

DISCIPLINA EA801
Laboratório de Projetos de Sistemas Embarcados

Projeto de Placas de Circuitos Impressos

Esquemático, *Layout*, ERC, DRC e Geração de Arquivos de Fabricação

Profs. Fabiano Fruett, Antonio Augusto Fasolo Quevedo e Wu Shin-Ting.

Suporte Técnico: João Paulo Gomes

FEEC / UNICAMP

**Revisado por Wu Shin-Ting em abril de 2026 (adequação do enfoque de Pico/VS Code
para BlackPill/STM32Cube)**

Editado em agosto de 2025 com suporte de Chatgpt, Gemini e NotebookLM



This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

INTRODUÇÃO	2
DESAFIO	4
FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
PCBs	6
Verificação de regras elétricas	10
Organização dos componentes em seções lógicas	11
Layout de uma PCB	12
Roteamento	15
Verificação de regras de projeto (DRC)	16
Planos de terra e alimentação em PCBs de 2 camadas	17
Fabricação de uma PCB	20
Produção da primeira peça	21
Técnicas de soldagem	21
FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS	26
Geração automática de arquivos de fabricação de PCBs	26
Etapa 1: Projeto e verificação do esquemático (ERC)	26
Etapa 2: Layout e verificação física do projeto (DRC)	27
Etapa 3: Geração automática dos arquivos de fabricação	32
Soldagem dos componentes	33
Projeto de uma PCB a partir de um Esquemático com Footprints	35
Iniciando o layout (roteamento da placa)	35
Roteando na prática	40
Criando os planos de terra	40
Verificação final	41
Artes finais	42
Guia de desenvolvimento do projeto P4	43

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de projetos eletrônicos frequentemente tem início com a montagem de circuitos em *protoboard*, uma abordagem prática e eficiente para testes iniciais e validação de ideias. No entanto, à medida que os projetos evoluem e se aproximam de uma aplicação real ou produção em escala, torna-se necessária a transição para o desenvolvimento de placas de circuito impresso (em inglês, *print circuit board* – PCB). Essa transição garante maior confiabilidade, durabilidade, compactidade e organização dos circuitos, além de possibilitar a fabricação em massa com consistência e qualidade.

Mais do que simplesmente conectar eletricamente os componentes, o projetista deve possuir conhecimentos técnicos sobre *design* de PCBs, como posicionamento e roteamento de componentes, integridade de sinal, regras de fabricação (DFM) e limitações dos processos industriais. Apenas com esses cuidados é possível transformar um protótipo funcional em um produto viável e fabricável.

Desde a concepção inicial de um projeto eletrônico até o roteamento final das trilhas, cada decisão do projetista influencia aspectos como:

- integridade de sinal, garantindo que sinais digitais e analógicos não sofram degradações indesejadas;
- dissipação térmica, assegurando que o calor gerado pelos componentes seja eficientemente conduzido ou dissipado;
- proteção de sinais, minimizando interferências eletromagnéticas e ruídos externos;
- dimensionamento de trilhas e *pads*, adequando larguras, espaçamentos e áreas de contato às correntes e processos de fabricação;
- planos de terra e alimentação, promovendo estabilidade elétrica, retorno adequado de sinais e imunidade a ruídos; e
- robustez mecânica e testabilidade, facilitando montagem, inspeção e manutenção.

A base para transformar um projeto elétrico em uma PCB funcional é o desenho do esquemático. Esse esquemático define as conexões lógicas entre os componentes eletrônicos, além de associar cada componente a um *footprint*, que representa seu formato físico e a maneira como será montado na placa. Nos projetos voltados para desenvolvimento com FPGAs, o esquemático geralmente tem um papel diferente: ele é utilizado para descrever a lógica do circuito e pode ser implementado diretamente no *chip*, sem necessariamente passar pela fabricação de uma placa física. Já no caso de projetos de PCBs reais, o esquemático é o ponto de partida para uma cadeia de decisões que impactam diretamente a fabricabilidade, o desempenho e a confiabilidade do circuito em ambiente físico.

Ferramentas especializadas para projeto de PCB, como [Altium Designer](#), [KiCad](#) e [Eagle](#), incluem essas funcionalidades essenciais: criação do esquemático, associação com *footprints*, e definição das regras de *layout*. O projetista deve usar essas ferramentas em conjunto com boas práticas de engenharia eletrônica, para garantir que o circuito não funcione apenas na simulação, mas também opere de forma confiável no mundo real — enfrentando variações térmicas, interferências eletromagnéticas e uso contínuo. Ao iniciar um novo projeto de PCB, é comum esquecer algumas regras de *design* críticas que podem evitar retrabalhos futuros. Por isso, é importante, logo no início, consultar a fabricante da placa para obter as capacidades de fabricação — como largura mínima de trilha, espaçamento, número de camadas e tipo de empilhamento. Essas informações estão geralmente disponíveis no *site* da fabricante. Além disso, é recomendável verificar se o projeto exige o cumprimento de normas de confiabilidade, como as [normas IPC Classe 2 ou Classe 3](#), e adaptar o *design* conforme a exigência.

Este roteiro apresenta os fundamentos essenciais para o projeto eficiente de uma PCB, com foco em *layout*, roteamento, dimensionamento de trilhas e *pads*, estratégias de proteção de sinais e dissipação térmica. Ao compreender e aplicar esses conceitos, o projetista assegura que o *hardware* desenvolvido atenda aos requisitos técnicos e esteja preparado para as etapas subsequentes de prototipagem e produção.

DESAFIO

Este projeto tem como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema embarcado funcional utilizando o *kit* [BitDogLab](#) (BDL) e a placa [BlackPill](#). A equipe será responsável por identificar um problema (real ou hipotético) e propor uma solução baseada em microcontroladores. A equipe deve usar os periféricos *on-board* do *kit*, pelo menos um periférico *off-board* com comunicação serial (UART, I2C, SPI, I2S, etc), e dois periféricos adicionais, que podem ser módulos ou construídos com componentes diversos, sendo que pelo menos um deles deve ser um circuito *bare*. Deve-se elaborar o esquemático e o *layout* da placa de circuito impresso com os elementos *off-board*, bem como gerar os arquivos de fabricação para que a placa seja confeccionada pelo SATE. Configure os pinos e periféricos com o [STM32CubeMX](#) e implemente a lógica do *firmware* com base na API HAL, utilizando o [STM32CubeIDE](#) como ambiente de desenvolvimento.

Recursos disponíveis são

- *Kit* de Desenvolvimento BDL (com placa [BlackPill](#) e diversos periféricos).
- *Probe* de depuração [ST-Link/v2](#),
- Ferramentas de produção de uma PCB a partir de [arquivos de Gerber](#).
- Documentação técnica do microcontrolador STM32F411xC ([datasheet](#), [HAL](#), [CMSIS-RTOS v2](#)).
- Documentação técnica da placa BlackPill ([guia de uso](#)), do BDL ([esquemático](#)) e dos periféricos ([datasheets](#)).
- Ambientes de desenvolvimento integrados (IDEs) e *toolchains* relevantes: [STM32CubeMX](#), [STM32CubeIDE](#).
- Ambiente de edição de esquemáticos e *layout*: [KiCAD](#).
- [Exemplos de programação em C](#) para os *firmwares* da BDL + BlackPill..
- Apoio do professor para dúvidas técnicas e metodológicas.

O projeto será dividido nas seguintes fases:

1. Fase de Conceituação e Requisitos

- Definição do Problema: A equipe deverá identificar e descrever um problema que possa ser solucionado por um sistema embarcado. O problema deve ser claro e permitir a aplicação dos conceitos estudados.
- Levantamento de Requisitos: Com base no problema, a equipe definirá os requisitos funcionais (o que o sistema deve fazer) e requisitos não-funcionais (desempenho, custo, tamanho, consumo de energia, etc.).
- Justificativa Técnica: Elaborar uma breve justificativa da relevância e viabilidade técnica da solução proposta.

2. Fase de Análise Técnica e Seleção de Periféricos:

- Seleção de Periféricos do *Kit* BDL:
 - Com base nos requisitos definidos, a equipe deverá identificar e selecionar os periféricos necessários do *kit* BDL e no mínimo três novos periféricos.

- Justificativa para cada periférico: Explicar por que cada periférico selecionado é o mais adequado tecnicamente para cumprir sua função no sistema, considerando suas especificações (precisão do sensor, capacidade de corrente, tipo de interface de comunicação, etc.).

3. Fase de Implementação e Testes

- Desenvolvimento de *Firmware*: Implementar o *firmware* do sistema no microcontrolador selecionado, utilizando a interface **HAL ou CMSIS-RTOSv2**. O código deve ser bem estruturado, modularizado e utilize a sintaxe [Doxygen](#) para [a documentação dos programas em C](#).
- Desenvolvimento de *Hardware*: Projetar PCB para o circuito de interface entre os periféricos *off-board* com os conectores da BitDogLab.
- Integração *Hardware-Software*: Conectar o circuito em PCB com a placa de desenvolvimento no *kit* BDL e realizar a integração física e lógica.
- Testes: Realizar testes de unidade, integração e validação do sistema para garantir que todos os requisitos funcionais e não-funcionais sejam atendidos. Isso abrange testar a leitura de sensores, o acionamento de atuadores e a lógica de controle, quando aplicável.

4. Entregas do Projeto

- Documento de Projeto (Relatório no arquivo README.md do repositório do projeto no GitLab seguindo o [modelo](#), e o *link* do projeto no Moodle).
- Esquemáticos com as dimensões dos *footprints* corretas e *layout* da PCB:
 - Circuitos de interface dos periféricos *off-board* usados no projeto.
- Código-Fonte:
 - Código completo do *firmware*, organizado e comentado, no repositório de controle de versão GitLab da Unicamp.
- Demonstração do Protótipo:
 - Apresentação do sistema funcionando no *kit* BDL, com o circuito adicional montado no *protoboard*, durante a aula de entrega do projeto.

Avaliação

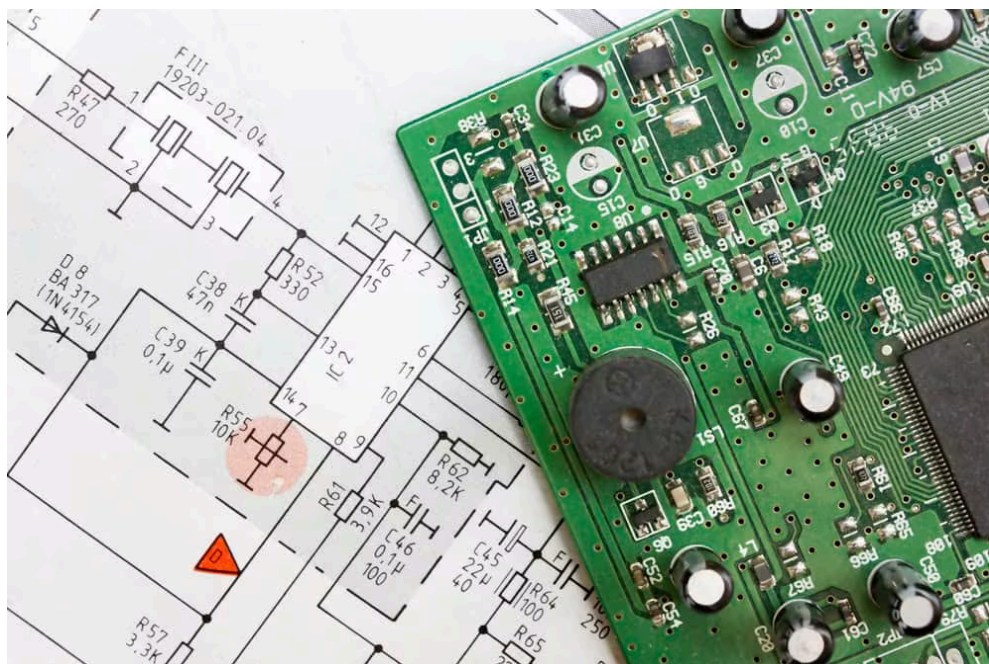
O projeto será avaliado com base na:

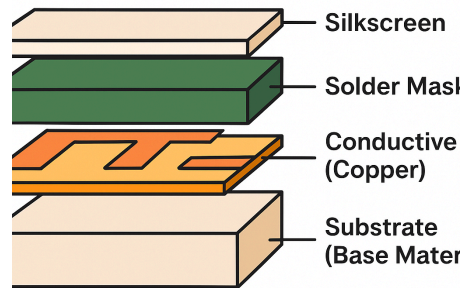
- funcionalidade da solução implementada.
- qualidade do código (estrutura, clareza, documentação).
- qualidade do esquemático (legibilidade, *footprints*) e *layout* (manufabilidade).
- capacidade de aplicar os conceitos de sistemas embarcados.
- organização e clareza do relatório final e da apresentação.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A concepção de uma PCB é um processo que transforma um diagrama elétrico abstrato em um circuito eletrônico físico. Durante o desenho de esquemáticos, conforme abordado no [Roteiro 2](#), já se deve ter em mente a realização física do circuito. Por isso, chamamos a atenção para a importância de se preocupar com a escolha dos elementos eletrônicos e o registro de suas

características físicas, os *footprints*, no banco de dados. Vimos que, embora no desenho esquemático o símbolo de um componente seja o mesmo, independentemente de ser SMD (do inglês, *Surface Mount Device*) ou THT (do inglês, *Through-Hole Technology*), deve-se vincular e registrar no projeto cada símbolo a um encapsulamento específico que já possui um *footprint* (a “pegada” física do componente) definido.

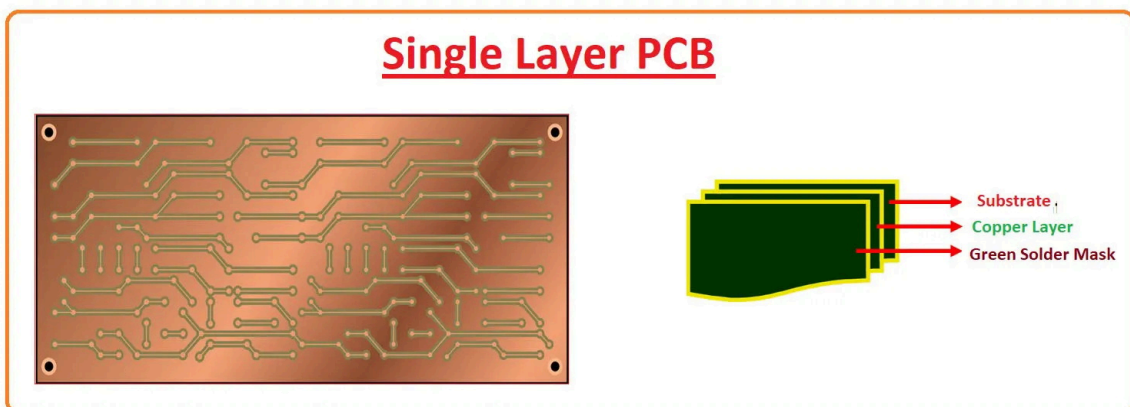




Fonte: [Ersa Electronics](#).

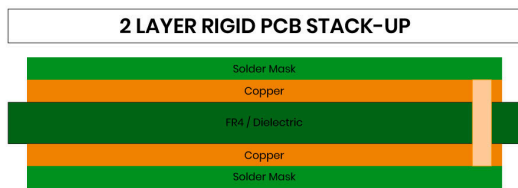
O princípio é simples: ao projetar a placa, o engenheiro define o *layout* das trilhas de cobre que conectarão os componentes. Durante a fabricação, as trilhas são gravadas e os furos são perfurados (para a inserção de componentes ou para a comunicação entre camadas). Por fim, os componentes são montados e soldados nessas áreas expostas, formando um circuito completo.

Os diferentes tipos de PCBs são classificados com base em características como o número de camadas, o tipo de substrato e a flexibilidade do material, o que impacta diretamente seu desempenho elétrico, resistência mecânica e capacidade de dissipação térmica. O tipo mais simples é a PCB de face única, que possui trilhas de cobre em apenas um lado da placa, enquanto os componentes eletrônicos são montados no lado oposto. Essas placas são amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos básicos, como fontes de alimentação e rádios, devido ao seu baixo custo e facilidade de fabricação. No entanto, sua capacidade de interconexão é limitada, o que restringe seu uso a circuitos menos complexos.

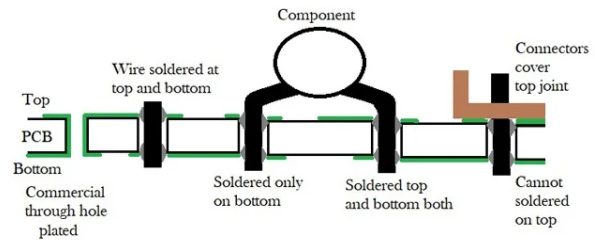


Fonte: [PCBasic](#).

À medida que aumenta a complexidade dos circuitos, surge a necessidade das PCBs de face dupla, que apresentam trilhas condutoras em ambos os lados da placa. A comunicação entre as duas faces é feita por meio de furos metalizados, chamados *vias through-hole*, que permitem maior densidade de componentes e maior flexibilidade no projeto. Essa configuração é comum em sistemas de controle, painéis de automação e dispositivos de consumo intermediário.

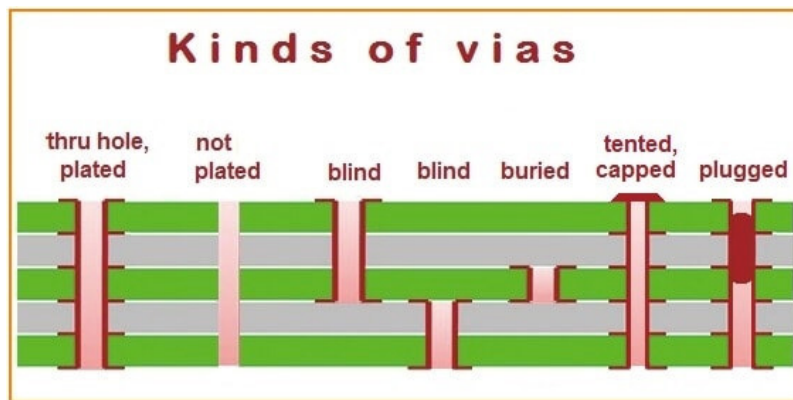


Fonte: [PCBasic](http://PCBasic.com).



Fonte: [Microcontrollerslab](http://Microcontrollerslab.com).

Para aplicações mais exigentes, PCBs multicamadas utilizam várias camadas condutoras intercaladas por materiais isolantes. A interconexão é feita por furos metalizados, chamados vias, que permitem maior densidade de circuitos, melhor desempenho elétrico e maior imunidade a interferências. Por isso, são essenciais em equipamentos de alto desempenho, como computadores, servidores, dispositivos médicos e sistemas de comunicação.



Fonte: [Analogictips](http://Analogictips.com).

As vias se dividem em três tipos principais:

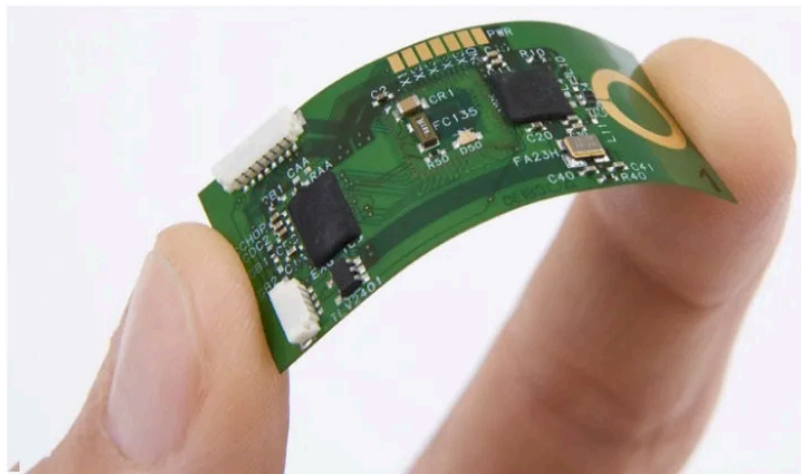
- Via de Passagem (em inglês, *Through-Hole*): É o tipo mais comum. O furo atravessa todas as camadas da placa, da superfície superior à inferior. Embora seja o mais simples de fabricar, ocupa espaço em todas as camadas, o que pode limitar o roteamento em *designs* complexos.
- Via Cega (em inglês, *Blind Via*): Conecta uma camada externa (superior ou inferior) a uma ou mais camadas internas, mas não atravessa a placa completamente. É “cega” porque não é visível do outro lado, economizando espaço em *designs* de alta densidade.
- Via Enterrada (em inglês, *Buried Via*): Conecta apenas duas ou mais camadas internas da placa e fica completamente “enterrada” entre elas, sendo invisível das superfícies externas. Esse tipo de via é usado para maximizar o espaço de roteamento nas camadas externas e é fundamental em placas com muitas camadas.

Além desses tipos de conexão, as vias também podem ter tratamentos especiais:

- Via Coberta ou Tampada (em inglês, *Tented/Capped Via*): Uma via de passagem que é coberta com a máscara de solda da PCB. Isso a protege de contaminantes e evita que a solda esorra para dentro do furo durante a montagem.

- Via Preenchida (em inglês, *Plugged Via*): Uma via que é totalmente preenchida com um material não condutor (resina ou epóxi) e, em alguns casos, revestida com cobre. Essa técnica cria uma superfície plana, permitindo que componentes sejam colocados diretamente sobre a via, o que é comum em *designs via-in-pad*.

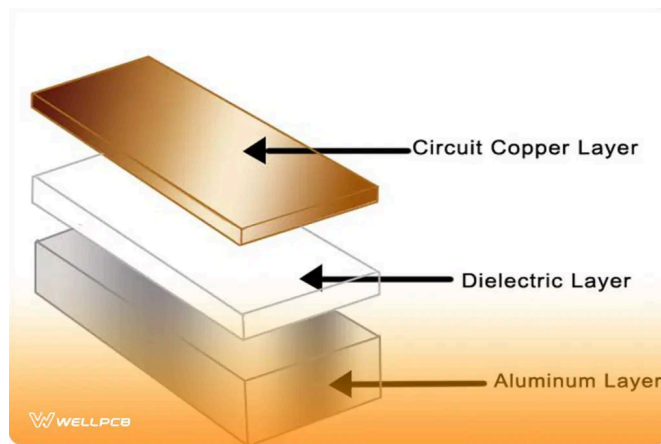
Além do número de camadas, a natureza do material de substrato também diferencia os tipos de PCBs. As PCBs rígidas são as mais comuns e utilizam materiais como o FR-4 (fibra de vidro com epóxi), proporcionando robustez e resistência mecânica. Estão presentes na maioria dos eletrônicos de uso cotidiano, como televisores, impressoras e eletrodomésticos. Em contraste, as PCBs flexíveis são feitas com substratos como poliimida ou Kapton, permitindo que a placa seja dobrada e ajustada a formatos irregulares sem comprometer seu funcionamento. Essa flexibilidade as torna ideais para dispositivos compactos e portáteis, como *smartphones*, câmeras digitais e dispositivos vestíveis (*wearables*).



Fonte: [RSDesignsapark](https://www.rsdesignsapark.com/).

Há também a possibilidade de combinar os dois tipos anteriores em uma PCB rígido-flexível, que integra seções rígidas com trechos flexíveis em um único circuito. Essa solução híbrida é amplamente utilizada em aplicações de alta confiabilidade e espaço reduzido, como equipamentos aeroespaciais, militares e dispositivos médicos, onde é necessário um alto grau de integração e resistência mecânica.

Por fim, destacam-se as PCBs com núcleo metálico (*Metal Core PCBs*), que utilizam materiais como alumínio ou cobre como base, com uma camada isolante termicamente condutiva entre o metal e a trilha de cobre. São projetadas especificamente para aplicações com grande geração de calor, como sistemas de iluminação LED de alta potência, fontes chaveadas e módulos de potência. A principal vantagem desse tipo de placa é a sua capacidade superior de dissipação térmica.



Fonte: [Wellpcb](http://Wellpcb.com).

Para garantir a qualidade e a confiabilidade das PCBs, a IPC (do inglês *Institute for Printed Circuits* e agora *Association Connecting Electronics Industries*) estabelece padrões que categorizam as placas em três classes, com base no seu nível de qualidade. Essa classificação ajuda a padronizar a fabricação e a garantir que o produto final atenda aos requisitos de sua aplicação, equilibrando custo e confiabilidade.

- IPC Classe 1 - Produtos eletrônicos gerais: Inclui produtos de uso diário, onde a função principal é o único requisito, e a vida útil é limitada. Falhas nesses produtos não são críticas. Exemplos: brinquedos, controles remotos.
- IPC Classe 2 - Produtos eletrônicos de serviço dedicado: Engloba produtos onde o desempenho e a vida útil prolongada são desejadas, mas não críticas. Falhas podem ser toleradas, mas não devem causar danos. Exemplos: TVs, ar-condicionado e equipamentos de comunicação.
- IPC Classe 3 - Produtos eletrônicos de alta confiabilidade: Representa o mais alto nível de qualidade e confiabilidade. O desempenho ininterrupto é fundamental, e o tempo de inatividade não é aceitável. Uma falha pode colocar vidas em risco ou causar danos severos. Exemplos: dispositivos médicos, sistemas de aviação e aeroespaciais, e equipamentos militares.

Verificação de regras elétricas

A Verificação de Regras Elétricas, ou ERC (do inglês *Electrical Rule Check*), é uma etapa realizada antes do *layout* da PCB. Seu objetivo é garantir que o esquemático do projeto esteja logicamente correto, ou seja, sem erros de conexão elétrica que comprometam o funcionamento do circuito. Felizmente, essa tarefa crucial é amplamente suportada por aplicativos de *design* de PCBs. Durante a execução do ERC, o esquemático é analisado em busca de falhas comuns como:

- redes flutuantes (em inglês, *floating nets*): fios ou conexões que não levam a lugar nenhum e não têm função definida no circuito.
- pinos desconectados: pinos de componentes que deveriam estar conectados, mas permanecem isolados.
- conflitos de saída: duas ou mais saídas ativas de componentes conectadas diretamente entre si, podendo gerar curtos-circuitos.
- fontes de alimentação sem aterramento: ausência de caminho de retorno para a corrente elétrica, o que inviabiliza o funcionamento do circuito.

Esses erros, se não forem corrigidos, podem levar a falhas graves na placa física, muitas vezes só percebidas após a fabricação, implicando retrabalho, atrasos e aumento de custos.

O ciclo verificação-correção se repete até que nenhum erro crítico seja reportado, garantindo que o esquemático esteja tecnicamente correto antes de ser transferido para a etapa de edição de *layout* da PCB. Isso pode evitar erros que seriam muito mais difíceis (e caros) de corrigir depois. Um erro no esquemático pode ser corrigido em segundos; já na placa pronta, o mesmo erro pode significar perda total do lote fabricado. Por isso, **o ERC representa uma etapa de validação lógica essencial, que protege o projeto de falhas desde as fases iniciais.**

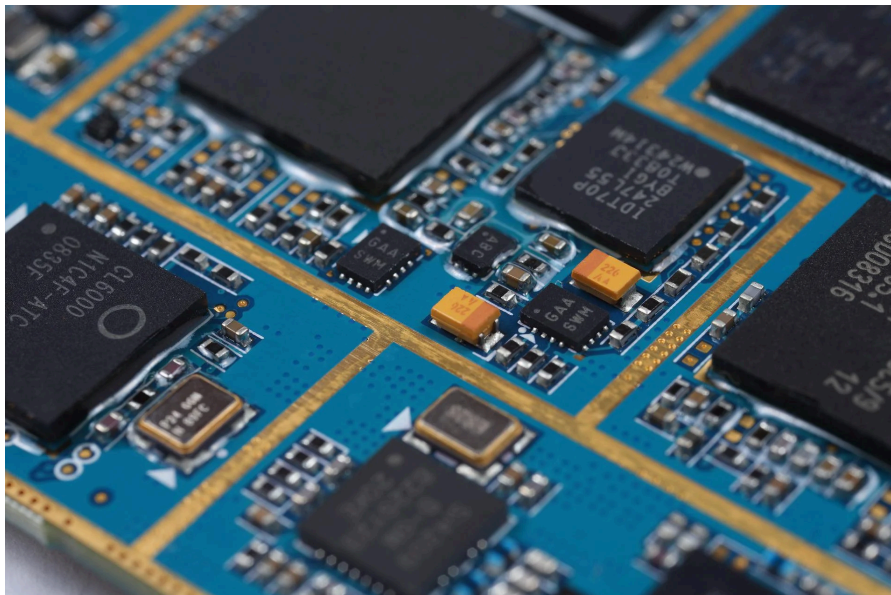
Organização dos componentes em seções lógicas

A disposição de componentes em uma PCB requer planejamento estratégico do espaço disponível, com o objetivo de facilitar o roteamento e, idealmente, minimizar as transições entre camadas. O desafio consiste em conciliar essa otimização com o cumprimento das regras de projeto e dos requisitos de posicionamento dos componentes. Para tornar esse processo mais eficiente, pode-se adotar um método sistemático.

Primeiro, posicione os componentes essenciais. Muitas vezes, certas peças precisam estar em locais específicos por conta de restrições de invólucro ou tamanho. É mais eficiente fixar a posição desses componentes logo no início, antes de prosseguir para o restante da área de montagem. Em seguida, coloque os grandes processadores e circuitos integrados (CIs). Componentes com um grande número de pinos geralmente se conectam a múltiplos outros elementos no circuito. Posicioná-los de forma centralizada facilita o roteamento das trilhas na PCB. Durante o processo, tente evitar o cruzamento de redes.

A organização física dos componentes deve evitar problemas de montagem e garantir um bom desempenho. Os componentes que manipulam sinais de alta velocidade devem ser agrupados na mesma área da placa de circuito impresso e colocados a uma curta distância uns dos outros, a fim de simplificar o roteamento das trilhas. Conectores devem ser posicionados próximos às bordas da placa para facilitar a instalação, enquanto dispositivos sensíveis devem ser mantidos longe das extremidades para evitar interferência eletromagnética (em inglês, *Electromagnetic interference* – EMI).

Além disso, é altamente recomendável aplicar o conceito de separação funcional, isto é, manter áreas distintas para sinais analógicos, digitais e de potência. Essa prática ajuda a minimizar interferências, reduzir ruídos e melhorar o desempenho do circuito, especialmente em projetos sensíveis ou de alta velocidade. Agrupar os componentes de acordo com a natureza dos sinais também contribui para um roteamento mais organizado e eficiente, evitando que trilhas de diferentes domínios elétricos se cruzem desnecessariamente.



Fonte: [Proto-Electronics](#).

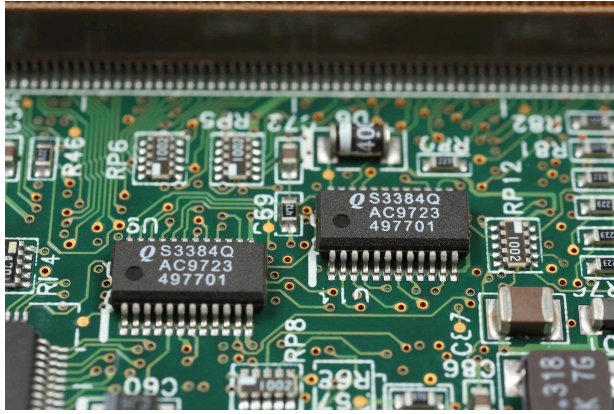
Quando os componentes são colocados na área de montagem, as redes ainda não roteadas ficam visíveis. O ideal é minimizar o número de cruzamentos, pois cada um deles exigirá uma transição de camada através de vias. Com um posicionamento criativo, pode-se eliminar essas interseções e simplificar o roteamento. Quanto aos componentes de montagem em superfície (tecnologia SMD), a regra geral é colocá-los todos no mesmo lado da placa. Isso é importante para a etapa de montagem, pois cada lado da placa exige sua própria passagem pela linha de soldagem, e concentrar os SMDs em uma face ajuda a reduzir custos. Por fim, não hesite em experimentar com a orientação dos componentes para eliminar as interseções. Tente rotacionar as peças para que os *pads* conectados fiquem de frente uns para os outros, simplificando o roteamento das trilhas.

Ao seguir essas orientações, especialmente priorizando a colocação de componentes essenciais, como processadores e circuitos integrados (ICs), a organização do restante da placa ficará muito mais simples, evitando a sobreposição de rotas. Além disso, o *layout* terá um visual mais moderno, com o processador central distribuindo dados (sinais) para todos os outros componentes ao redor.

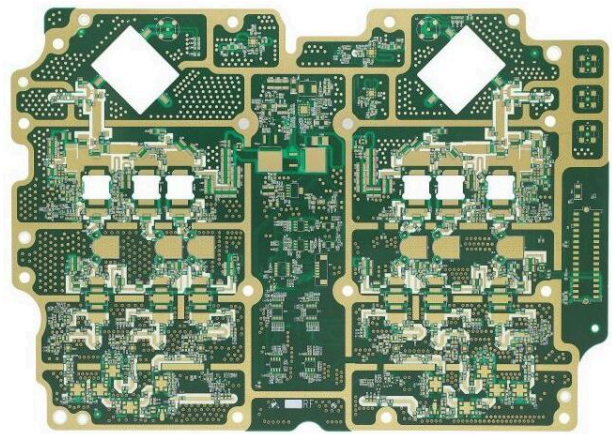
***Layout* de uma PCB**

O *layout* de uma PCB é o processo de organizar fisicamente os componentes na placa, definindo sua aparência, desempenho e confiabilidade. Um bom projeto de *layout* segue princípios claros de *design*, que incluem a organização lógica dos componentes conforme o fluxo de sinal, da entrada ao processamento e, por fim, à saída.

Essa organização de componentes afeta diretamente a eficiência da montagem e a confiabilidade do circuito. Em *layouts* regulares, os componentes são alinhados em linhas e colunas, o que facilita a montagem automatizada e a inspeção, sendo ideal para circuitos de baixa frequência. Componentes semelhantes, como CIs e componentes polarizados, devem ser orientados na mesma direção para minimizar erros. Por outro lado, em *layouts* irregulares, os componentes são posicionados para otimizar as conexões e economizar espaço, sendo preferidos em circuitos de alta frequência.



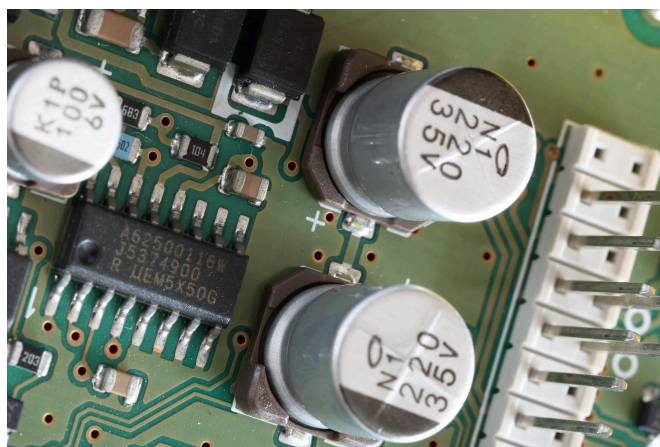
Layout regular (Fonte: [Proto-electronics](http://Proto-electronics.com)).



Layout irregular (Fonte: [Kingsford](http://Kingsford.com)).

Além do alinhamento, o espaçamento é fundamental para o *design* da PCB. Recomenda-se um espaço mínimo de 40 mil entre os componentes, de 100 mil da borda da placa, e entre 350 a 500 mil para circuitos integrados, podendo ser ainda maior para *chips* de grandes dimensões. Um mil equivale a 1/1000 de polegada (0,0254 mm).

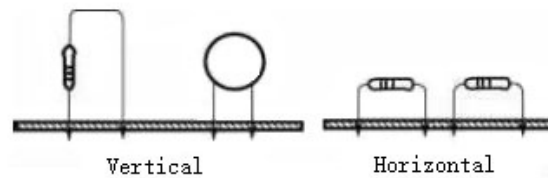
O *layout* deve ser otimizado para lidar com a dissipação de calor e a integridade do sinal. Evite posicionar os componentes próximos a dispositivos de alta potência (MOSFETs, reguladores de tensão) e a processadores. Os capacitores de desacoplamento devem ser colocados o mais próximo possível dos pinos de alimentação dos componentes ativos para evitar oscilações e estabilizar a tensão, como ilustra a seguinte figura. Os componentes que geram muito calor, como CPUs e GPUs, devem ser colocados no centro da placa para uma dissipação de calor uniforme. Componentes de alta velocidade que consomem muita corrente (como CPU, FPGA e GPU) também requerem capacitores de desacoplamento conectados aos seus respectivos pinos de alimentação.



Fonte: [Proto-Electronics](http://Proto-Electronics.com).

No *layout* de PCBs, a instalação de componentes discretos pode ser realizada de duas formas que atendem a necessidades distintas. A instalação horizontal é ideal para garantir a estabilidade mecânica e facilitar o traçado das trilhas, já que o componente fica paralelo à superfície da placa. Já

a instalação vertical, onde o componente é posicionado perpendicularmente, é a escolha perfeita para otimizar o espaço em projetos de alta densidade, embora exija cuidado, pois componentes grandes podem se tornar susceptíveis a danos por vibração.



Fonte: [Utmel](https://www.utmel.com/pt-br/2018/06/28/vertical-vs-horizontal-mounting.html).

Para simplificar a montagem, todos os componentes de montagem em superfície (SMT) devem ser colocados no mesmo lado, enquanto os componentes passantes (THT) devem ser alocados na parte superior da placa. Ao colocar todos os componentes SMT em uma única face da placa, você simplifica e reduz o custo do processo de soldagem por refluxo, que pode ser feito em uma única passagem pela máquina. Os componentes THT são, por sua vez, inseridos na placa a partir do lado superior e fixados pela soldagem por onda, que ocorre na parte inferior.

As ilhas de solda (em inglês, *pads*) são os pontos de conexão na PCB cujo posicionamento deve seguir as seguintes recomendações:

- Cada terminal do componente deve ocupar sua própria ilha de solda.
- As ilhas de solda devem ser ligeiramente maiores que a dimensão axial do corpo do componente para garantir uma junta de solda robusta e facilitar a fabricação.
- Manter uma distância segura das bordas da placa, geralmente superior a 2.5 mm, para evitar danos ou curtos-circuitos durante o processo de produção.
- O posicionamento das ilhas deve, sempre que possível, seguir um sistema de coordenadas padronizado (como a grade de 2.54 mm), o que é fundamental para processos de montagem e perfuração automatizados.

As normas da IPC fornecem também diretrizes formais que devem ser seguidas principalmente em contextos industriais e certificações. Entre as mais relevantes estão:

- IPC-2221: Estabelece os requisitos gerais para o *design* de PCBs, com foco em *clearance* (a distância mais curta entre dois condutores medida pelo ar) e *creepage* (a distância mais curta entre dois condutores medida ao longo da superfície de um material isolante como a própria placa), ou seja, o espaçamento mínimo entre condutores com base na tensão elétrica, tipo de camada e condições ambientais. Esta norma é essencial para garantir a segurança elétrica e evitar curtos-circuitos ou falhas por arco elétrico.
- IPC-7351: Define padrões para *footprints* (*land patterns*) dos componentes, incluindo dimensões, espaçamentos, e a orientação padronizada de componentes. Essa padronização é fundamental para a montagem automatizada, reduzindo erros e facilitando a inspeção.

Além das normas formais, existem boas práticas consolidadas na indústria, que são essenciais para otimizar a montagem e fabricação em larga escala e a confiabilidade de PCBs, resultando em menor custo e maior eficiência. Entre elas, destacam-se:

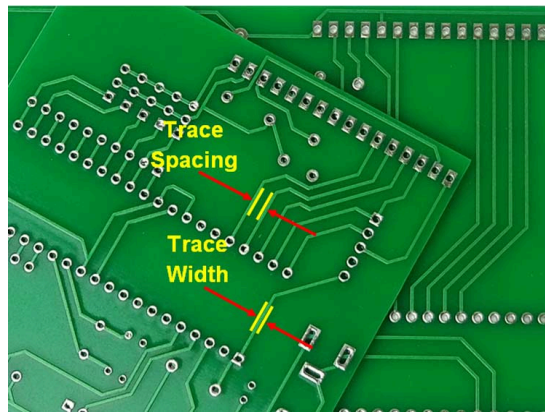
- Espaçamento entre componentes: Recomenda-se manter uma distância mínima de 1,27 mm (50 mil) entre componentes para evitar colisões durante a montagem automática e facilitar a inspeção.
- Margem da borda da placa: É prática comum deixar ao menos 2,54 mm (100 mil) de espaço livre entre os componentes e a borda da PCB, prevenindo danos no processo de fabricação, especialmente no *depaneling* (processo de separar as PCBs individuais que foram fabricadas juntas em um painel maior).
- Distância entre circuitos integrados (CIs): Um espaçamento de 8,9 a 12,7 mm (350 a 500 mil) entre CIs é sugerido para permitir dissipação térmica adequada e facilitar manutenção e testes.
- Agrupamento de componentes de alta velocidade: Para preservar a integridade do sinal, é recomendável posicionar componentes de alta frequência próximos uns dos outros, com trilhas curtas, diretas e bem planejadas.
- Montagem de componentes SMT e THT: Para otimizar o processo de fabricação, recomenda-se que todos os componentes SMT estejam no mesmo lado da placa, permitindo soldagem por refluxo em uma única etapa. Já os componentes THT devem ser inseridos pelo lado superior e soldados por onda na parte inferior.

Essas práticas, baseadas nas experiências dos fabricantes e dos especialistas em montagem, são amplamente adotadas e são fundamentais para garantir *Design for Manufacturability* (DFM).

Roteamento

O roteamento é o processo de conectar os componentes de uma PCB por meio de trilhas condutoras, geralmente feitas de cobre. Essas trilhas formam os caminhos pelos quais a corrente elétrica circula, sendo um dos elementos mais críticos do *layout* da placa, pois afetam diretamente o desempenho, a integridade do sinal e a confiabilidade do circuito.

Durante o roteamento, o projetista deve seguir regras e diretrizes que garantam a fabricabilidade e o bom funcionamento da placa. Isso inclui respeitar a largura mínima das trilhas, o espaçamento entre elas e a distância segura das bordas da placa. Trilhas muito finas podem comprometer a fabricação, enquanto trilhas muito estreitas para correntes elevadas podem superaquecer e causar falhas.



Fonte: [Proto-Electronics](#).

A largura das trilhas deve ser definida com base em três fatores principais:

1. Fabricabilidade: trilhas muito finas são difíceis de fabricar.
2. Corrente elétrica: trilhas que transportam mais de 0,3 A devem ser mais largas.
3. Impedância controlada: necessária para sinais de alta velocidade ou em radiofrequência (geralmente acima de 20 KHz).

Como regra geral, uma largura de trilha de 10 mils é adequada para a maioria dos sinais de baixa corrente. Para correntes maiores, deve-se usar o [nomograma IPC-2152](#) para dimensionar corretamente as trilhas.

A integridade do sinal é outro aspecto fundamental. Trilhas longas ou com curvas acentuadas podem degradar sinais e gerar interferência eletromagnética. Por isso, recomenda-se que as trilhas sejam curtas, diretas e com curvas suaves, evitando ao máximo cruzamentos desnecessários. Sinais de alta velocidade e sinais analógicos sensíveis devem ser roteados longe de fontes ruidosas, como conversores chaveados, para evitar diafonia. Em placas de duas camadas, recomenda-se usar trilhas horizontais em um lado e verticais no outro, organizando o roteamento de forma cruzada. Já em placas multicamadas, a alternância de trilhas entre camadas deve ser feita com atenção ao uso de planos de referência, evitando interferência e mantendo a integridade dos sinais.

O roteamento também influencia na distribuição de energia. Como já comentado anteriormente, trilhas de alimentação devem ser suficientemente largas para evitar queda de tensão, e planos de aterramento contínuos devem ser utilizados para garantir um caminho de retorno de baixa impedância, reduzindo ruídos e melhorando a estabilidade do sistema. O gerenciamento térmico também é relevante: trilhas que carregam altas correntes geram calor, o que pode ser mitigado com o uso de trilhas mais largas, vias térmicas ou roteamento em regiões com melhor dissipação.

Por fim, é essencial considerar o espaço disponível para o roteamento, especialmente em projetos com alta densidade de pinos ou em dispositivos compactos, como os vestíveis. O posicionamento adequado dos componentes deve prever caminhos livres para as trilhas e facilitar a montagem automatizada, respeitando os requisitos dos processos de soldagem.

Verificação de regras de projeto (DRC)

A Verificação de Regras de Projeto, ou DRC (do inglês *Design Rule Check*), é uma etapa crítica no processo de desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCB). Ela é realizada antes do

envio do projeto para fabricação e tem como objetivo garantir que o *layout* da placa esteja em conformidade com as tolerâncias físicas, geométricas e de fabricação exigidas pelo fabricante.

O DRC é um conjunto de regras predefinidas, que estabelece os limites mínimos e máximos para elementos do *layout*, como trilhas, vias e *pads*. Durante a análise DRC, uma série de critérios relacionados à fabricabilidade da placa são verificados, permitindo que o projetista corrija os problemas antes da produção física, evitando retrabalho, atrasos e desperdício de material. Dentre os critérios analisados, destacam-se:

- Largura mínima das trilhas: garante que as trilhas possam conduzir corrente com segurança e sejam fabricáveis.
- Espaçamento mínimo entre trilhas: evita curtos-circuitos e arcos elétricos.
- Tamanho e espaçamento das vias: assegura que as furações possam ser feitas com precisão e não se sobreponham.
- Relação entre o furo (em inglês, *drill*) e o tamanho da almofada (em inglês, *pad*): determina a integridade mecânica e elétrica da conexão.
- Espaçamento entre componentes e da borda da placa: evita danos durante o corte ou montagem.
- Contorno de pinos e *pads*: garante que não haja sobreposição ou conexões incorretas.

Além das verificações básicas, o DRC também pode analisar regras específicas de aplicação, como controle de impedância, empilhamento de camadas e restrições térmicas, que são especialmente importantes em projetos complexos ou de alta frequência. Essas verificações permitem antecipar problemas que poderiam comprometer o desempenho ou a confiabilidade da placa.

Como complemento ao DRC, o ERC realiza a validação lógica do esquemático, verificando conexões elétricas incorretas, pinos não conectados e conflitos de sinal. Já o DRC atua no nível físico, analisando o *layout* quanto a espaçamentos, larguras de trilhas, dimensionamento de vias e outras restrições geométricas. Juntos, ERC e DRC formam uma dupla essencial na identificação de erros lógicos e físicos ao longo do desenvolvimento do projeto de uma PCB.

A correção dos erros identificados segue uma abordagem iterativa: o projetista analisa o ERC e o DRC, revisa os erros, faz os ajustes necessários no esquemático ou *layout* e repete as verificações. Esse ciclo se repete até que nenhum erro seja reportado, garantindo que a PCB esteja pronta para ser fabricada com alto rendimento, evitando falhas e retrabalho na etapa de produção.

Planos de terra e alimentação em PCBs de 2 camadas

O planejamento adequado dos planos de terra (GND) e alimentação (VCC) é um dos pilares para garantir a integridade elétrica e a estabilidade do sinal em projetos de PCBs. Em placas multicamadas, é comum dedicar camadas internas exclusivamente a esses planos, o que melhora a distribuição de corrente, reduz interferências e facilita o retorno de sinal. No entanto, em PCBs de duas camadas, esse processo exige soluções criativas e bem fundamentadas em boas práticas de projeto. Em placas de duas faces, é altamente recomendável reservar uma das camadas como plano de terra contínuo sempre que possível. Esse plano funciona como referência de potencial comum e fornece um caminho de retorno de corrente de baixa impedância para sinais de alta frequência, o que reduz ruídos, interferência eletromagnética e melhora a integridade do sinal. Mesmo que nem toda a camada possa ser dedicada ao GND, deve-se evitar cortes e interrupções extensas nesse plano, mantendo-o o mais sólido e conectado possível.

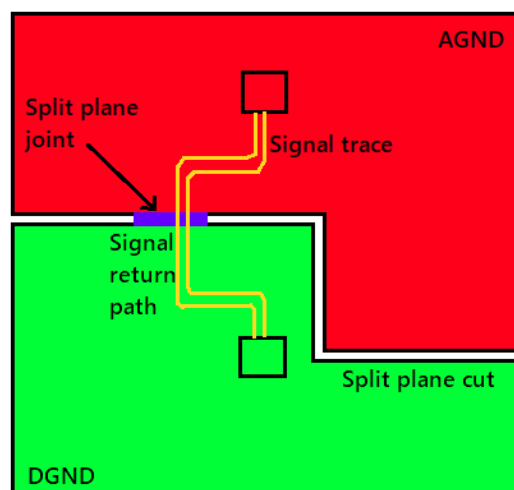
Já que não há uma camada dedicada exclusivamente à alimentação (como em placas de 4 ou mais camadas), a trilha de VCC precisa ser roteada na outra camada. Nesse caso, recomenda-se:

- usar trilhas largas para alimentação, especialmente se a corrente for elevada (por exemplo, 100 mils para correntes entre 5 e 10 A);
- evitar o roteamento em série entre componentes, que pode gerar queda de tensão e distribuição desigual de corrente; e
- utilizar redes de alimentação separadas para diferentes tensões de alimentação, caso não seja possível ter um plano dedicado.

Para minimizar ruídos e transientes na linha de alimentação, é fundamental o uso de capacitores de desacoplamento próximos a cada circuito integrado, conectando VCC e GND localmente, como comentamos no *layout* de uma PCB. Essa prática reduz picos de corrente e ajuda a estabilizar a tensão de operação nos pinos de alimentação. Além disso, para manter o bom desempenho de sinais, todas as trilhas devem estar bem acopladas ao plano de terra mais próximo. Ou seja, o retorno de corrente deve ter um caminho direto e curto no plano de GND, evitando laços de retorno grandes que podem agir como antenas e gerar ruídos.

Em projetos mistos (analógicos e digitais), a separação dos planos de terra é usada para combater a interferência e o ruído eletromagnético (EMI). A lógica é isolar as correntes de retorno dos circuitos digitais de alta velocidade, que podem contaminar a referência de terra dos sensíveis circuitos analógicos. A solução é criar planos de terra dedicados (DGND para o digital e AGND para o analógico). Contudo, essa técnica deve ser usada com cautela, pois a separação física cria uma "lacuna" no caminho de retorno, podendo introduzir novos problemas de EMI. Por isso, a regra mais importante é garantir que os dois planos, apesar de separados, mantenham o mesmo potencial de referência.

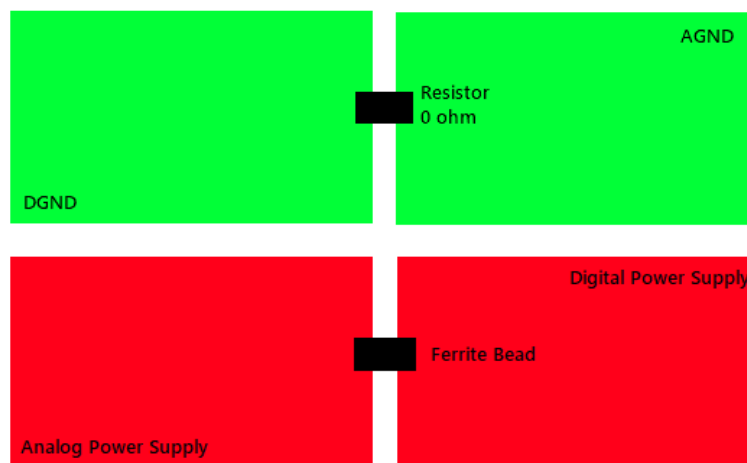
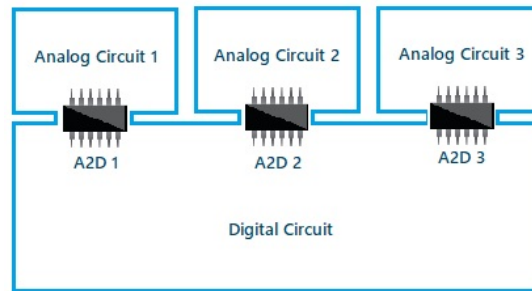
Para conectar planos de terra separados, a técnica mais eficaz é o aterramento estrela (em inglês, *star grounding*). Ela se baseia no princípio de unir os planos em um único ponto físico, garantindo que eles compartilhem a mesma referência. Ao evitar múltiplas conexões, essa abordagem previne a formação de laços de terra e direciona todo o fluxo de corrente de retorno para uma única passagem entre os domínios analógico e digital.



Fonte: [PCB-HERO](http://www.pcb-hero.com).

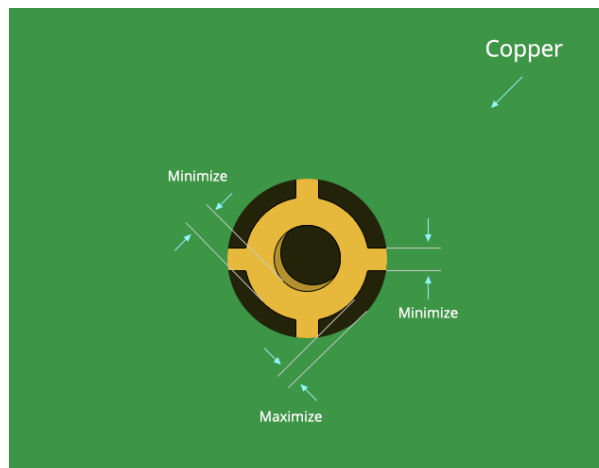
Essa união pode ser feita de várias maneiras, como com uma trilha estreita de cobre (uma “gravata de rede”) ou uma única via, geralmente localizada bem embaixo do CI de sinal misto (se houver um), que serve como referência comum para os dois domínios. Em algumas aplicações, um

capacitor ou indutor pode ser usado para fazer a ponte entre os planos. O capacitor permite que o ruído de alta frequência (que é a principal preocupação) seja desviado, enquanto o indutor pode ser usado em casos onde se quer um isolamento galvânico parcial entre os planos.



Fonte: [PCB-HERO](#).

O plano de terra em uma PCB desempenha ainda um papel fundamental na dissipação de calor, atuando como um grande dissipador que distribui o calor de maneira uniforme por toda a placa. Ao conectar uma via diretamente a esse plano, sem o uso de *pads* de alívio térmico, o calor gerado por um componente é eficientemente conduzido para longe de sua superfície. Embora essa prática seja ideal para o gerenciamento térmico do circuito, ela pode criar um desafio durante a soldagem por onda de componentes passantes (THT), pois a rápida dissipação de calor pode impedir a formação de uma junta de solda adequada. Nesses casos, o uso de *pads* de alívio térmico é recomendado para garantir que o calor permaneça na junta de solda, assegurando um processo de fabricação bem-sucedido. A seguinte figura ilustra um padrão típico de *pad* de alívio térmico. Esse padrão é caracterizado por um *pad* central conectado ao plano de cobre por “raios” ou “braços” finos. Normalmente, são usados quatro braços, dispostos de forma cruzada, mas o número pode variar. Esses braços finos agem como um estrangulamento. A função desse padrão é limitar o fluxo de calor do pad para o plano de cobre. Ele cria uma conexão elétrica, mas com uma área de contato reduzida para a transferência de calor.



Fonte: [Altium](#).

Fabricação de uma PCB

Historicamente, a fabricação de placas de circuito impresso era um processo meticuloso e amplamente manual, onde os circuitos eram desenhados à mão, muitas vezes usando fitas e decalques em uma escala ampliada. Com o advento da eletrônica moderna, a complexidade dos *designs* tornou esse método obsoleto. A evolução para o *design* digital e o surgimento de *softwares* EDA (do inglês, *Electronic Design Automation*) transformaram o processo. Hoje, o *design* eletrônico digital se traduz diretamente em arquivos de fabricação que contêm todas as coordenadas e padrões. É com base nesses arquivos que a fabricação de uma PCB se torna a etapa em que o *design* digital se transforma em um objeto físico, não mais realizado por uma única máquina, mas por uma sequência de etapas altamente especializadas e completamente automatizadas, controladas por esses mesmos arquivos.

O processo começa com o *fotoplotter*, a máquina que traduz os arquivos digitais (como os arquivos Gerber) em um mapa físico. Usando um *laser* de alta precisão, ela projeta o padrão das trilhas de cobre em um filme fotográfico ou diretamente em uma chapa revestida com material fotossensível. Esse “negativo” é a base para a próxima etapa, a corrosão, onde as áreas de cobre não protegidas são removidas, deixando apenas o circuito desejado.

Após a definição do circuito, a placa passa para uma máquina de furação CNC (do inglês *Computer Numerical Control*). Guiada por um arquivo de furação do *software* de *design*, esta máquina perfura com precisão milimétrica todos os furos necessários. Isso inclui os furos para os terminais de componentes (tecnologia *through-hole*) e os vias, que são os canais de comunicação vertical entre as diferentes camadas da placa, permitindo que os sinais viajem entre elas.

Em placas de duas ou mais camadas, a perfuração sozinha não basta para criar a conexão. A placa é então submetida a um processo químico de galvanoplastia, onde os furos são revestidos internamente com uma fina camada de cobre. Esse processo transforma um simples orifício em um condutor elétrico, estabelecendo o caminho para a corrente entre as camadas e garantindo a funcionalidade do circuito multicamada.

As etapas finais focam na proteção e na orientação. Uma máquina de serigrafia aplica a [máscara de solda](#), uma camada protetora (geralmente de tinta verde) que cobre as trilhas de cobre, expondo

apenas as ilhas de solda dos componentes. Isso previne curtos-circuitos durante a soldagem e protege o cobre. Em seguida, a máquina aplica a serigrafia (textos, símbolos de componentes e identificadores), que auxilia os técnicos na montagem, inspeção e manutenção do circuito, finalizando o processo com a marcação de todas as informações importantes para o produto.

Produção da primeira peça

A produção da primeira peça é uma etapa que valida a transição de um projeto da fase de *design* para a fabricação em escala. Ela é inspecionada minuciosamente para garantir que a linha de produção esteja configurada corretamente e que o produto atenda a todas as especificações de qualidade antes que a produção em massa seja iniciada. Serve, portanto, como prova de que todo o processo de manufatura está correto e pode ser replicado.

A produção da primeira peça ocorre em paralelo com a finalização de uma Lista de Materiais (em inglês, *Bill Of Materials* – BOM) precisa e completa. Essa BOM é a receita definitiva do produto, listando cada componente, quantidade e especificação necessários para construir uma única unidade. A validação desta lista é essencial, pois qualquer erro nela seria multiplicado por milhares ou milhões de vezes na produção em massa, gerando prejuízos significativos.

Concomitantemente à produção, toda a documentação de apoio é elaborada e finalizada. Isso inclui:

- **desenho mecânico:** Fornece as dimensões exatas e a forma física do produto.
- **instruções de montagem:** Guia passo a passo para a linha de produção, garantindo que cada unidade seja montada de forma idêntica.
- **procedimentos de teste:** Define os critérios de qualidade e os passos para verificar a funcionalidade de cada produto.

A relevância dessas etapas para a produção em massa e a manutenção é imensurável. A documentação garante a repetibilidade e a consistência de cada unidade produzida, reduzindo erros, otimizando a eficiência e facilitando o treinamento de novos operadores. Além disso, essa documentação é a base para a manutenção futura, permitindo que técnicos realizem reparos, substituam componentes e diagnostiquem problemas de forma precisa e eficiente durante toda a vida útil do produto.

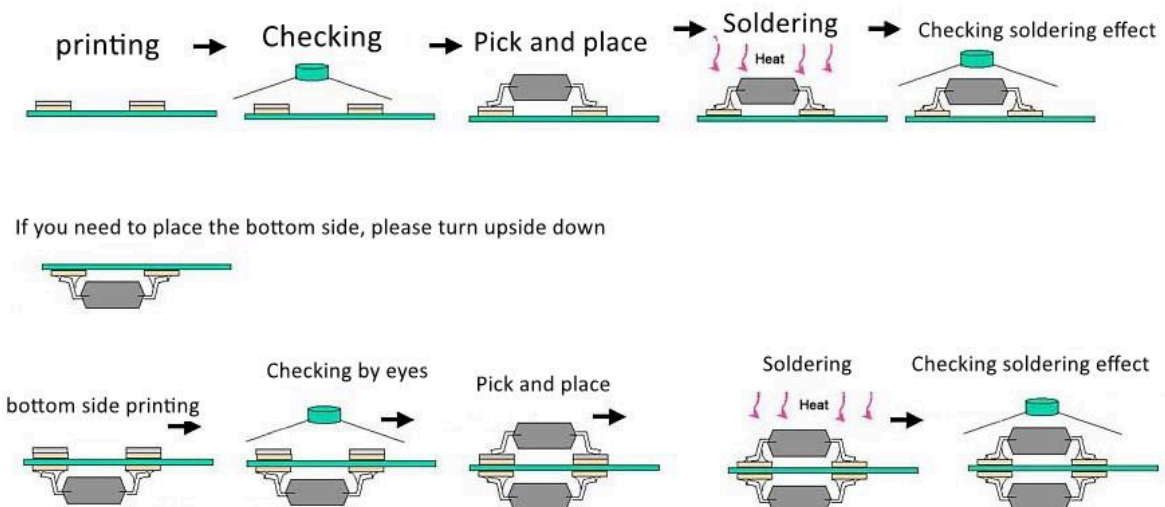
Técnicas de soldagem

Depois de fabricada, a PCB serve como a base física onde os componentes eletrônicos são montados. A soldagem é a técnica essencial que fixa esses componentes às trilhas de cobre da placa, criando uma ligação elétrica e mecânica permanente. Sem a soldagem, os componentes não teriam uma conexão elétrica confiável, pois estariam apenas encostados na superfície da PCB.

A soldagem consiste em usar uma liga metálica, chamada de solda (geralmente uma mistura de estanho com outros metais como chumbo ou prata), que é aquecida a uma temperatura alta o suficiente para derreter. A solda derretida flui sobre as superfícies metálicas (terminais do componente e os *pads* ou furos na PCB) e, ao esfriar e solidificar, forma uma ponte condutora que garante a conexão. A soldagem não é o mesmo que a brasagem ou a solda branda, que são usadas em outras aplicações. Na eletrônica, a solda utilizada tem um ponto de fusão relativamente baixo, ideal para não danificar os componentes eletrônicos sensíveis.

Existem duas abordagens principais para a soldagem de componentes em PCBs. A tecnologia de montagem em superfície (SMT) é a tecnologia mais comum na indústria moderna. Os componentes SMD (em inglês, *Surface Mount Devices*) são menores, sem terminais longos, e são soldados diretamente nas superfícies dos *pads* de cobre na PCB. O processo em três passos é geralmente automatizado:

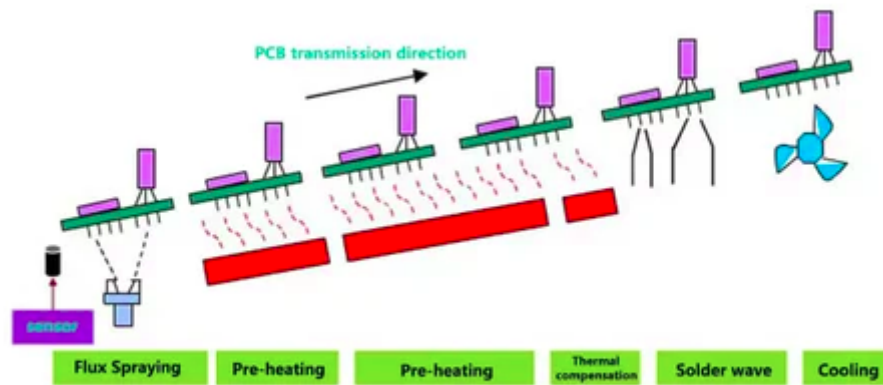
- Impressão de pasta de solda: Uma pasta de solda é aplicada nos *pads* da PCB por meio de um estêncil.
- Colocação dos componentes: Máquinas de alta precisão (*pick-and-place*) pegam os componentes e os posicionam sobre a pasta de solda.
- Soldagem por forno de refusão: A placa é passada por um forno que aquece a pasta de solda até que ela derreta e se solidifique, formando a conexão.



Fonte: [Neoden](#).

A tecnologia de furo passante (THT), por sua vez, requerem que os componentes THT tenham terminais longos para serem inseridos em furos na PCB e, depois, soldados no lado oposto da placa. Este método é mais robusto mecanicamente e ainda é usado para componentes maiores, como conectores, capacitores e resistores de alta potência. O processo pode ser manual ou automatizado. O processo de soldagem automática, ou solda por onda, é um método industrial que segue uma sequência de etapas bem definida:

- Preparação e Montagem: Nesta primeira etapa, os componentes são inseridos, seja manualmente ou por máquinas, nos furos da PCB.
- Fluxagem: Em seguida, a parte inferior da placa é revestida com um fluxo químico. Este produto limpa as superfícies metálicas e garante que a solda se ligue de maneira uniforme.
- Pré-aquecimento: A PCB passa por uma área de pré-aquecimento. Isso tem duas funções: ativa o fluxo e evita o choque térmico quando a placa entrar em contato com a alta temperatura da solda derretida.
- Soldagem por onda: Esta é a etapa principal. A placa desliza sobre uma onda de solda líquida, que cobre e fixa todos os terminais dos componentes de uma só vez, criando as conexões elétricas e mecânicas.
- Resfriamento e Limpeza: Por fim, a placa é resfriada para que a solda solidifique. Dependendo do tipo de fluxo usado, ela pode passar por uma limpeza para remover resíduos, finalizando o processo.



The Schematic diagram of wave soldering process

Fonte: [PCB Hero](http://PCBHero.com).

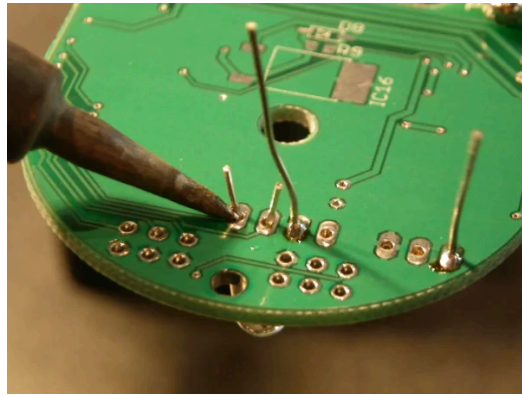
Apesar da automação dominar a produção em massa, A soldagem manual mantém sua importância na eletrônica. Ela é essencial para prototipagem e desenvolvimento, oferecendo flexibilidade e rapidez na montagem de pequenos circuitos, dispensando a necessidade de uma linha de produção. Além disso, é a técnica padrão para reparo e retrabalho, permitindo que técnicos substituam componentes defeituosos de forma precisa. A soldagem manual também é utilizada em componentes que são muito sensíveis ao calor ou que não se encaixam bem nos processos automáticos. Para hobbistas e estudantes, é a forma mais acessível e prática de construir projetos eletrônicos e adquirir conhecimento.



Fig. : Ferro de solda (Fonte: [Gordak](http://Gordak.com)).

O método manual mais comum para montar componentes em uma PCB é o uso de um ferro de solda. O procedimento básico envolve os seguintes passos:

1. Preparação: Certifique-se de que o ferro de solda esteja limpo e aquecido. As superfícies dos componentes e da PCB devem estar limpas de sujeira e oxidação.
2. Aquecimento: Encoste a ponta do ferro de solda no *pad* da PCB e no terminal do componente simultaneamente para aquecer as duas partes. Isso é fundamental para garantir uma boa conexão.



Fonte: [Instructables](https://www.instructables.com/).

3. Aplicação da solda: Toque a ponta da solda na junção aquecida (não na ponta do ferro). A solda derreterá e fluirá por capilaridade, cobrindo o terminal e o *pad*. A solda deve brilhar e ter a forma de um cone perfeito.
4. Remoção: Retire a solda e, depois, o ferro de solda. Mantenha o componente imóvel por alguns segundos enquanto a solda solidifica.

Para soldar corretamente, é essencial que a solda flua de forma suave e crie uma junção brilhante. Uma solda “fria” (opaca e com aparência de grãos) indica que a conexão não foi aquecida o suficiente, resultando em uma ligação elétrica deficiente.



Fonte: [Autocorerobotica](https://www.autocorerobotica.com/).

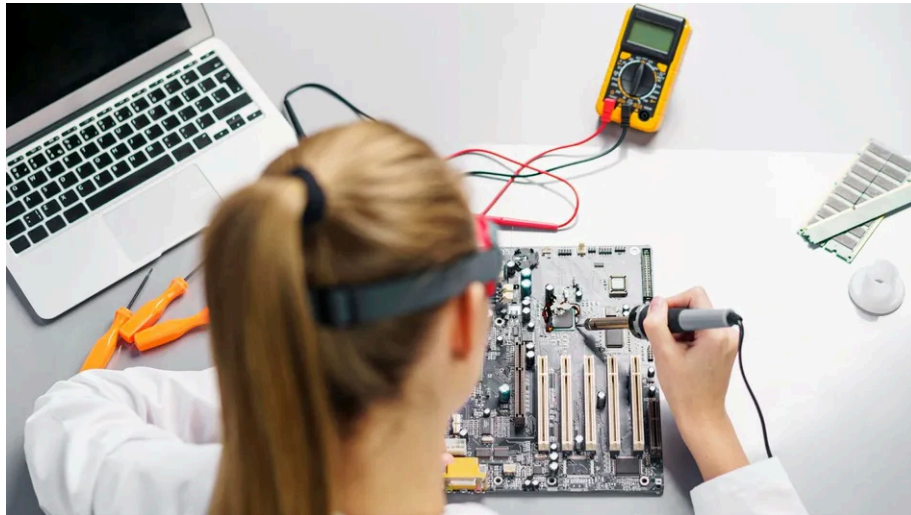


Fonte: [Autocorerobotica](https://www.autocorerobotica.com/).

A montagem de componentes THT em uma placa de circuito impresso (PCB) deve seguir uma sequência lógica e organizada. A sequência recomendada é:

1. Organização e Planejamento
 - Verifique o *layout* da PCB e a lista de materiais (em inglês, *Bill of Materials* – BOM).
 - Separe e identifique todos os componentes a serem montados.
 - Certifique-se de estar utilizando a placa correta e que ela não possui danos visíveis.
2. Inserção dos Componentes
 - Os componentes devem ser inseridos pelo lado superior da PCB, com os terminais passando pelos furos metalizados.
 - Sequência recomendada de inserção:
 1. Componentes menores e de perfil baixo: resistores, diodos, *jumpers*.
 2. Componentes de sinal: capacitores pequenos, transistores, LEDs.
 3. Componentes com polaridade ou orientação específica: diodos, capacitores eletrolíticos, circuitos integrados.
 4. Componentes maiores: conectores, indutores, capacitores maiores.
 5. Componentes mecânicos: relés, dissipadores, suportes.
 - Vire a placa com os componentes encostados em uma superfície plana, como em uma espuma.
 - Dobre levemente os terminais para manter os componentes firmes antes da soldagem, se necessário.
3. Soldagem (conforme descrito anteriormente)
 - Realize a soldagem dos terminais com cuidado, garantindo boa fixação e conexões eletricamente confiáveis.
 - Siga os passos de preparação, aquecimento, aplicação da solda e remoção descritos anteriormente.
 - Evite excesso de solda, curtos-circuitos ou soldas frias.
4. Inspeção Visual
 - Verifique todas as soldas para garantir que estão brilhantes e com bom formato.
 - Confirme se não há pontes de solda entre trilhas adjacentes.
 - Verifique a orientação dos componentes polarizados.
 - Confirme se todos os componentes foram montados corretamente, de acordo com o *layout*.
5. Corte dos Terminais Excedentes
 - Após a soldagem, utilize um alicate de corte para remover o excesso de terminal que ultrapassa a solda.
 - Faça cortes limpos e rente à solda, evitando danos às trilhas.
6. Limpeza da PCB
 - Se for utilizada solda com fluxo (fluxo ativado), é recomendável limpar a placa para remover resíduos que podem causar oxidação ou mau contato ao longo do tempo.
 - Use álcool isopropílico e uma escova antiestática para a limpeza.
7. Teste Funcional
 - Antes da montagem final ou do envio, realize testes elétricos e funcionais para validar a montagem da placa.

Seguindo essa sequência, a montagem THT se torna mais eficiente, organizada e com menor chance de erros. Além disso, uma boa prática é manter um ambiente de trabalho limpo e bem iluminado, e utilizar equipamentos de proteção quando necessário.



Fonte: [Wevolver](#).

FERRAMENTAS DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS

No [Roteiro 2](#), exploramos a primeira metade de um projeto de PCB (do inglês, *Printed Circuit Board*): a concepção de esquemáticos. Nessa primeira fase, a lógica elétrica do circuito é definida, com cada componente virtualmente ligado aos seus respectivos *footprints*, que são as “pegadas” físicas que os componentes deixarão na placa. Agora, após solidificarmos o entendimento sobre essa etapa, o foco se volta para a segunda parte do fluxo de desenvolvimento de uma PCB, que é a automação da produção em massa. Esta próxima fase se aprofunda no universo das suítes EDA, mostrando como as ferramentas de *software* traduzem o esquemático em um *layout* físico e, posteriormente, geram os arquivos de fabricação (como os arquivos Gerber e de furação). Essa transição do virtual para o real é onde a automação se torna indispensável, garantindo que o *design* final seja não apenas funcional, mas também replicável, preciso e pronto para a fabricação.

Geração automática de arquivos de fabricação de PCBs

Durante o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI), os *softwares* de EDA são ferramentas fundamentais para garantir que o projeto esteja livre de erros e pronto para ser fabricado e montado automaticamente. Esses ambientes, como [Altium Designer](#), [KiCad](#), [Eagle](#) e outros, automatizam praticamente todo o processo, desde o esquemático até os arquivos finais de produção.

O fluxo de desenvolvimento do *layout* no KiCad é suportado por ferramentas automatizadas que integram as verificações elétricas (ERC) e físicas (DRC) em um processo iterativo. Garantir que o projeto seja validado nessas etapas é essencial para a confiabilidade da placa e para sua fabricação sem retrabalho. A seguir, serão detalhadas as etapas de desenvolvimento no KiCad.

Etapas 1: Projeto e verificação do esquemático (ERC)

O fluxo começa com o desenho do esquemático, onde o projetista interliga os componentes eletrônicos de acordo com o circuito desejado. Uma vez concluído o diagrama, executa-se o ERC, que é uma verificação automática de regras elétricas básicas.

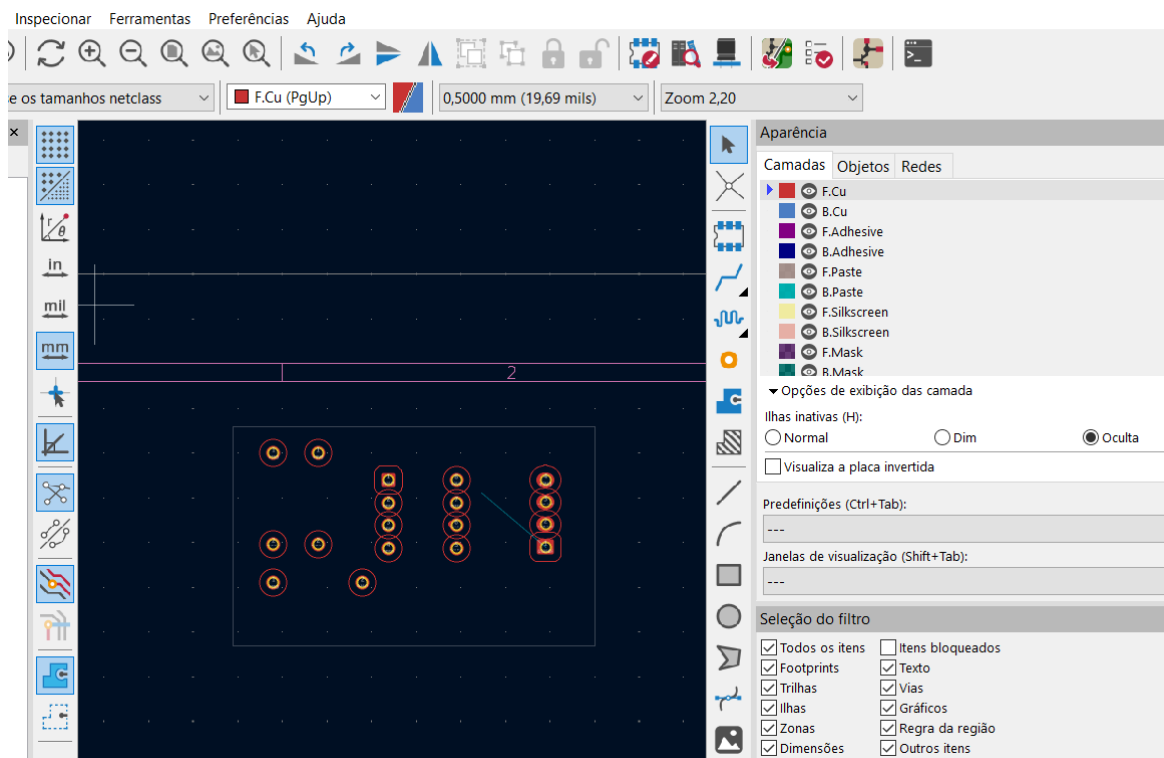
No KiCad, esse processo funciona da seguinte maneira:

1. Abrir o editor de esquemáticos (Schematic Editor):
No projeto do KiCad, clique duas vezes no arquivo `.kicad_sch` ou abra diretamente o Esquemático clicando em Schematic Editor na tela inicial do projeto.
2. Desenhar o esquemático:
Insira os componentes usando o atalho A (*Add Component*) e conecte os pinos com fios (W) ou *labels* de conexão (L). Lembre-se de adicionar corretamente fontes de alimentação e conexões à malha de GND.
3. Executar o ERC:
Clique no botão “Verificador das regras elétricas (ERC)” na barra superior do editor ou vá pelo menu:
Inspecionar > Verificador de regras elétricas (ERC) > Execute o ERC.
4. Analisar os resultados:
 - Será exibida uma janela com erros e advertências, como:
 - "Pin not driven" (pino não conectado a uma fonte ativa),
 - "Input pin not driven by any output",
 - Redes flutuantes (floating nets),
 - Conflitos de saída (output pin conflicts).
 - Cada item possui descrição detalhada e pode ser clicado para que o *software* leve você diretamente ao ponto do erro no esquemático.
5. Corrigir os erros:
 - Faça os ajustes necessários no esquema: adicione *labels*, corrija conexões incorretas, ajuste tipos de pinos se necessário.
 - É comum precisar adicionar junto a cada símbolo de GND ou de alimentação o símbolo `PWR_FLAG` para sinalizar ao *software* que determinadas redes estão intencionalmente conectadas a uma fonte.
6. Executar o ERC novamente:
 - Após cada correção, reexecute o ERC.
 - Repita esse processo até que não restem mais erros (apenas advertências aceitáveis, se houver).

Etapas 2: Layout e verificação física do projeto (DRC)

Após o esquemático ser validado pelo ERC no Schematic Editor, o próximo passo no KiCad (versão 10.0) é iniciar o *layout* da PCB usando o ambiente PCB Editor. Este processo envolve diversas etapas, todas integradas ao fluxo de trabalho da ferramenta. A etapa para iniciar o *layout* de uma PCB com até duas camadas no KiCad:

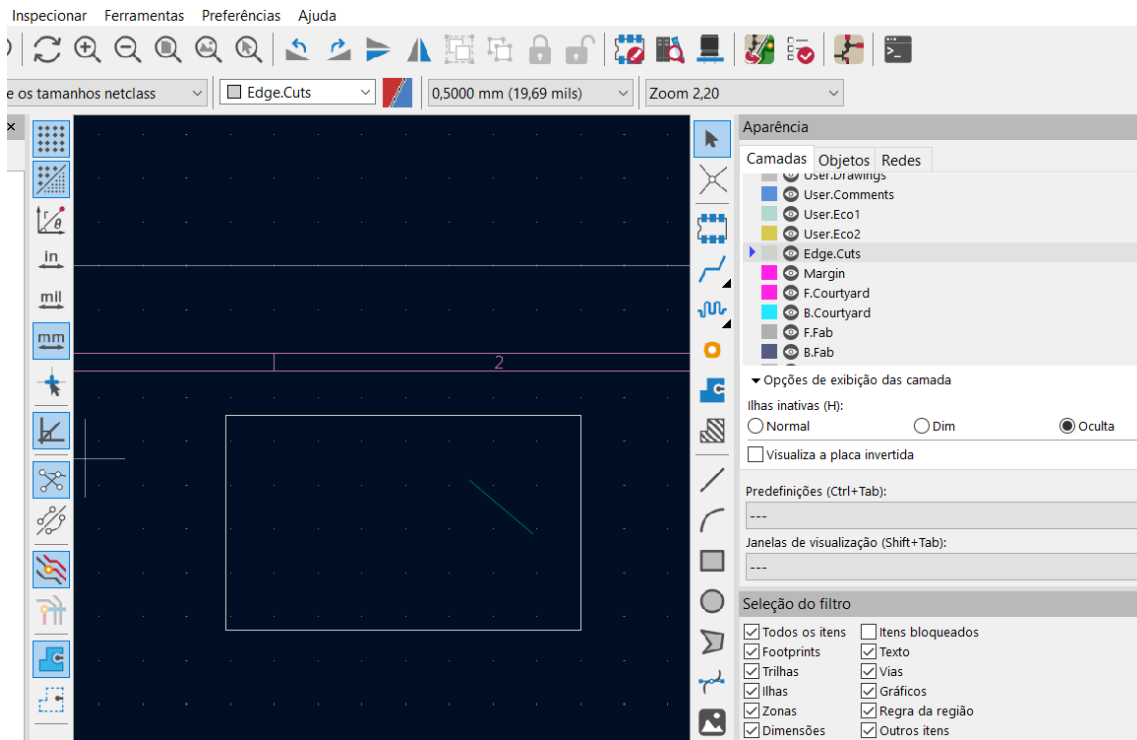
1. Gerar *netlist* interna e abrir o editor de PCI:
 - No editor de esquemático, clique em “Alterna para o editor de PCI” (ícone de placa com seta verde) ou vá em:
Ferramentas > Alterna para o editor de PCI.
 - O KiCad abrirá o editor de PCI (`pcbnew`) na camada F.Cu (vista frontal).
 - No editor da PCI, carregue todos os componentes do esquemático e posicione (move o *mouse* com o botão direito pressionado) os componentes da PCI carregada na tela do editor junto com as linhas-guia de conexão (azuis finas) de conexões entre os componentes:
Ferramentas > Atualize a PCI a partir do esquema... > Atualiza a PCI.



2. Associar *footprints* (caso não tenham sido definidos antes):
 - O KiCad permite associar *footprints* diretamente no esquemático. Caso eles ainda não tenham sido definidos, é possível fazer essa associação pela ferramenta “Atualizar Footprint...”, disponível na janela flutuante exibida ao selecionar um componente com o botão esquerdo do *mouse* e, em seguida, clicar com o botão direito.
3. Posicionar (selecionar um componente com um clique no botão esquerdo do *mouse*) os componentes na placa:
 - Use os atalhos M (Move) e R (girar) para posicionar os componentes dentro dos limites do contorno da placa de forma a reduzir ao máximo o cruzamento das linhas-guia de conexão. Se for preciso alterar as conexões dos pinos, deve-se retornar ao esquemático e fazer as conexões necessárias e atualizar a PCI a partir do esquemático salvo.
 - O contorno é geralmente definido como um retângulo (“Desenhar retângulos”) na camada *Edge.Cuts*. Essa camada representa o formato final da placa e é utilizada pelo fabricante para o processo de usinagem (corte ou fresagem).

Ao definir o contorno da placa, é importante respeitar as restrições mecânicas relacionadas ao afastamento entre a borda e os elementos de cobre. No KiCad, esse limite é controlado pela regra de projeto *Copper to edge clearance* (em português, Isolamento entre a borda e o cobre), que estabelece a distância mínima entre qualquer objeto de cobre (trilhas, *pads*, vias e zonas de cobre) e o contorno desenhado na camada *Edge.Cuts*. Na prática, os valores mais comuns são:

- 0,20 mm: mínimo amplamente aceito pela maioria dos fabricantes de PCB.
- 0,25 a 0,30 mm: valor mais conservador e recomendado para projetos gerais.
- 0,50 mm ou mais: quando a placa sofrerá fresagem agressiva, *V-score* ou houver preocupação com robustez mecânica.



- Para visualizar os componentes posicionados espacialmente, clique em Visualizar > Visualizador 3D.

4. Definir regras de projeto (Design Rules):

- As regras para a fabricação de PCI estabelecidas pelo SATE são:
 - Tamanho máximo da placa 250mm x 180mm – Face dupla ou única
 - Fazer uma *layer* com a linha de recorte da placa (limites da placa para o recorte na máquina);

(Selecione a camada `Edge.Cuts` e desenhe como contorno da placa um retângulo menor que 250mm x 180mm, envolvendo todos os componentes).

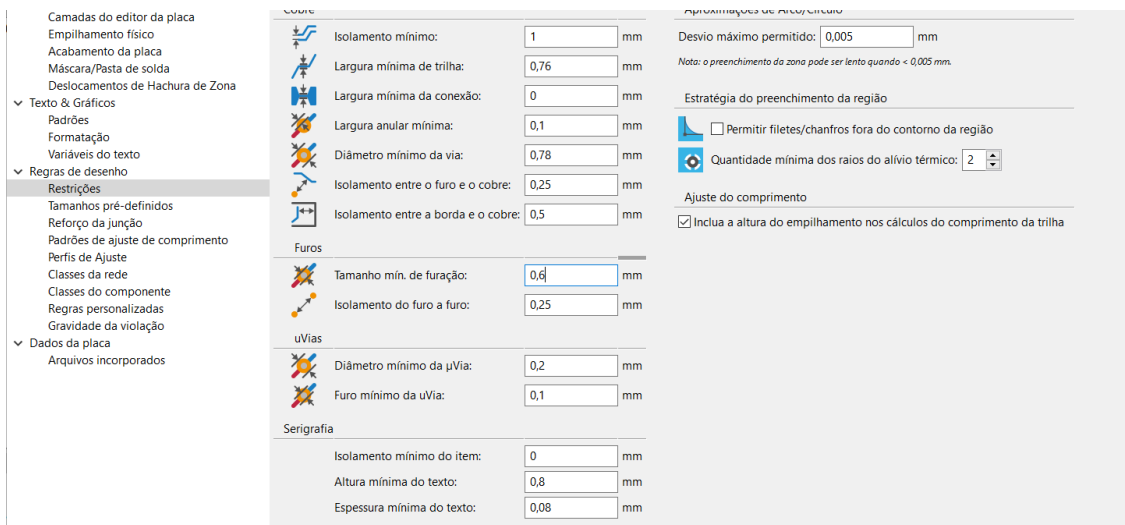
- Furações disponíveis: 0,5 - 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0 - 1,2 - 1,5 - 1,6 - 1,8 - 2,0
- Espaçamento mínimo recomendado entre trilhas (*clearance*) de 40mil ou 1mm
- Tamanho mínimo para trilha: 0,61 mm (24 mil), mas esse valor deve ser utilizado apenas em situações excepcionais, quando não houver outra alternativa de roteamento. Para todos os demais casos, o recomendado é adotar trilhas com largura a partir de 1,0 mm (40 mil), pois isso facilita a produção, melhora a robustez do circuito e reduz significativamente o risco de falhas na soldagem.
- *Pad* deve ser no mínimo 30% maior que o furo.

(Abra Arquivo > Configuração da placa ... > Regras de Desenho > Restrições; Furo passante mínimo = 0.6mm; Isolamento mínimo = 1mm; Largura da trilha = 0,76mm; Diâmetro mínimo da via = $1,3 \times 0,6 \text{ mm} = 0,78 \text{ mm}$)

- Sempre que possível, recomenda-se a utilização de plano de terra nas faces da placa, formando um plano contínuo de referência elétrica, com

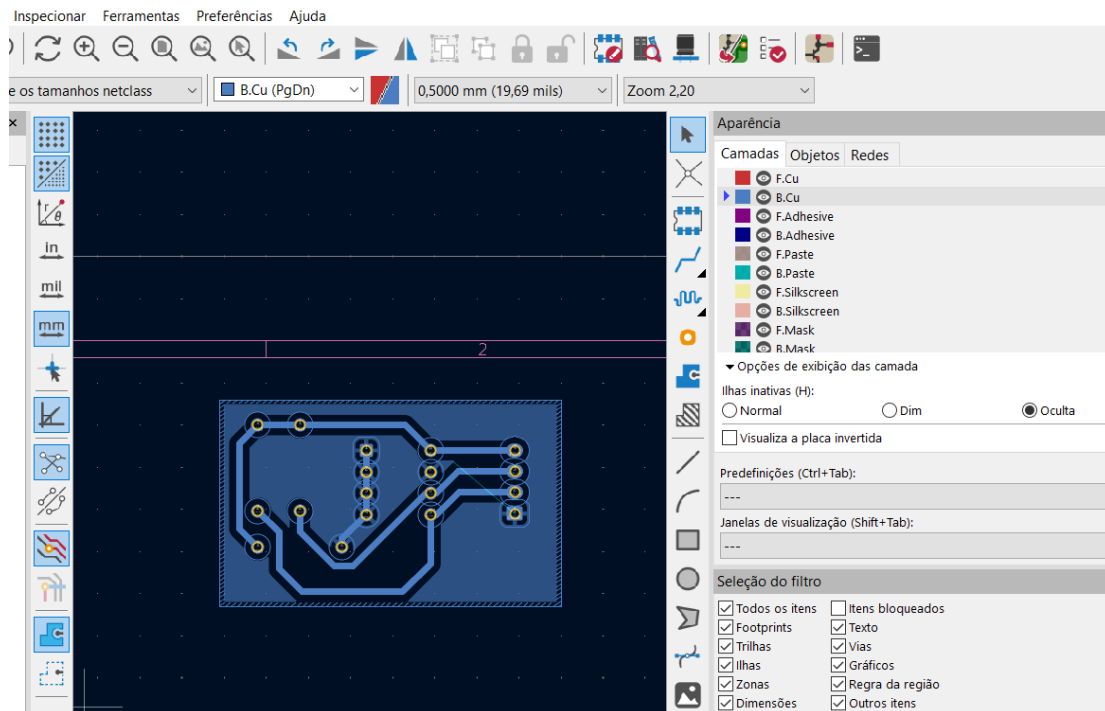
espaçamento entre trilhas de aproximadamente 40 mil (1 mm), para melhorar o desempenho elétrico e reduzir interferências.

- Como não há processo de furo metalizado, recomenda-se que os projetos sejam desenvolvidos em **face única**, evitando a necessidade de interconexões



5. Roteamento das trilhas:

- Chaveie para a camada **B.Cu**.



- O roteamento pode ser feito manualmente com a ferramenta “Rotear Trilhas” (atalho X), respeitando as conexões do esquemático.
 - Ative a Ferramenta de Roteamento: A forma mais rápida de começar é com o atalho de teclado X (para roteamento interativo). Você também pode clicar no ícone de "Adicionar trilhas e vias" na barra de ferramentas à direita.
 - Comece a Rastrear: Clique no *pad* (ilha de solda) do componente por onde a trilha deve começar. O KiCad irá selecionar automaticamente a *net* (rede) correta, e a trilha “grudará” no cursor.
 - Defina o Caminho: Para traçar uma trilha, defina o caminho com o *mouse*. O roteador interativo do KiCad é inteligente: ele move outras trilhas e vias para

abrir espaço, **respeitando as regras de *design*** configuradas Para mover a trilha inteira, segure a tecla **Alt** enquanto arrasta um de seus segmentos.

- **Mude de Camada (Vias):** Para passar a trilha para outra camada da placa, basta clicar com o botão esquerdo do *mouse* para fixar o segmento da trilha e, em seguida, pressionar a tecla **V**. O KiCad irá automaticamente adicionar uma via e mudar para a próxima camada, permitindo que você continue o roteamento.
 - **Finalize o Roteamento:** Conclua a trilha clicando no *pad* de destino (onde a trilha deve terminar).
 - O KiCad também oferece um *auto-router* externo opcional (como o [Freerouting](#)) para projetos menos complexos.
6. **Definição do plano de terra:** Adicione as áreas de cobre para o aterramento. No KiCad, cria-se o plano de terra usando a ferramenta Zona Preenchida (em inglês *Filled Zone*). Siga estes passos:
- **Selecione a Ferramenta:** Na barra de ferramentas à direita, clique no ícone “Desenhar regiões preenchidas” (Atalho CTRL+Shift+Z).
 - **Configure a Zona:** Clique na camada que se deseja usar (por exemplo, B.Cu para a camada inferior) e clique num dos cantos da área onde o plano de terra ficará. Geralmente, ele cobre toda a placa. Uma janela de propriedades vai se abrir:
 - i. **Net:** Selecione a *net* de aterramento, que é geralmente chamada de “GND” ou “GNDREF”.
 - ii. **Camada:** Confirme a camada onde a zona será criada.
 - iii. **Propriedades de Preenchimento:** Deixe as configurações padrão, a menos que se saiba o que está fazendo. A largura do condutor para as conexões térmicas (em inglês *thermal reliefs*) é importante para a soldagem de componentes.
 - **Preencha a Zona:** Desenhe a zona a ser preenchida clicando nos seus vértices sequencialmente. Após desenhar a zona, pressione a tecla “B”. Isso preenche a área com cobre, criando o plano de terra.

Com o *layout* concluído, recomenda-se executar o DRC (do inglês, *Design Rule Check*) para garantir que o *layout* esteja de acordo com as regras definidas e as boas práticas de fabricação em *Design for Manufacturability* ((DFM). Isso pode ser realizado através dos seguintes passos iterativos:

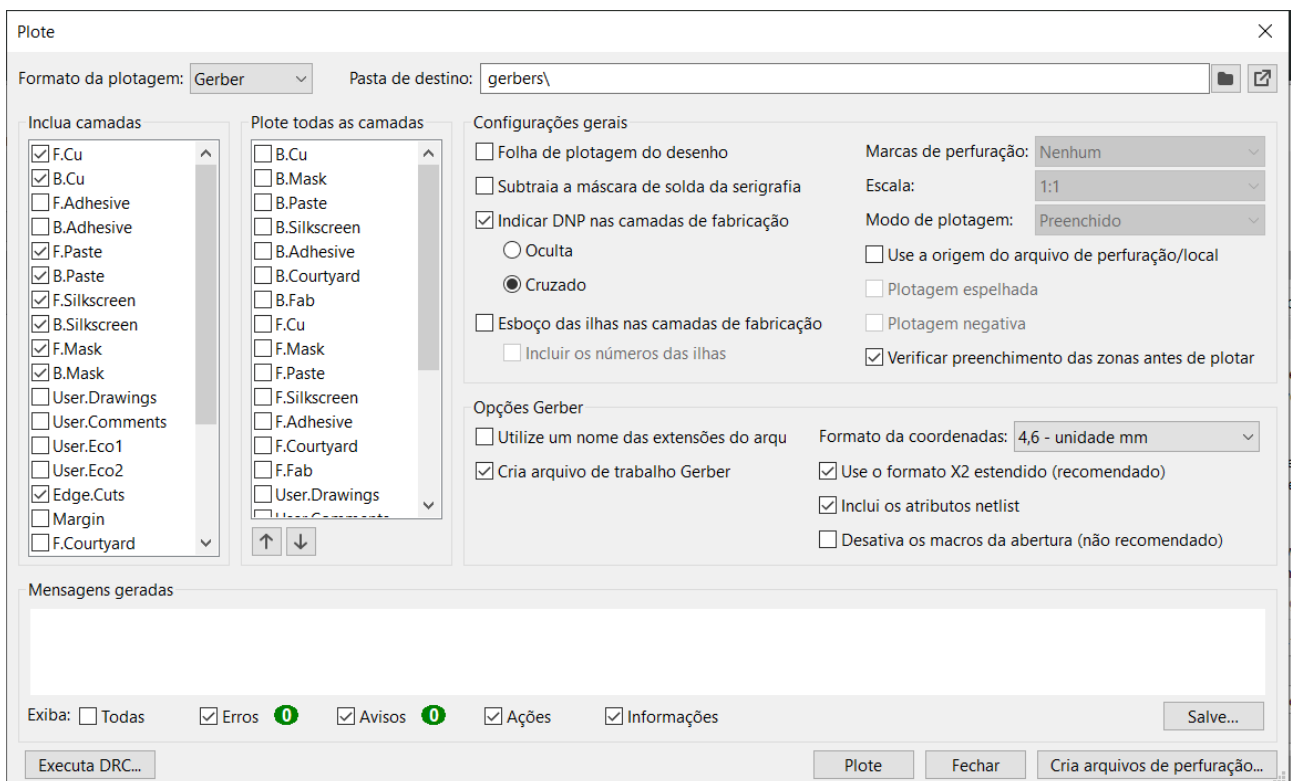
1. **Executar o DRC:**
 - No PCB Editor, clique no ícone de “Verificador das Regras de Desenho” ou acesse: Inspecionar > Verificador das Regras de Desenho (DRC).
2. **Análise dos erros:**
 - O KiCad exibe uma lista com todos os erros e advertências encontrados.
 - Cada erro pode ser clicado para destacar visualmente no *layout* a área exata do problema.
3. **Correção dos problemas:**
 - O projetista ajusta trilhas, espaçamentos, *pads* ou refaz roteamentos conforme necessário.
4. **Reexecutar o DRC:**
 - O processo é repetido (quantas vezes for necessário) até que o relatório esteja limpo, ou seja, sem erros críticos.

Pode-se visualizar a placa finalizada em 3D, clicando em Visualizar > Visualizador 3D. Antes do envio para a fabricação, é fundamental conferir os *footprints* dos componentes. Muitas vezes, o **footprint de encapsulamento selecionado no software pode não corresponder**

exatamente ao footprint dos componentes físicos que temos no almoxarifado. Esta discrepância pode ser causada por variações entre fabricantes ou especificações ligeiramente diferentes do componente. Portanto, é uma prática altamente recomendada realizar uma impressão da placa em **escala 1:1** (Arquivo > Imprima...) em uma folha de papel e posicionar os componentes reais sobre os respectivos *footprints*. Dessa forma, é possível verificar de maneira prática e eficiente se as dimensões e distâncias entre os pinos no *layout* correspondem corretamente aos componentes físicos disponíveis para a aula.

Etapa 3: Geração automática dos arquivos de fabricação

Após validar o projeto e finalizar o *layout*, o KiCad torna a preparação para a fabricação um processo simples. Basta ir ao menu Arquivo > Arquivos para fabricação para gerar os documentos necessários para a manufatura da placa. A partir dessa etapa, pode-se obter tanto os arquivos Gerber (.gbr) clicando em Plote, que contêm os padrões de trilhas, máscara de solda e serigrafia, quanto os arquivos de perfuração (.drl) pressionando em Cria arquivos de perfuração ..., que orientam a máquina de furação. Esses arquivos são a “planta” que a fábrica usará para produzir e montar o projeto do circuito.



Os arquivos gerados incluem:

- Gerber files: arquivos com extensões como .GTL (camada superior de cobre), .GBL (camada inferior de cobre), .GTS (máscara de solda superior), .GBS (máscara de solda inferior), .GTO (serigrafia superior), .GBO (serigrafia inferior) e .Edge.Cuts (contorno da placa). Esses arquivos descrevem graficamente cada camada da PCB, sendo fundamentais para a fabricação.
- Arquivo de perfuração (Excellon): normalmente com extensão .drl, contém as informações sobre furos mecânicos e vias condutivas, com diâmetros e coordenadas precisas.

- BOM (do inglês *Bill of Materials*): gerado a partir do esquemático e customizável, esse arquivo lista todos os componentes do projeto com referências, quantidades, valores e, opcionalmente, códigos de fabricantes ou distribuidores.
- *Pick-and-place file*: também chamado de arquivo de posicionamento, é exportado com extensões como .pos ou .csv e contém as coordenadas X/Y, orientação e lado da placa de cada componente, permitindo a montagem automatizada por máquinas.
- PDFs de documentação: o KiCad permite gerar documentos em PDF com as vistas superior e inferior da placa, serigrafia, *layout*, esquemáticos e instruções auxiliares para montagem e testes manuais.

Esse conjunto de arquivos garante que o projeto eletrônico possa ser enviado com segurança para fabricantes e montadoras, assegurando que a placa seja produzida conforme o planejado no ambiente de projeto.

Soldagem dos componentes

Antes da montagem da PCB, há uma etapa fundamental que transforma um *design* em um objeto físico. A fabricação da PCB é o processo que precede a soldagem e inclui várias fases essenciais. Primeiro, os desenhos das camadas do circuito são transferidos para uma folha de material isolante, revestida com cobre. Em seguida, o excesso de cobre é removido quimicamente, deixando apenas as trilhas que formarão o circuito. Após isso, máquinas de precisão realizam as perfurações necessárias para os componentes de furo passante (THT). Por fim, a placa recebe acabamentos como a máscara de solda, que protege as trilhas, e a serigrafia, que inclui as legendas dos componentes.

Após a fabricação, a placa está pronta para a próxima fase: a montagem dos componentes. Para que esse processo seja bem-sucedido, é fundamental usar as ferramentas e os equipamentos corretos. Eles são essenciais para o posicionamento preciso dos componentes, a soldagem, a inspeção e os testes, o que melhora a qualidade e a confiabilidade final da placa. A soldagem é a técnica central desse processo. Ela envolve a fusão de uma liga metálica para criar uma conexão segura e confiável entre o componente e a placa, sendo vital tanto na fabricação quanto no reparo de dispositivos eletrônicos. Algumas das ferramentas e equipamentos de soldagem mais importantes incluem:

- Ferro de solda ou estação de solda: Usado para derreter solda e criar juntas entre os componentes e a PCB.
- Solda: Uma liga metálica que derrete a uma temperatura relativamente baixa, usada para formar conexões entre os componentes e a placa.
- Fluxo: Agente químico que auxilia na limpeza e preparação de superfícies para soldagem, melhorando a qualidade da junta soldada.
- Limpador de ponta de solda: Utilizado para limpar e manter a ponta do ferro de solda, garantindo ótimo desempenho e transferência de calor.



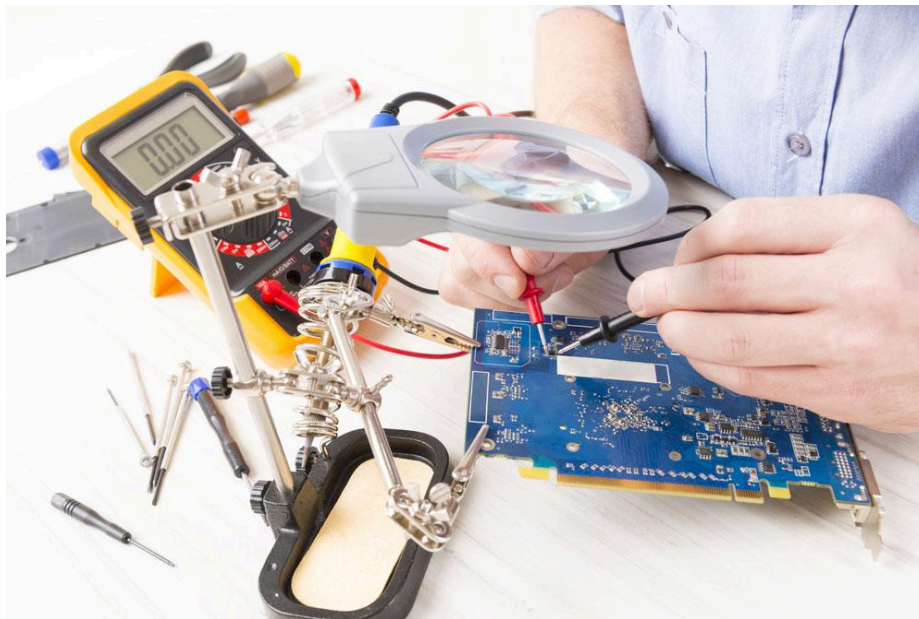
Fonte: [Xtronicusa](http://Xtronicusa.com).

Além de ferramentas básicas, a seleção de equipamentos de solda deve considerar fatores como controle de temperatura para evitar danos e garantir juntas de alta qualidade, e o tamanho da ponta, que deve ser apropriado para o tamanho dos componentes e a precisão necessária. O tipo de fluxo também é crucial e deve ser compatível com a solda utilizada, sendo aplicado com moderação. A manutenção regular do equipamento, como a limpeza da ponta, é essencial para garantir desempenho consistente e prolongar sua vida útil.

Apesar de ser o método mais confiável, a soldagem tem suas limitações, como a possibilidade de produzir juntas frágeis e ser um processo demorado para componentes complexos. Embora existam alternativas, como adesivos condutivos e fixadores mecânicos, a soldagem ainda é a técnica mais comum para conectar componentes a uma PCB, sendo a escolha adequada e a manutenção do equipamento fatores chave para o sucesso do processo.

Ferramentas de inspeção e teste são essenciais para verificar a qualidade e a funcionalidade de PCBs montadas. Algumas ferramentas comuns de inspeção e teste incluem:

- Lupa ou microscópio: Usado para inspecionar juntas de solda e o posicionamento dos componentes em busca de defeitos ou desalinhamentos. Esta ferramenta é particularmente útil para identificar problemas com componentes menores, que podem ser difíceis de detectar a olho nu.
- Testador de continuidade: Um dispositivo que verifica as conexões elétricas corretas entre os componentes e a placa. Esta ferramenta garante que os caminhos elétricos da PCB estejam conectados corretamente, evitando curtos-circuitos ou outros problemas.
- Multímetro: Uma ferramenta versátil que mede diversas propriedades elétricas, como tensão, corrente e resistência, para ajudar a diagnosticar problemas na PCB montada.



Fonte: [WellPCB](#).

- Testador de circuito integrado (em inglês, *Integrated Circuit Tester* – ICT): Equipamento de teste de circuitos integrados¹.

Mesmo sendo essenciais, as ferramentas de inspeção têm suas limitações e podem apresentar falhas. Por exemplo, uma lupa ou microscópio pode não ser suficiente para identificar defeitos sutis ou desalinhamentos na placa. Da mesma forma, multímetros e testadores de continuidade podem fornecer resultados imprecisos se não forem calibrados com frequência. Por isso, é fundamental utilizar essas ferramentas em conjunto com outros métodos, como inspeções visuais detalhadas e testes funcionais, para garantir que a PCB opere corretamente. A escolha do equipamento de teste mais adequado deve sempre levar em conta os requisitos específicos da placa e de seus componentes. Além disso, a calibração e a manutenção regular dos equipamentos de teste são essenciais para garantir a precisão de suas medições.

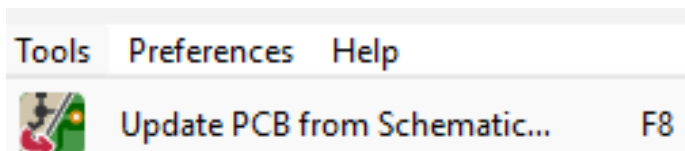
Projeto de uma PCB a partir de um Esquemático com *Footprints*

Para ilustrar de forma prática o procedimento de um projeto de *layout* de PCB, daremos continuidade ao [projeto da placa BitDogProbe](#) introduzido no Roteiro 2. Com o esquemático e os *footprints* já desenvolvidos e validados na etapa anterior, o foco agora se volta para a tradução desse *design* lógico em um *layout* físico pronto para a fabricação. Veremos as principais etapas do processo de *layout*, incluindo a organização e o posicionamento dos componentes, o roteamento das trilhas, a configuração dos planos de aterramento e, finalmente, a geração dos arquivos que serão enviados para a fábrica, transformando o seu projeto digital em uma placa real.

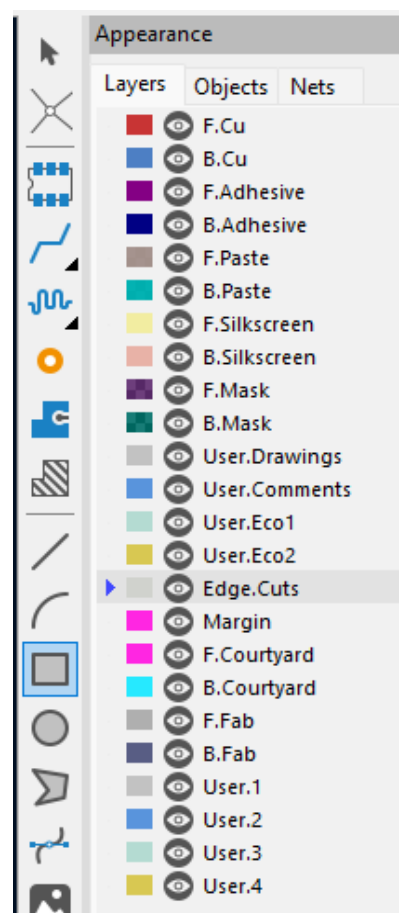
Iniciando o *layout* (roteamento da placa)

¹ Em ambientes de produção de alto volume, os [testadores de circuito integrado profissionais](#) e os [equipamentos de teste automatizado](#) (em inglês, *Automatic Test Equipment* – ATE) são usados para testar a funcionalidade da PCB de forma rápida e precisa.

Antes de começar a rotear, vá para o editor de *layout*, faça a atualização puxando do esquemático:



Defina a região da placa usando a camada *Edge.Cuts*. É a camada que define o contorno físico (a forma e as dimensões) da PCB. É essencialmente a “linha de corte” que a máquina de fabricação da PCB irá seguir para separar a placa a ser confeccionada do painel de material (o *board* ou substrato) onde ela será produzida. Se a placa tiver furos ou recortes que não são furos de componentes (por exemplo, um recorte para acomodar um conector ou a carcaça de um dispositivo), eles também devem ser desenhados nesta camada.



Posicione os componentes do projeto dentro desta área.

Observe que o editor de *layout* possui vários botões com recursos do lado esquerdo na janela. A tabela a seguir descreve resumidamente cada um separando-os em função.



Ferramentas de manipulação e roteamento

1. **Selecionar (seta preta)** – Seleciona e move objetos na placa (componentes, trilhas, etc).
2. **Excluir (tesoura com X)** – Remove o item clicado (trilha, via, texto).
3. **Selecionar área (retângulo pontilhado)** – Seleciona múltiplos itens ao arrastar uma área.
4. **Roteamento interativo** – Inicia o roteamento manual de trilhas.
5. **Roteamento com arco (modo curva)** – Traça trilhas curvas (modo avançado de roteamento).
6. **Roteamento de trilha serpentina** – Cria trilhas serpenteadas (útil para ajuste de comprimento/impedância).

Colocação de elementos elétricos

7. **Colocar via** – Insere uma via (conexão entre camadas).
8. **Inserir zona de cobre** – Adiciona áreas preenchidas com cobre (ex: GND plane).
9. **Atualizar zonas de cobre (ícone com C)** – Recalcula e atualiza o preenchimento das zonas.
10. **Gerar preenchimento de zonas de cobre (sombreado)** – Força a regeneração das zonas.

Ferramentas gráficas e de desenho

11. **Linha gráfica** – Desenha linhas decorativas na PCB.
12. **Arco gráfico** – Desenha arcos decorativos.
13. **Retângulo gráfico** – Desenha um retângulo na camada gráfica.
14. **Círculo gráfico** – Desenha círculos.
15. **Seta gráfica** – Insere setas (úteis para documentação ou silkscreen).
16. **Bezier (curva livre)** – Desenha curvas manuais/artísticas.
17. **Imagem (foto)** – Insere uma imagem (ex: logotipo no silkscreen).

Documentação e texto

18. **Texto** – Insere texto (ex: referência, nome de rede, etc).
19. **Comentário** – Texto sem função elétrica, apenas informativo.
20. **Tabela** – Insere uma tabela (útil para leg. ou identificação de áreas).

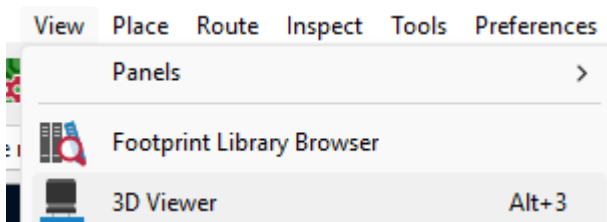
Ferramentas de medição e depuração

21. **Medição (régua azul)** – Mede distância entre dois pontos (ex: entre pads).
22. **Ponto de origem/âncora de medição** – Define ponto fixo para medições relativas.
23. **Apagar ponto de origem (bola vermelha)** – Remove a âncora de medição.

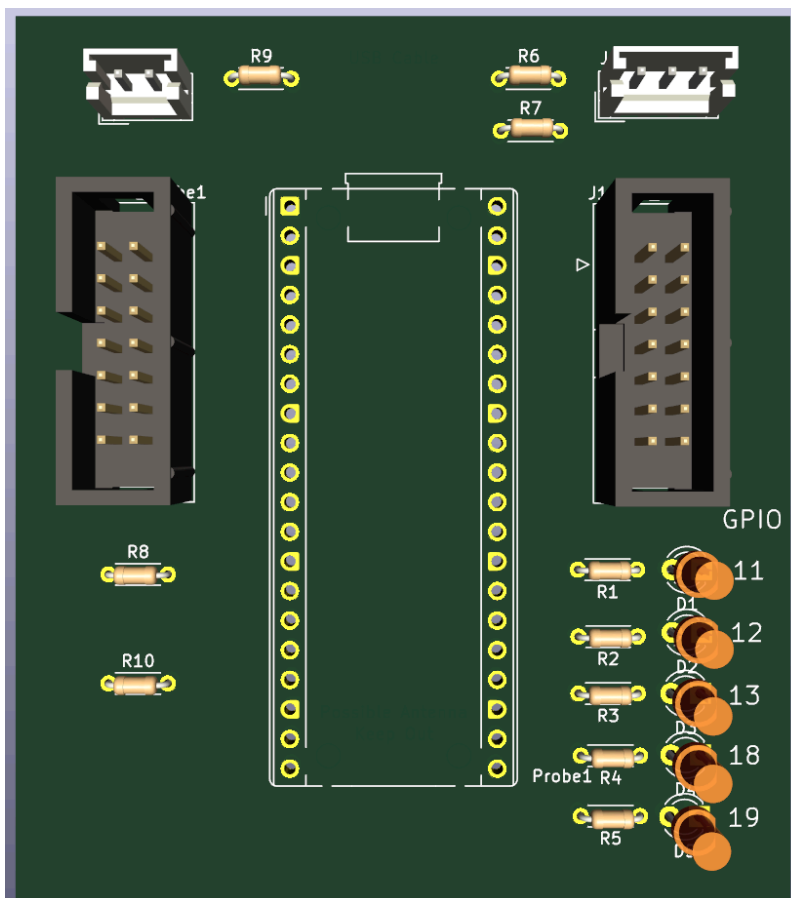
Visualização e alinhamento

24. **Grade de posicionamento (pontos)** – Alterna visualização da grade de alinhamento.
25. **Régua de layout (esquadro)** – Insere cotas/dimensões visuais na PCB.

Abra a visualização 3D da placa e analise a posição e orientação dos conectores e componentes.

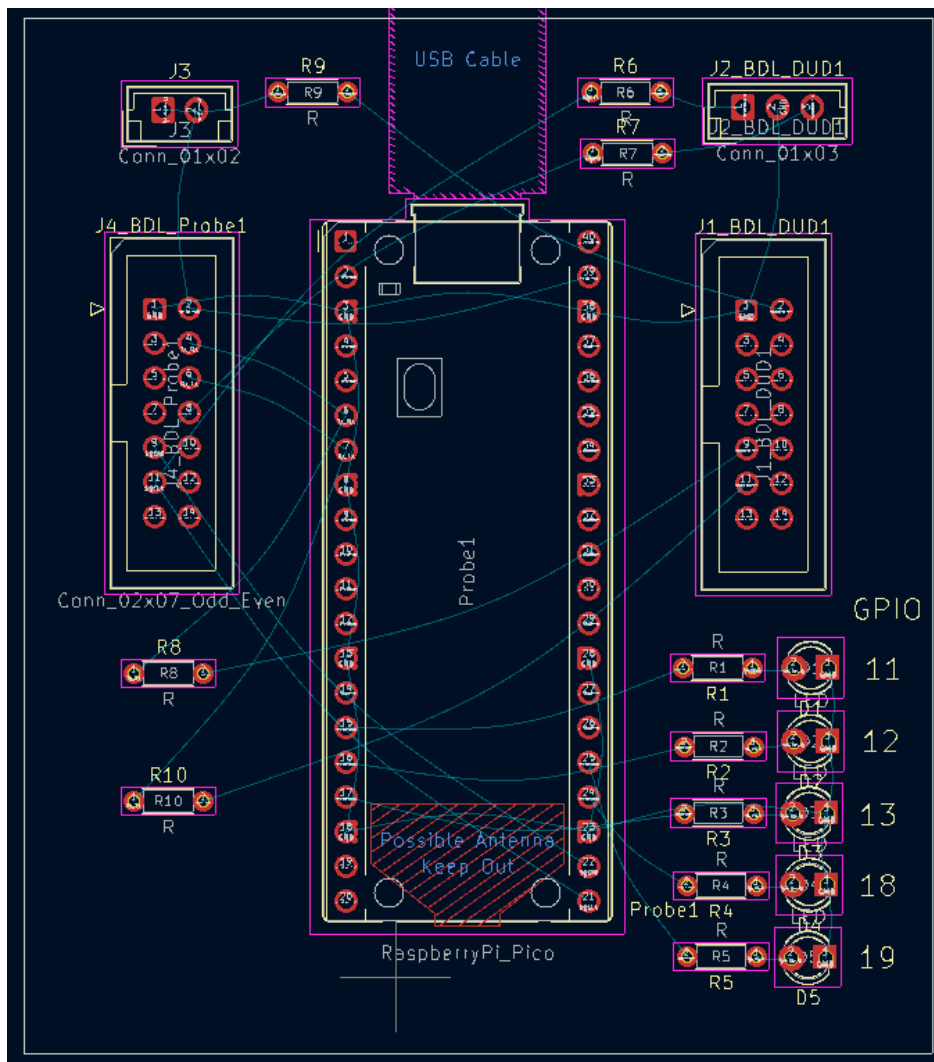


Este processo exige algumas interações até obter a primeira ideia, que pode ser alterada conforme o projeto evolui.



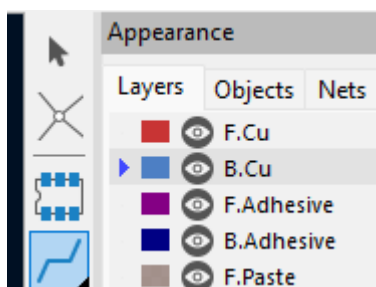
Feche a visualização 3D e faça a correção do posicionamento.

Observe que são desenhadas linhas azuis (guias de conexão) conectando os nós dos componentes com base no seu esquema. Observe que, conforme a posição e alinhamento dos *footprints*, as conexões ficam melhor distribuídas, sem aparência de torção. Também é uma boa prática posicionar os componentes para que as linhas de metal sejam curtas e sem cruzamento exagerado. É nesta etapa que se decide se o projeto será de face única (*back metal*) ou face dupla (*front e back metal*).

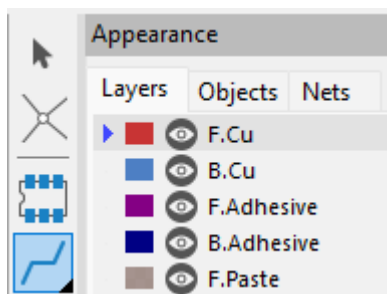


Nessa fase, defina também se a placa será:

- Face única (trilhas apenas no lado inferior, *back copper*), ou



- Face dupla (trilhas no *front* e *back*) — o mais comum em placas mais complexas. Daí pode-se usar também a camada Front Copper ([F.Cu](#)).

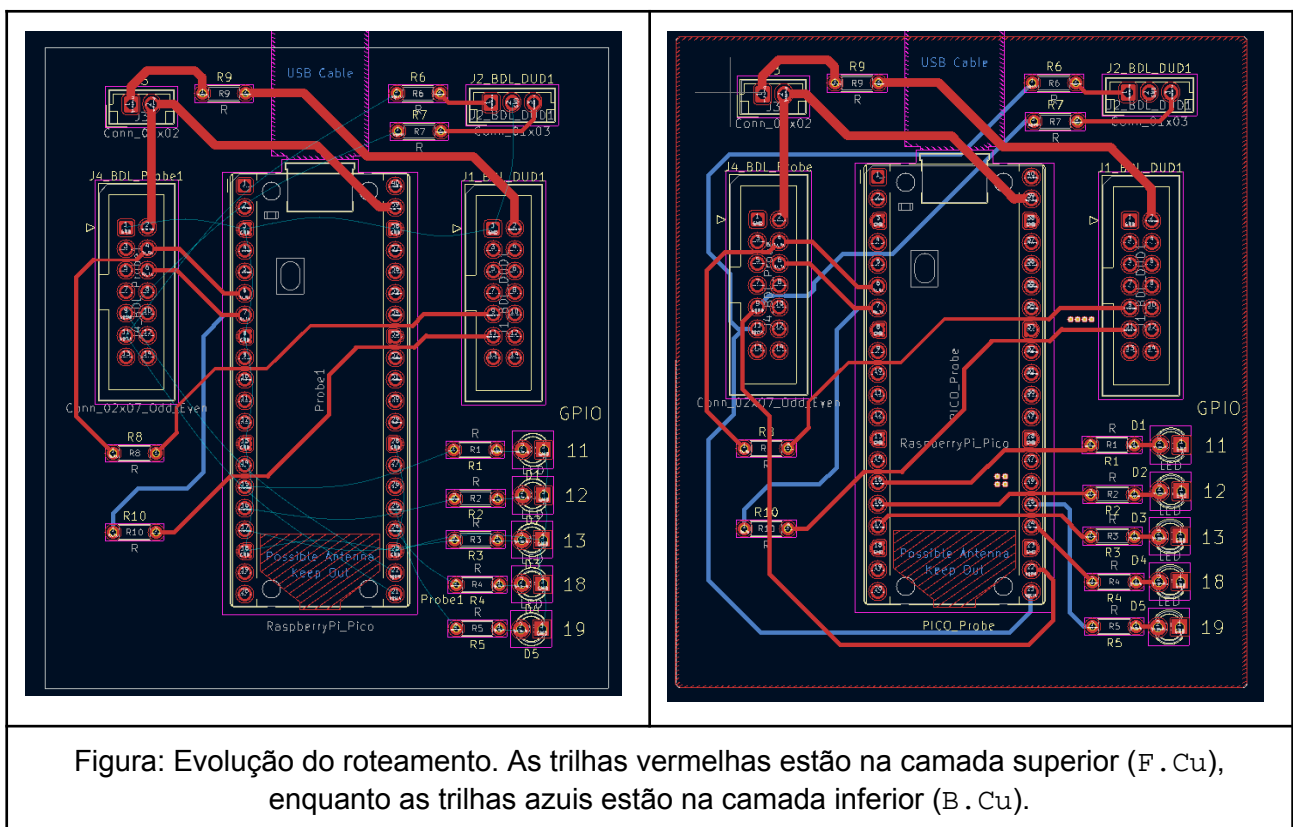


Roteando na prática

Clique sobre um terminal de componente: o KiCad irá destacar automaticamente a outra extremidade da conexão, facilitando muito o roteamento.

Importante

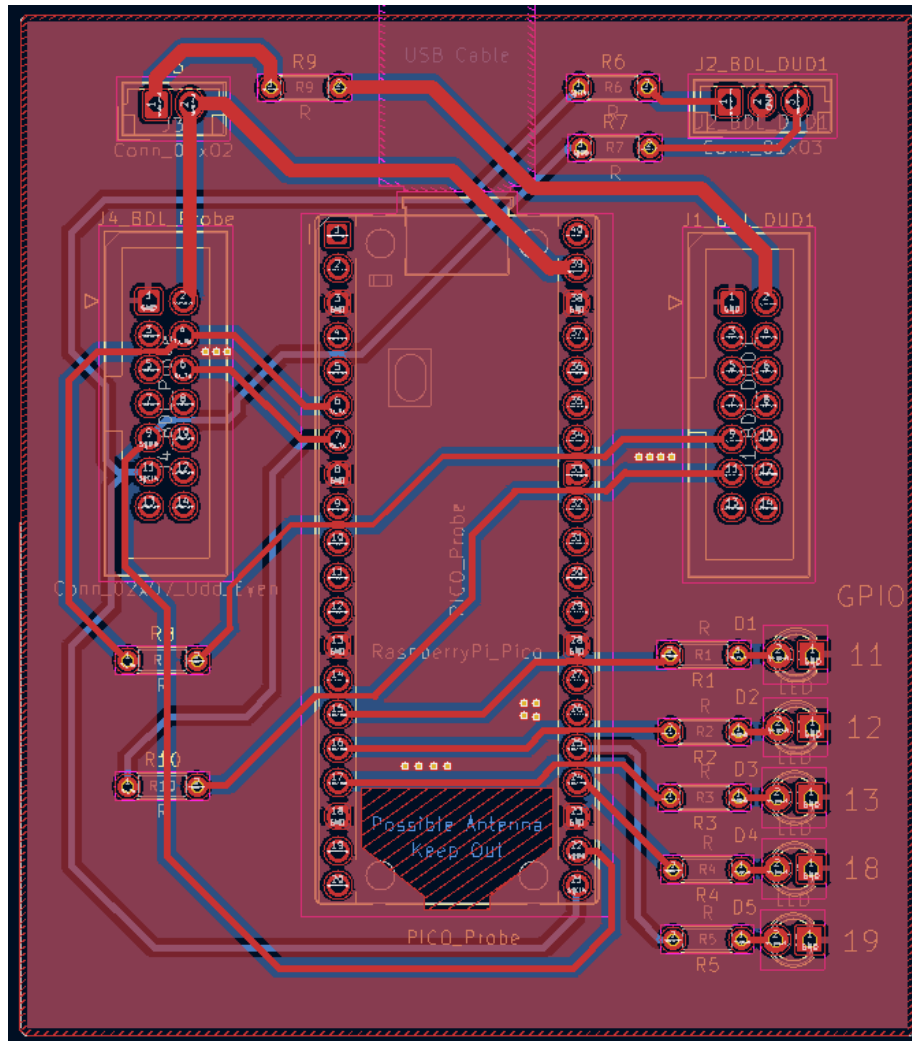
- Se for usar uma LPKF (fresadora CNC), siga as regras de trilha mínima e espaçamento da máquina.
- Se for enviar para fabricação externa, use as regras (*design rules*) fornecidas pela empresa.



Criando os planos de terra

Após completar o roteamento visual, o próximo passo é criar os planos de terra (GND), que são essenciais para a estabilidade e o bom funcionamento do circuito. Para isso, cria-se dois planos de GND: um na face superior (*Front*) e outro na face inferior (*Back*). O processo é simples: em cada face, desenha uma zona preenchida (*filled zone*) e associe-a ao nó (ou *net*) GND. O KiCad fará o

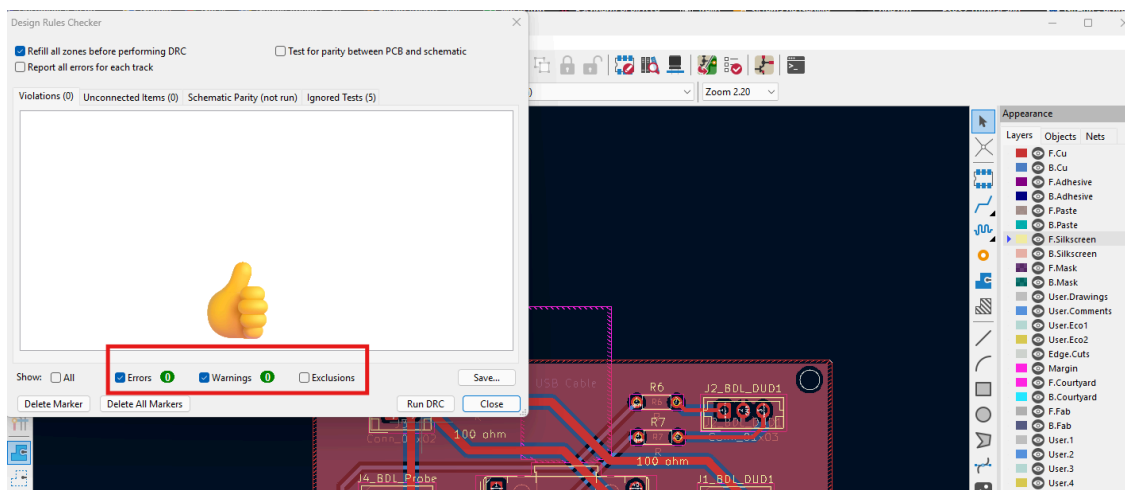
preenchimento automático, conectando todos os pontos de terra de forma eficiente. Com isso, não será necessário criar trilhas de terra manualmente, o que economiza tempo e garante uma conexão robusta e de baixa impedância.



Verificação final

Execute novamente o DRC no *layout* da PCB:

- O verificador indicará violações de regras de projeto (como trilhas muito próximas, furos mal posicionados etc.)
- Analise com atenção cada erro ou aviso — trate-os com carinho para evitar retrabalho futuro



Artes finais

Finalizada a etapa de roteamento, pode-se ainda adicionar detalhes visuais para identificar a placa. Para isso, usa-se as camadas *Front Silkscreen* (F.Silkscreen) e *Back Silkscreen* (B.Silkscreen). O *silkscreen* é a camada de serigrafia que fica por cima do verniz de proteção da PCB. É nela que se desenha textos, logotipos e marcações que indicam a posição e a polaridade dos componentes. Essas marcações são visíveis na placa final, desde que ela seja produzida por um processo comercial de fabricação.

Atenção ao Processo de Fabricação:

O uso dessas camadas depende do método de fabricação. Se for usar uma fresadora CNC (como a LPKF) para produzir uma placa, o processo é diferente. A fresadora não consegue “imprimir” o *silkscreen* e, por isso, essa camada não será processada.

Neste caso, deve-se limitar a usar apenas três camadas principais:

B.Cu (*Bottom Copper*): Para definir as trilhas de cobre na face inferior da placa.

Edge.Cuts: Para desenhar o contorno da placa, indicando onde a fresadora deve fazer o corte.

Dwgs.User (ou Eco1.User): Esta é a camada que pode ser usada para marcações visuais, como anotações, furos ou indicações de posição de componentes. A fresadora pode interpretar essas linhas como marcações de contorno, “gravando” a informação na placa.

Se for realmente necessário adotar face dupla, a camada F.Cu (*Front Copper*) deve ser incluída. No entanto, é importante lembrar que essa é a camada onde os componentes ficam apoiados, o que pode dificultar o acesso aos *pads* para a soldagem. Sempre que possível, mantenha os *pads* de ligação das trilhas na parte inferior (B.Cu), de forma a facilitar o processo de soldagem.

Guia de desenvolvimento do projeto P4

Este guia de procedimento para o projeto P4 tem como objetivo otimizar e aumentar a confiabilidade da montagem do circuito no desenvolvimento de sistemas embarcados. A principal diferença em relação aos projetos anteriores é a substituição da protoboard por uma PCB.

O projeto segue os seguintes passos:

1. Clonagem do projeto P4 do GitLab.
2. Definição da estrutura do projeto.
3. Captura do esquemático com *footprints* e teste funcional do circuito montado em um *protoboard*.
4. Projeto do *layout* correspondente no KiCad.
5. Produção da PCB LPKF.
6. Montagem da PCB.
7. Conexão do Circuito Complementar à Placa BitDogLab.
8. Implementação do *firmware* usando STM32CubeMX e STM32CubeIDE e testes iniciais.
9. Calibração e testes finais.
10. Documentação dos códigos-fonte e descrição do projeto no arquivo README.md do projeto P4 no GitLab.

Note que os passos de 4 a 7 são os que mais diferem dos guias anteriores, pois a montagem do circuito complementar agora utiliza a PCB. Para os passos de 4 a 6, siga as instruções:

- Passos 4 e 5 (Projeto e Produção): Siga as instruções das etapas 2 e 3 da Seção “Geração automática de arquivos de fabricação de PCBs” para criar o projeto. Submeta os arquivos gerados ao SATE para a produção da PCB.

Regras e orientações para o *design* seguindo as especificações da LPKF-S43 (SATE):

Tamanho máximo da placa 250mm x 180mm – Face dupla ou única

Furações disponíveis:

0,5, 0,6 - 0,7 - 0,8 - 0,9 - 1,0 - 1,2 - 1,5 - 1,6 - 1,8 - 2,0

Espaçamento mínimo recomendado entre trilhas (clearance) de 40mil ou 1mm .

Tamanho mínimo para trilha: 0,61 mm (24 mil), mas esse valor deve ser utilizado apenas em situações excepcionais, quando não houver outra alternativa de roteamento. Para todos os demais casos, o recomendado é adotar trilhas com largura a partir de 1,0 mm (40 mil), pois isso facilita a produção, melhora a robustez do circuito e reduz significativamente o risco de falhas na soldagem.

Recomendável, sempre que possível utilizar plano de terra nas faces utilizadas na placa (espaço entre trilhas de 40mil ou 1mm);

Fazer uma layer com a linha de recorte da placa (limites da placa para o recorte na máquina);

Pad deve ser no mínimo 30% maior que o furo.

Não temos processo de metalização de furos. Desta forma, recomendamos que os projetos sejam desenvolvidos em **face única**, evitando a necessidade de conexões entre as camadas por meio de fios.

Para efetuar a fabricação, precisamos que o projeto seja convertido em arquivos GERBERS (há tutoriais na *internet* que guiam essa conversão dependendo do *software* de *design* que é usado) e que seja informado, no e-mail de solicitação, se placa é face única ou face dupla.

- Passo 6 (Montagem): Assim que receber a PCB, siga as instruções abaixo para a soldagem:
 - Identifique todos os componentes listados na “Lista de Materiais”.
 - Comece soldando os componentes passivos (resistores, capacitores).
 - Verifique a polaridade de componentes como LEDs e diodos antes de soldá-los.
 - Após a soldagem, inspecione a placa visualmente e com testes de continuidade para identificar possíveis curtos-circuitos.

A PCB montada deve ser conectada à placa BitDogLab usando os conectores e cabos especificados no passo 7. A conexão é a mesma do projeto anterior, mas agora o circuito complementar está em uma única placa, o que elimina cabos soltos e a necessidade de uma *protoboard*. A utilização da PCB melhora a estética e a organização, além de reduzir o risco de falhas por mau contato ou danos físicos. Em caso de problemas, é sempre recomendado verificar a soldagem dos componentes na PCB antes de prosseguir com a solução de problemas no *firmware*.

Submissão dos arquivos de fabricação

O prazo de fabricação no SATE é de 10 dias úteis após a entrega dos arquivos. Para submeter os arquivos de fabricação do seu projeto de PCB ao SATE, siga as orientações abaixo:

Endereço de e-mail: satefeec@unicamp.br

Assunto do e-mail: EA801 - TURMA x - GRUPO y - PRODUÇÃO PCB

Anexo: Um único arquivo compactado (.zip) que contenha todos os arquivos de fabricação do projeto, gerados nos formatos gbr e drl. Identifique o arquivo com RA de um dos membros do grupo e a turma (p. ex, x_<RA>.zip).

Prazo de entrega do arquivo compactado:

11/05 (turmas ímpares)

18/05 (turmas pares)