrico;
- 4) Produção e montagem;
  - a) Corte de chapas de acrílico;
  - b) Compra de componentes elétricos e eletrônicos;
  - c) Montagem manual das chapas e componentes;
  - d) Passagem de fios;
- 5) Programação e integração;
- 6) Testes e validação;
  - a) Produção de placas identificadas;
  - b) Análise visual (para avaliar falhas e erros de desenho);
  - c) Análise de corrosão (para avaliar uniformidade da trilha);
  - d) Análise em microscópio (para avaliar acurácia da espessura);

## III. DESENVOLVIMENTO

O estudo bibliográfico realizado no decorrer do desenvolvimento foi resumido na Subseção III A, e pode ser consultado para embasar as escolhas descritas a seguir.

A escolha dos componentes se deu principalmente baseado na disponibilidade, levando em consideração requisitos esperados do sistema. O *driver* com motores de passo foi considerado suficiente em função do seu amplo uso em impressoras 3D, dispositivo que implementa também um robô cartesiano, embora com cabeça de extrusão em lugar de pintura. A escolha da classe NEMA 17 do motor se deu por requisitos de tamanho diminuto e compatibilidade com *drives* de menor

corrente. O *driver* TB6600 foi escolhido pela disponibilidade no campus, além de que possui boas características de divisão em micro-passo e é compatível com o motor e conjunto de controle. A transmissão mecânica por correia sincronizada se deu em função da boa relação custo/benefício, melhor garantia contra perda de passos que uma correia lisa ou em V, e baixa carga inercial. O perfil HTD foi escolhido pela performance e o passo 3M com largura 9 mm pela disponibilidade local. A polia foi escolhida para encaixar com o perfil da correia e favorecer a montagem em menor espaço. A relação de transmissão foi 1:1, para manter o design mais simples. O atuador linear por parafuso de potência com 2 posições fixas foi preferido para o eixo Z devido à simplicidade do controle e ausência da necessidade de movimento contínuo. A fonte de entrada CA e saída CC foi dimensionada para um máximo de 10 A, valor estimado de consumo considerando 2 motores de passo em condição de pico e o atuador linear. A tensão de 12 V foi escolhida por ser o máximo permitido de entrada para a placa Arduino MEGA 2560 e ser compatível com os componentes de potência, o que permitiu uso de uma única fonte de 2 canais (potência e controle).

O design eletro-mecânico foi desenvolvido em associação ao desenho CAD, por meio da plataforma Onshape. Ele é apresentado na Seção IV. Peças foram desenhadas sucessivamente em 3D para interconectar e posicionar os componentes primários da elétrica e mecânica, considerando que seriam cortadas a laser a partir de chapas de acrílico. Esse método de manufatura foi escolhido por disponibilidade particular ao autor, e algumas considerações práticas conhecidas previamente foram usadas para informar o design. Primeiro, o corte é 2D, o que limita a produção a componentes planos. A terceira dimensão é na verdade a espessura da chapa, e isso causa um agrupamento de peças por espessura, permitindo cortar juntas (em um mesmo painel de corte) apenas peças de uma mesma medida de chapa. No início, limitou-se a produzir peças nas espessuras de 2 mm, 6 mm e 10 mm, em razão da disponibilidade do material. Segundo, a fixação deve ocorrer tanto por encaixe entre as peças quanto por fixadores mecânicos não-permanentes (para permitir manutenção), dos quais foi preferido o parafuso de máquina. Algumas peças usaram dobra à mão por aquecimento com fio. O material acrílico oferece boa resistência mecânica e custo-benefício. Modelos dos componentes primários foram embutidos no desenho para garantir acurácia, muitos dos quais estavam prontos e disponíveis na própria plataforma. A fixação foi projetada após todos os componentes estarem presentes, organizando em 3D a colocação de derivações, passagem de fios, agrupamento com organizadores em espiral, e afins.

O projeto mecânico levou em consideração as seguintes necessidades:

- Cada eixo grau de liberdade contínuo (X e Y) deve ter:
  - ▶ Pelo menos 1 apoio de rigidez, ex. guias lineares;
  - ▶ Exatamente 1 apoio de controle, ex. correia sincronizada;
  - ▶ Exatamente 2 fins de curso (1 em cada extremo);
- A caneta deve ser acoplada elasticamente;
- A caneta deve ser facilmente removível;

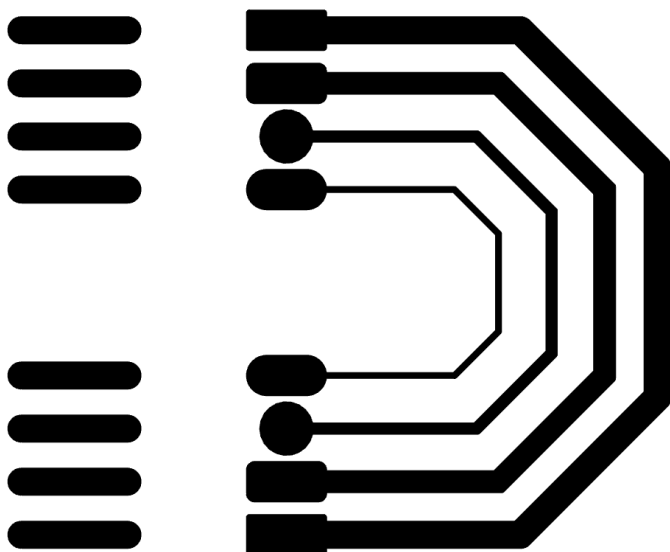


Figura 2. Desenho reproduzido para teste.

Para a montagem, listas auxiliares de parafusos, fios e componentes foram extraídas do projeto CAD. Os itens foram comprados e montados conforme projetado no desenho, ocasionalmente requerendo redesign para facilitar a montagem. Também foi usada uma lista de pontos elétricos e condutores, com informações dos fios, seu início e fim, comprimento e a qual conjunto pertenciam.

Na programação de controle, foi escolhido usar o *firmware* de código-aberto do projeto Klipper3D [4] (focado em impressoras 3D), bem como seu componente *host* em um computador acoplado, com configurações adaptadas para o uso em pintura. A configuração requer informações do acoplamento eletro-mecânico entre o controle eletrônico e o deslocamento resultante de cada eixo, com pinos do controlador a serem pulsados e constantes de escala. O cálculo da correspondência entre 1 rotação do motor e um deslocamento linear resultou na constante 57,0010571067 mm por revolução, onde o motor possui 200 passos por revolução divididos por meio do *driver* em 32 micro-passos, totalizando 6400 passos por revolução. O software *host* entende comandos em formato de código G, similar ao usado para máquinas CNC ou impressoras 3D. Idealmente, haveria um programa para converter arquivos de projeto eletrônico (em destaque o formato Gerber) em código G, mas esse desenvolvimento foi considerado como fora de escopo para o trabalho.

Por fim, a validação envolveu a produção de 4 placas identificadas como A, B, C e D. Em virtude das características do software *host*, um programa código G de teste foi desenvolvido para verificar a precisão, repetibilidade e exatidão da máquina. O desenho de exemplo que se busca reproduzir é apresentado na Figura 2, com espessuras de trilha de dentro para fora na sequência 0,4 mm, 0,8, 1,6 e 2,0 mm; e *pads* de formatos diversos.

#### A. Fundamentação teórica

Considerou-se a produção de PCI como iniciada a partir da placa em bruto. Essa é composta por uma camada de substrato planar dielétrico (não-condutor), sobre a qual é pré-

-depositada quimicamente uma camada de material metálico e condutor (mais comumente o cobre, que será pressuposto para este trabalho), em ambas faces ou em apenas uma. A escolha do substrato depende primariamente dos requisitos de características mecânicas, reatividade química e absorção de umidade. Algumas matérias-primas para PCI rígida são apresentadas na Tabela II. PCI flexíveis não foram consideradas pelo projeto, e podem possuir métodos de manufatura e materiais distintos. Assim, o foco do trabalho é em PCI rígidas e unilaterais. Em razão da característica de melhor planaridade e resistência ao empenamento, foi escolhido para os testes o uso de placas com substrato FR-4.

Na área da robótica que caracteriza os tipos de robôs, o robô cartesiano é frequentemente usado em sistemas onde deve haver movimento de um efetuator pontual em um volume cúbico onde a orientação do efetuator é fixa [5]. A estrutura do robô imita um sistema de coordenada cartesiano, com elos de movimento distribuídos em até 3 eixos ortogonais de movimento contínuo [5]. As características da estrutura favorecem o posicionamento preciso e obtenção de rigidez adequada [5]. O controle é facilitado por requerer apenas especificação de um ponto aonde ir, que intuitivamente pode ser obtido como uma coordenada cartesiana [5]. Um exemplo de robô cartesiano similar ao empregado pelo projeto é mostrado na Figura 3.

Para gerar movimento a partir do controle eletrônico, é necessário um motor elétrico e controlador para posição, velocidade e aceleração [7]. Muitos tipos existem, mas uma solução acessível e com robustez adequada é o motor de passo híbrido com um *driver* gerador de pulso [7]. É um sistema com estador provido de bobinas elétricas e um rotor ferromagnético dentado com uma topologia específica entre a orientação das bobinas com os polos magnéticos que garante alinhamento automático entre os componentes [7]. Quando pulsos de corrente são enviados pelas bobinas em uma sequência de frequência fixa e com diferença de fase, o alinhamento é incrementado em passos aproximadamente fixos, com alta precisão. Isso permite que o controle de posição ocorra em malha aberta, mantendo uma contagem de passos dados a partir de um local conhecido, demarcado por sensores tipo fim-de-curso [7]. *Drives* avançados podem ainda

TABELA II  
SUBSTRATOS RÍGIDOS COMUNS E SUAS CARACTERÍSTICAS. [1]

Material	Características	Uso
Resina fenólica (fenolite) / FR-2	Baixo custo; Fácil manuseio e corte; Alta absorção de água; Suscetível a ação em ambientes quimicamente ativos; Alta tendência de empenamento; Suscetível à temperatura e incêndio;	Projetos de baixo custo ou acadêmicos
Fibra de vidro com resina de epóxi / FR-4	Alta resistência mecânica; Alta resistência térmica e a incêndio; Baixa tendência de empenamento; Baixa absorção de água; Suscetível à reação em ambientes quimicamente ativos;	Material padrão para produtos comerciais e projetos industriais
Politetrafluoretileno / PTFE	Alta resistência mecânica; Alta resistência térmica; Baixa tendência de empenamento; Baixa absorção de água; Resistente à reação em ambientes quimicamente ativos; Alto custo;	Projetos com exposição química

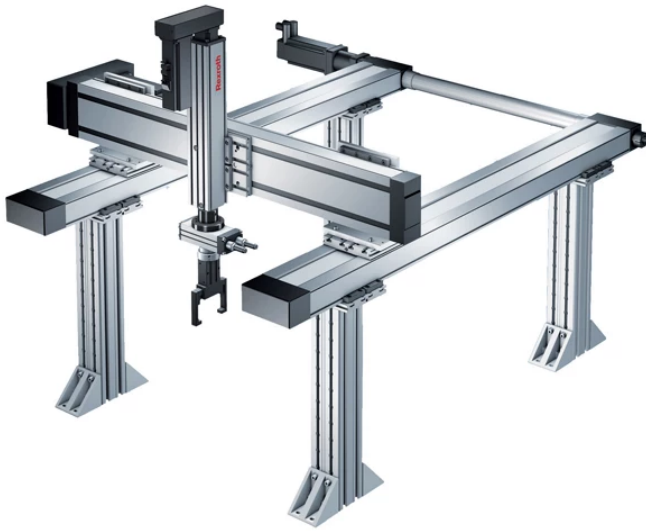


Figura 3. Fotografia de um robô cartesiano. [6]

usar ondas senoidais com energização parcial das bobinas para gerar posições intermediárias no curso do rotor, oferecendo uma performance balanceada entre precisão, torque e velocidade [7]. Um motor de passo NEMA 17 e seu *driver* correspondente TB6600 são apresentados como parte do diagrama de blocos na Figura 7, modelos usados neste projeto. Outra opção com melhor robustez porém maior custo é o motor de corrente contínua com *servodrive*, cuja principal diferença é o controle em malha fechada, incluindo posição, velocidade e aceleração [8].

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

##### A. Análise da construção do sistema

O design foi completamente feito na plataforma Onshape e está disponível publicamente [9]; incluiu modelagem 3D de peças, uso de componentes prontos para os motores, drivers, controladores, fins de curso e afins, e projeto eletro-eletrônico dos conectores e passagem de fios. O curso útil dos eixos X e Y é 200 mm (na montagem física, houve perda de aproximadamente 4 mm no eixo X). O efetuator do robô, que pode ser considerado como seu eixo Z, é um suporte retraível de caneta permanente, com uma caneta cuja espessura nominal da ponta é 0,4 mm, do tipo marcador permanente. A amplitude do movimento do efetuator é 10 mm, mas considerou-se como duas posições discretas, uma que não produz desenho (caneta retraída/levantada) e outra que produz (caneta estendida). O eixo Y é montado em referencial fixo em relação à máquina com 2 guias lineares, suportando o eixo X com 1 guia linear que suporta a cabeça de fixação da caneta. Cada eixo contínuo possui 2 sensores fim-de-curso, enquanto o eixo discreto é acionado por tempo. Um conjunto de visualizações por etapa de desenvolvimento são apresentadas na Figura 4, com avanço em ordem de leitura e com a mais inicial sendo a superior esquerda.

As cores das peças de acrílico no design representam o subsistema mecânico ao qual a peça pertence, conforme a Tabela III. Componentes metálicos, eletrônicos, flexíveis e

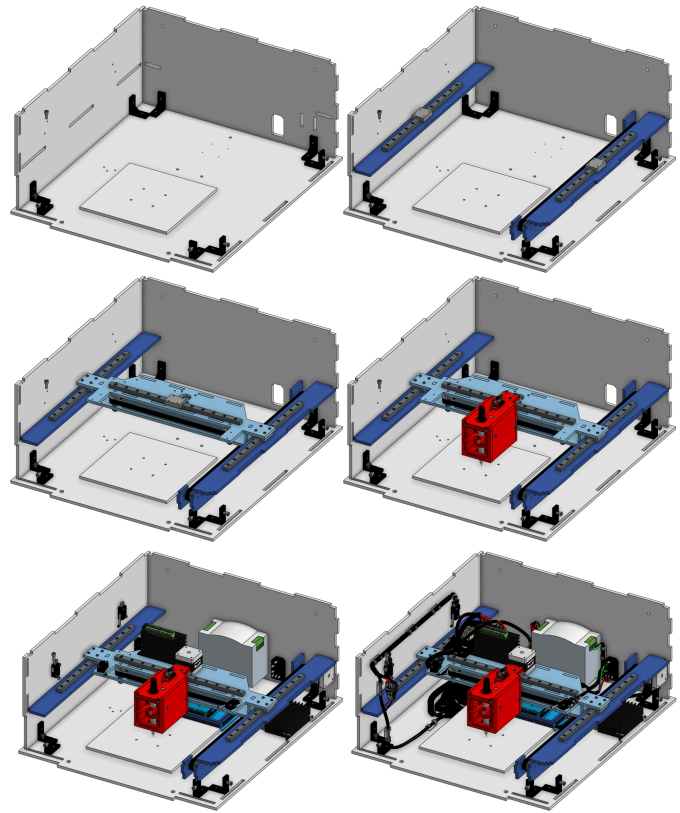


Figura 4. Vista isométrica do design, sem tampas frontal e lateral.

multicoloridos não seguem esse padrão, sendo reproduzidos com cores próximas do real. O padrão foi aplicado no design para fins ilustrativos, mas a montagem final usa chapas transparentes, brancas e pretas, devido à disponibilidade do material.

Cada motor de passo possui uma polia dentada de 20 dentes para correias HTD 3M com espessura de 9 mm. 3 polias tensoras lisas foram confeccionadas por torneamento, com 18 mm de diâmetro e 10 mm de largura do canal. O subsistema Y usa 1 polia tensora e tem correia sincronizada padrão HTD 3M vulcanizada de comprimento 960 mm, já o subsistema X usa 2 polias tensoras e tem correia de mesma especificação e comprimento 606 mm. 3 guias lineares de secção retangular tipo MGN12 por 300 mm com patins mini sem abas tipo MGN12C. Vistas em detalhe da organização de cada eixo são apresentadas na Figura 5.

O conjunto da cabeça de impressão, que suporta e movimenta a caneta, requiriu um número de ciclos de design particularmente grande. O resultado é mostrado em detalhe na Figura 6. Como pontos principais, pode-se ressaltar que o acoplamento entre o atuador linear e o carro que leva a

TABELA III  
TABELA DE CORES USADAS NO DESIGN.

Cor	Subsistema
Branco	Encapsulamento externo
Azul escuro	Eixo Y
Azul claro	Eixo X
Vermelho	Cabeça

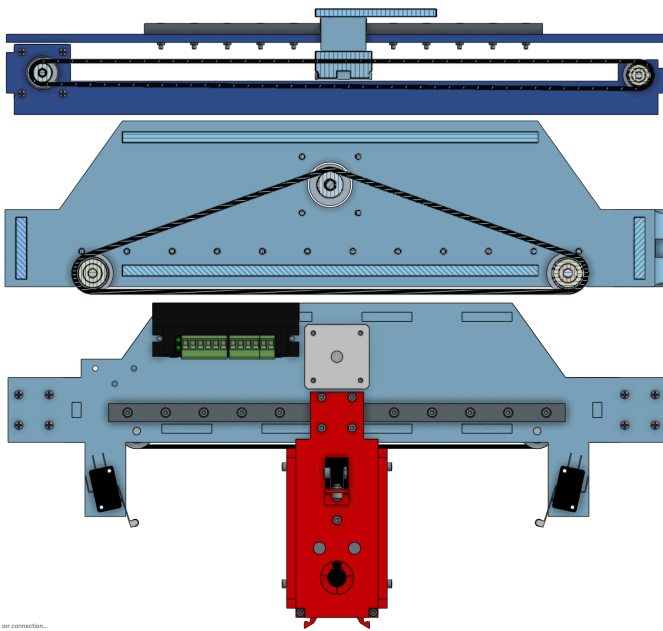


Figura 5. Vista perpendicular ao plano da correia de cada grau de liberdade, mostrando o encadeamento entre os pares XY e YZ. O eixo Y é mostrado em cima, o X é mostrado em vista de seção no meio e em vista superior em baixo.

caneta é feito por uma mola de tração, o que dá margem para absorver imperfeições e desníveis na placa; e que o fixador da caneta é um mecanismo com mola de tração, que permite introduzir/remover a caneta sem desmontar nenhuma peça, apenas movendo-a com a mão, e garante que ela esteja suficientemente presa devido à tensão extra aplicada na mola quando a caneta está presente.

Um diagrama de blocos simplificado/equivalente ao projeto elétrico implementado no desenho CAD é apresentado na Figura 7. Traços únicos com terminação em seta representam dados digitais e sua direção; Traços duplos representam conexões de potência/alimentação; A conexão digital de controle é marcada pela palavra “USB” amecida ao traço; A conexão CA com a rede elétrica é marcada por um traço espesso com ponta em forma de tomada de 3 pinos.

A caneta utilizada é mostrada na Figura 8.

O sistema montado é mostrado na Figura 9. O controle é implementado com *firmware* disponibilizado publicamente pelo projeto Klipper3D, gravado em uma placa Arduino MEGA 2560 (que se baseia no microcontrolador ATmega 2560). Uma conexão por cabo USB é usada para ligá-lo ao controlador no computador *host*, um Raspberry Pi 4, executando sistema operacional baseado no kernel Linux e com um serviço de plano de fundo programado também pelo projeto Klipper3D que configura e envia comandos ao *firmware*. Um software auxiliar de interface foi programado neste projeto para enviar comandos em código G para o serviço *host*.

### B. Análise das placas produzidas

O programa código G move a caneta pela área a ser preenchida, considerando sua espessura como incremento entre um traçado e outro. Os *pads* são feitos de fora para dentro, com a descida da caneta sempre ligeiramente mais interna que

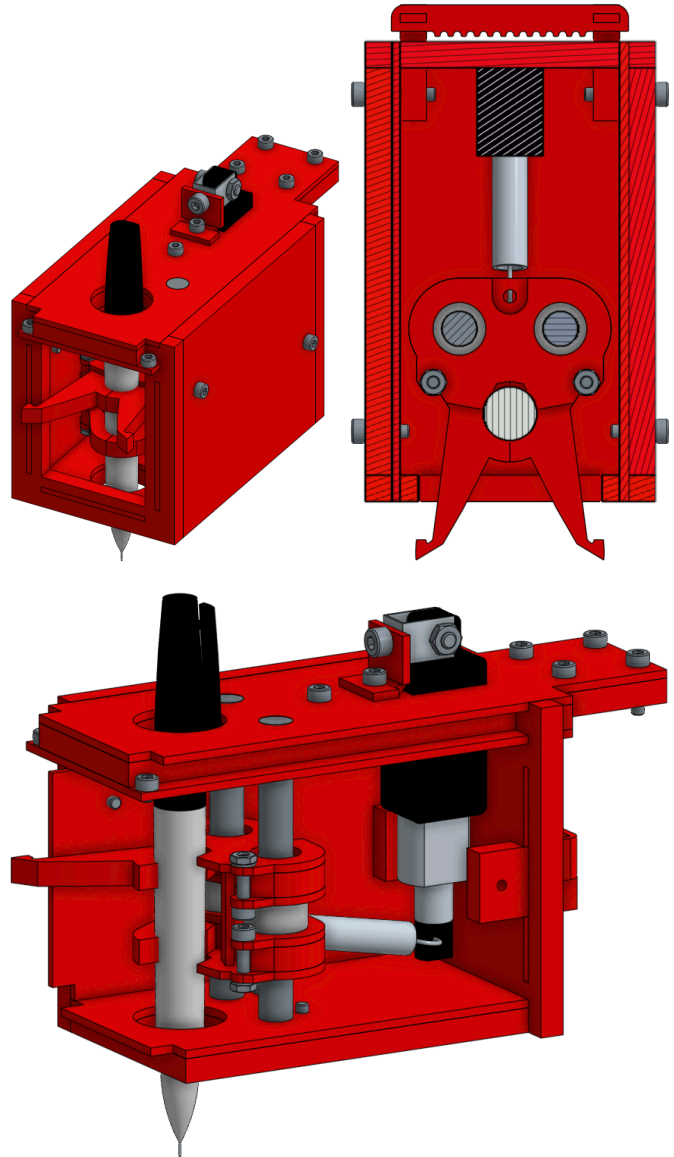


Figura 6. Vista superior com corte transversal e isométrica da cabeça.

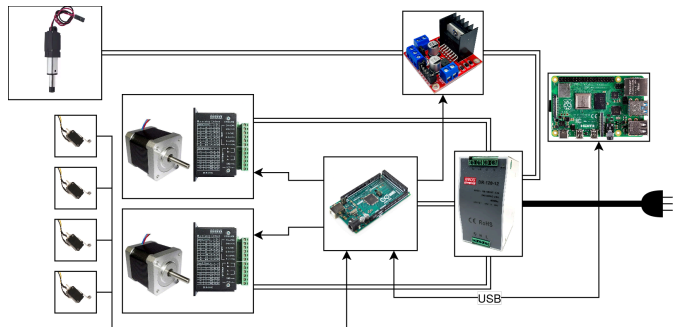


Figura 7. Diagrama de blocos eletro-eletrônico.



Figura 8. Fotografia do marcador permanente usado no efetuador.

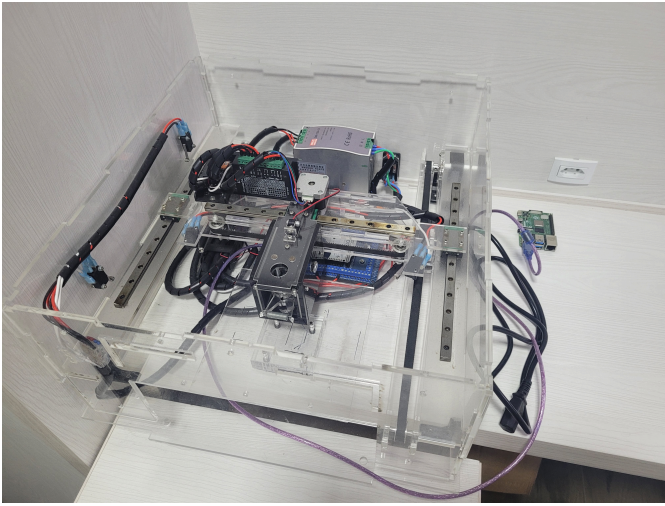


Figura 9. Fotografia da máquina montada, com cabo de força desconectado e computador *host* (Raspberry Pi 4) desligado, à direita.

o contorno externo do *pad*; isso evita uma falha devido à colisão elástica no final da descida, da ponta da caneta com superfície de cobre. As trilhas são feitas de fora para dentro, mas em padrão vai-e-vem, em lugar de *inset*; do seu ponto inicial até o final e de volta. Quando termina um traçado e precisa ir para outro descontínuo, retrai a caneta antes do movimento e estende após. O processo pode ser visualizado na Figura 10, onde linhas azuis representam movimentos com a caneta abaixada (produzindo desenho) e linhas amarelas representam movimentos com a caneta levantada (não produzindo desenho).

O programa foi executado uma vez para ajuste da altura da caneta (procedimento necessário sempre que a caneta for substituída ou recolocada), sendo essa primeira amostra descartada, e em seguida quatro vezes em placas distintas, gerando amostras de A a D. A amostra D foi corroída em perclorato de ferro. Todas foram analisadas sob inspeção visual e com microscópio digital DIGILAB DI-152T, conectado ao software de captura OPTO-EDU ImageView versão 4.11. Uma régua de precisão com divisões medindo 0,1 mm foi usada como auxílio para mensurar as trilhas.

Na Figura 11 são apresentadas as amostras em vista macroscópica. Podemos observar um traçado bastante uniforme e com boa repetibilidade aparente. Apenas 1 falha chama

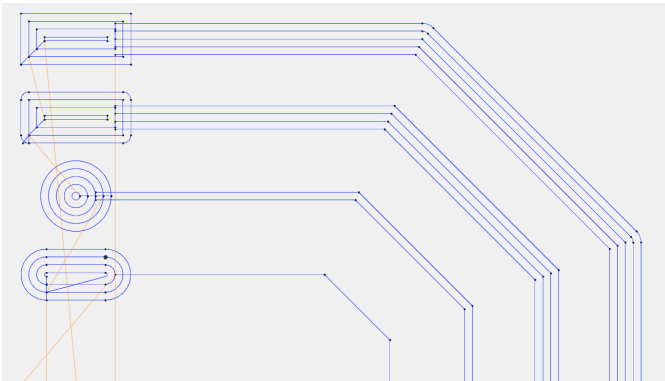


Figura 10. Parte do caminho implementado pelo código G.

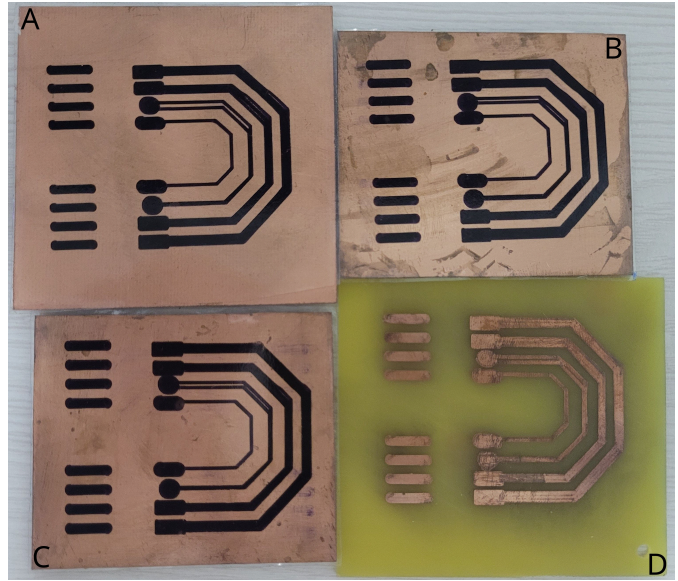


Figura 11. Fotografia das amostras produzidas, com indicador A a D de cada amostra sobreposto por edição de imagem.

atenção e é ampliada na Figura 12, onde dois traçados que deveriam ser adjacentes para formar 1 trilha, se dividiram em 2 trilhas. Acredita-se que isso ocorreu devido a uma pequena folga no furo da polia em relação ao eixo do motor, que faz parte do curso sofrer um contra-torque indesejado por causa da excentricidade da polia. Isso afeta especialmente o eixo Y, no qual se observou o deslocamento entre os traçados.

Na Figura 13, são apresentadas as imagens microscópicas das trilhas, com a régua calibrada em vista. Cada linha corresponde a uma amostra, A a C de cima para baixo, e cada coluna corresponde a uma trilha, interna a externa da esquerda para direita. Observa-se que o traço mínimo real acabou maior que a espessura nominal da caneta, com aproximadamente 0,75 mm, devido à deformação elástica do material esponjoso na ponta da caneta. Como tal, as espessuras dos traços com 2, 4 e 5 passes adjacentes acabaram com um médias de espessura iguais a aproximadamente 1,1 mm, 1,95 mm e 2,45 mm, respectivamente. O acréscimo observado considerando a diferença entre a média das espessuras reais e o valor desejado foi de 87,5 %, 37,5 %, 21,875 % e 122,5 %, respectivamente, com média aproximada de 42,343 %. Salvo pelo traço mais fino, esse erro poderia ser corrigido refazendo a programação levando em consideração a informação de que o traço real é de 0,75 mm de espessura, usando esse valor para os incrementos entre traçados. Medidas dos resultados são apresentadas na Tabela IV.



Figura 12. Ampliação da falha, usando a fotografia da Figura 11 como base.

TABELA IV  
MATRIZ DE MEDIDAS DAS TRILHAS; A LINHA CORRESPONDE À AMOSTRA E A COLUNA À QUANTIDADE DE PASSADAS.

	1 (0,4 mm)	2 (0,8 mm)	4 (1,6 mm)	5 (2,0 mm)
A	0,75 mm	1,0 mm	1,9 mm	2,45 mm
B	0,8 mm	1,1 mm	1,95 mm	2,5 mm
C	0,75 mm	1,05 mm	1,9 mm	2,5 mm
D	1,0 mm	1,2 mm	2,0 mm	2,55 mm

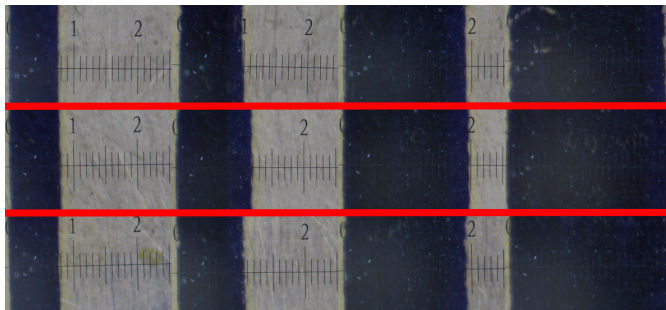


Figura 13. Painel com imagens de microscópio de todas as trilhas das placas não corroídas.

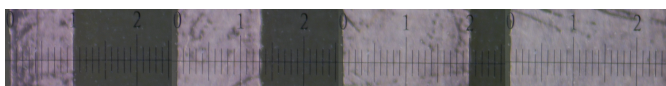


Figura 14. Painel com imagens de microscópio de todas as trilhas da placa corroída.

Na Figura 14, é apresentado o resultado da trilha após corrosão da placa, para servir de indicativo de qualidade da cobertura (uniformidade). Observa-se que além da expansão em função da elasticidade da ponta da caneta, houve uma expansão associada à corrosão, que se torna mais notável conforme a espessura desejada aumenta, atingindo 0,5 mm na maior trilha. Essa expansão não é resultado do projeto, no entanto, mas sim do processo de corrosão e do agente escolhido.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho projetou, executou e analisou uma *plotter* para prototipagem de PCI. A precisão, exatidão e repetibilidade obtida é compatível com uso em laboratório, voltado à avaliação de protótipos rápidos, antes de uma produção mais elaborada por fotolitografia. O uso em ambiente educacional foi atingido.

O design é público e foi desenvolvido de forma aberta, constituindo-o como uma contribuição para além do artigo. Todas as informações relacionadas à montagem estão presentes no projeto CAD na plataforma Onshape, e as relacionadas a software e *firmware* são resumidas neste artigo e podem ser vistas em maior detalhe na documentação do projeto Klipper3D, que é de código aberto. Assim, os resultados são reproduzíveis e não possuem alto custo na sua execução.

Algumas limitações foram encontradas, das quais se destacam o aumento da espessura mínima em relação à nominal de 0,4 mm e a perda de passos ocasional relacionada à folga nas polias. Quanto à primeira, o trabalho retém o valor

acadêmico, apenas resultando em uma mudança de especificação atingida na espessura mínima da trilha, que se torna 0,75 mm; valor que ainda é compatível com o uso desejado. Uma opção para diminuir esse mínimo seria a substituição da caneta por uma com maior rigidez na ponta, em um possível trabalho posterior. A segunda pode ser resolvida futuramente com a compra e substituição das polias dentadas por versões com diâmetro do furo igual ao diâmetro do eixo do motor, removendo a folga.

Um desenvolvimento útil mas que foi considerado fora de escopo para este trabalho é a programação de um sistema complementar capaz de converter um arquivo em formato Gerber (conforme gerado por software ECAD) em código G, para viabilizar uso explanatório em sala de aula, além do uso extra-classe para projetos.

Trabalhos futuros podem ainda explorar a ideia de um cabeçote por injeção de tinta, com bico em espessura menor para melhor granularidade na impressão.

## REFERÊNCIAS

- [1] I. Grout, "Chapter 3 - PCB Design", em *Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs*, Newnes, 2008, p. 123–176. doi: 10.1016/B978-0-7506-8397-5.00003-9.
- [2] Oliver Huber, Erich Schlaffer, Thomas Faseth, e Holger Arthaber, "Characterization of Printed Circuit Board Material & Manufacturing", 2022. Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: [https://www.ipc.org/system/files/technical\\_resource/E38%26S11-02%20-%20Erich%20Schlaffer.pdf](https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E38%26S11-02%20-%20Erich%20Schlaffer.pdf)
- [3] Petr Kratochvil, "Integrated Circuit". Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.publicdomainpictures.net/en/view-image.php?image=integrated-circuit&id=14462>
- [4] Kevin O'Connor, "Documentação do firmware de impressora Klipper3D". Comunidade open-source, 2025. Acesso em: 12 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.klipper3d.org/>
- [5] Davide Bellini, Francesco Pirovano, Claudio Moltone, e Giuseppe Quaglia, "Analysis and Control of Vibrations of a Cartesian Cutting Machine Using an Equivalent Robotic Model", *Machines*, v. 9, n. 8, ago. 2021, doi: 10.3390/machines9080162.
- [6] Engineering.com, "Cartesian Robot Supports Three Axes of Motion". Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: [https://res.cloudinary.com/engineering-com/image/upload/w\\_640,h\\_640,c\\_limit,q\\_auto,f\\_auto/121213-6-Cartesian-robot-supports\\_qi9yuy.jpg](https://res.cloudinary.com/engineering-com/image/upload/w_640,h_640,c_limit,q_auto,f_auto/121213-6-Cartesian-robot-supports_qi9yuy.jpg)
- [7] Hansruedi Kindl, Witold Nowotny, e Klemens Schwimbeck, "Chapter 7 – Stepper drives", em *Electrical Drives: Principles, Planning, Applications, Solutions*, Springer Vieweg, 2016, p. 182–193. Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://vdoc.pub/documents/electrical-drives-principles-planning-applications-solutions-jp8a0og4rjo0>
- [8] Hansruedi Kindl, Witold Nowotny, e Klemens Schwimbeck, "Chapter 6 – Servo drives", em *Electrical Drives: Principles, Planning, Applications, Solutions*, Springer Vieweg, 2016, p. 126–181. Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://vdoc.pub/documents/electrical-drives-principles-planning-applications-solutions-jp8a0og4rjo0>
- [9] Luigi Sartor Piucco, "Projeto CAD/CAM edupcb". Acesso em: 5 de novembro de 2025. [Online]. Disponível em: <https://cad.onshape.com/documents/0937559f19b29110094eccc2/v/d57f4631aa56b2dc3c6f9dbe/e/78f923bf32429534483f2e1b?showReturnToWorkspaceLink=true>