

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

Rayan Martins Steinbach

**DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA A CONFEÇÃO DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO EM MÁQUINAS CNC**

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA**

Rayan Martins Steinbach

**DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA A CONFEÇÃO DE PLACAS DE
CIRCUITO IMPRESSO EM MÁQUINAS CNC**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletrônico.

Orientador:
Prof. Dr. Renan Augusto Starke

FLORIANÓPOLIS, 2022.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Steinbach, Rayan
DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA A CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO EM MÁQUINAS CNC / Rayan Steinbach; orientação de Renan Starke. - Florianópolis, SC, 2022.
62 p.
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis.
Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica. Inclui Referências.

1. Placas de circuito impresso. 2. Manufatura. 3. Fresadora. I. Starke, Renan. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA A CONFECÇÃO DE PLACAS DECIRCUITO IMPRESSO EM MÁQUINAS CNC.

DEFINIÇÃO DE PROCEDIMENTOS PARA A CONFECÇÃO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO EM MÁQUINAS CNC

RAYAN MARTINS STEINBACH

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro eletrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 14 de março, 2022.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RENAN AUGUSTO STARKE
Data: 31/03/2022 13:51:13-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Renan Augusto Starke, Dr.



Documento assinado digitalmente
JOABEL MOIA
Data: 04/04/2022 11:36:13-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Joabel Moia, Dr.



Documento assinado digitalmente
REGINALDO STEINBACH
Data: 04/04/2022 11:07:46-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Reginaldo Steinbach, Me.

Dedico este trabalho ao meu avô João,
que me incentivou até seu último momento.
Sem ele nada disso seria possível.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais e avós pelo apoio e incentivos que permitiram com que eu continuasse focado e determinado em todos estes anos de estudo e que me tornasse quem sou hoje. Agradeço também à minha namorada, por sempre compreender as minhas ausências em função deste trabalho e do curso. Aos meus amigos, deixo meu agradecimento pelos conhecimentos adquiridos, dificuldades superadas e momentos de felicidade que passamos no decorrer desta graduação. Aos professores, agradeço pelos ensinamentos passados e correções dadas. Que permitiram com que fosse alcançado maturidade e experiência com os assuntos abordados durante o curso. Por fim, gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Explicar toda a natureza é uma tarefa difícil demais
para qualquer homem ou para qualquer época. É
muito melhor fazer um pouco e com certeza e deixar
o resto para aqueles que vêm depois de você.
(Isaac Newton)

RESUMO

A manufatura de placas de circuito impresso é uma das etapas importantes do processo de criação de um produto eletrônico. Para placas de projetos muito complexos, há a necessidade de utilizar diversos meios distintos no *desing* da placa, o que aumenta o número de elementos e camadas. Com isso é necessário que seja desenvolvido um método robusto que garanta que a placa manufaturada seja o mais fiel possível ao projeto. Com isso em vista, este trabalho propõe a utilização de ferramentas de projeto e manufatura auxiliados por computador para a obtenção do resultado mais fiel possível ao que se projetou. Por meio de experimentação, realizou-se a utilização de diversos parâmetros para encontrar o que melhor se adéqua às ferramentas disponíveis. Também definiu-se um procedimento para a manufatura de placas de circuito impresso dupla face utilizando os softwares *FlatCAM* e *bCNC*.

Palavras-chave: Placas de circuito impresso. Manufatura. Fresadora. CAD. CAM.

ABSTRACT

Manufacture of printed circuit boards is an important step in the process of creating an electronic product. For complex boards, there is a need to use several different tools in the design, which increases the number of elements and layers. With this, it is necessary to develop a robust method that guarantees that the board produced is as faithful as possible to the project. With that in mind, this work allows the use of design and computer-manufactured tools to obtain the most faithful possible result to what was designed. Through experimentation, the use of different parameters was tried to find the one that best fits the available tools. A standard procedure was also defined for the fabrication of double-sided printed circuit boards using FlatCAM and bCNC softwares.

Keywords: Printed Circuit Boards. Manufacture. Milling machine. CAD. CAM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos do circuito	18
Figura 2 – Processo de corrosão	19
Figura 3 – Primeira máquina CNC	20
Figura 4 – Máquina CNC Roland EGX-300	21
Figura 5 – Interface do bCNC	22
Figura 6 – Diagrama esquemático desenvolvido no Altium	23
Figura 7 – <i>Layout</i> de uma PCI desenvolvida no Altium	24
Figura 8 – Visualização 3d da PCI no Altium	24
Figura 9 – Diagrama esquemático desenvolvido no KiCAD	25
Figura 10 – Layout de PCI desenvolvido no KiCAD	25
Figura 11 – Visualização 3D de uma PCI no KiCAD	26
Figura 12 – Circuito desenvolvido no Proteus	26
Figura 13 – <i>Layout</i> de uma PCI desenvolvida no Proteus	27
Figura 14 – interface do FlatCAM	29
Figura 15 – Projeto de placa no KiCAD	33
Figura 16 – Projeto de placa no FlatCAM	34
Figura 17 – Modos de remoção de cobre do FlatCAM	35
Figura 18 – Placa manufaturada	36
Figura 19 – Placa de termômetro desenvolvida no KiCAD	37
Figura 20 – Placa manufaturada	38
Figura 21 – Detalhe da placa manufaturada	38
Figura 22 – Placa de teste Apresentada no FlatCAM	39
Figura 23 – Placas de teste manufaturadas. PCI 1 - Placa superior, PCI 2 - Placa Inferior	40
Figura 24 – Máquina CNC com câmera fixada	41
Figura 25 – Menu de configuração bCNC	42
Figura 26 – Menu <i>Camera</i>	43
Figura 27 – Adição do primeiro marcador	44
Figura 28 – Adição do segundo marcador	44
Figura 29 – Objeto orientado	44
Figura 30 – Placa original gerada no kiCAD	45
Figura 31 – Menu ferramenta dupla face FlatCAM	46
Figura 32 – <i>bottom</i> e <i>drill</i> espelhados no eixo Y	47
Figura 33 – Furos de alinhamento gerados	48
Figura 34 – PCI 1 - Visão do alinhamento	49
Figura 35 – PCI 1 - Visão da camada superior	49
Figura 36 – PCI 1 - Visão da camada inferior	50

Figura 37 – PCI 2 - Visão do alinhamento	51
Figura 38 – PCI 2 - Visão da camada superior	51
Figura 39 – PCI 2 - Visão da camada inferior	52
Figura 40 – Placa gera na ferramenta CAD	57
Figura 41 – Menu <i>plot</i> do KiCAD	58
Figura 42 – Menu <i>drill</i> do KiCAD	58
Figura 43 – Objetos importados e alinhados no FlatCAM	59
Figura 44 – Parâmetros de espelhamento	59
Figura 45 – Objeto com camada <i>bottom</i> e <i>drill</i> espelhados	60
Figura 46 – Objeto com furos de alinhamento gerados	61
Figura 47 – Geometria e trabalho gerados no FlatCAM	61
Figura 48 – Arquivo com os furos bCNC	62
Figura 49 – Orientação do objeto usando modo <i>orient</i>	62
Figura 50 – Face orientada	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ferramentas utilizadas	29
Tabela 2 – Parâmetros Isolação	33
Tabela 3 – Parâmetros de corte final	33
Tabela 4 – Parâmetros Isolação	37
Tabela 5 – Parâmetros de <i>Design</i> CAD	40
Tabela 6 – Parâmetros de <i>Design</i> CAM	41
Tabela 7 – Parâmetros de <i>Design</i> CAD	52
Tabela 8 – Parâmetros de <i>Design</i> CAM	52

LISTA DE CÓDIGOS

Código 2.1 – Exemplo de G-Code	27
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> (Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Projeto assistido por computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura assistida por computador)
CNC	<i>Computer Numeric Control</i> (Controle numérico computadorizado)
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i>
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IOT	<i>Internet of things</i> (Internet das Coisas)
PCI	Placa de circuito impresso
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Porta serial universal)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	15
1.2	Definição do Problema	16
1.3	Objetivo Geral	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Placas de circuito impresso (PCI)	17
2.2	Máquina CNC	19
2.3	Ferramentas de projeto assistido por computador (CAD)	22
2.4	Ferramentas de manufatura assistida por computador (CAM)	27
2.5	Ferramentas utilizadas	29
3	METODOLOGIA	30
3.1	Métodos Aplicados	30
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	32
4.1	Regras de <i>Design</i> de PCI nas ferramentas de CAD e CAM	32
4.2	Fabricação de PCI dupla face	41
4.2.1	Alinhamento por Câmera no bCNC	41
4.2.2	Orientação do objeto com bCNC	43
4.2.3	Modo dupla face FlatCAM	45
4.2.4	Resultados obtidos	48
4.3	Parâmetros estabelecidos	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICES	56
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE PLACAS DUPLA FACE	57

1 INTRODUÇÃO

Placas de circuito impresso estão presentes em praticamente todos os dispositivos eletrônicos e consistem de uma estrutura projetada para conectar componentes eletrônicos entre si, formando circuitos que cumprem uma dada função (LADOU, 2006).

As ferramentas de projeto e manufatura computadorizada se tornam cada vez mais intrínsecos ao processo de desenvolvimento de uma placa de circuito impresso. Os *softwares* de projeto permitem uma parametrização dos componentes utilizados, assim como a verificação de diversas regras de projeto de maneira automática e outras facilidades disponíveis. Já nas ferramentas de manufatura, a automatização da fabricação incrementa a precisão, confiabilidade e eficiência do processo (ADLER, 1989).

A falha ou má execução no processo de manufatura da placa de circuito impresso pode acarretar em problemas durante a utilização do produto eletrônico ao qual ela se destina. O Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) disponibiliza dois métodos para a manufatura das placas, sendo o primeiro a corrosão e o segundo a utilização de máquinas fresadoras. O primeiro método é o mais comum utilizado e adequado para a fabricação de altos volumes de placas na indústria e no IFSC. Esse método demanda um tempo elevado e tem uma complexidade alta, visto que é necessário a precisão na sua execução e análise metódica de cada passo realizado, caso contrário resultará em problemas na placa manufaturada. O segundo método que vem sendo estudado para aplicação em protótipos de projetos e para TCCs (Trabalhos de Conclusão de Curso), é a utilização de máquinas específicas que realizam automaticamente a manufatura das placas eletrônicas, garantindo um resultado final mais confiável e de melhor qualidade.

1.1 Justificativa

A manufatura de placas de circuito impresso é uma das etapas importantes do processo de criação de um produto eletrônico. Para placas de projetos muito complexos, há a necessidade de utilizar diversos meios distintos no *design* da placa, o que aumenta o número de elementos e camadas. Com isso é necessário que seja desenvolvido um método robusto que garanta que a placa manufaturada seja o mais fiel possível ao projeto.

Assim, deve-se utilizar um método que garanta qualidade, confiança e que diminua a probabilidade de falhas. Com isso em vista, as técnicas de manufatura utilizando de máquinas controladas por computador apresentam a possibilidade de garantir esses aspectos além de tornarem mais simples o processo como um todo. Para que isso seja alcançado é necessário estabelecer os padrões que serão utilizados

nas ferramentas que precedem este passo.

1.2 Definição do Problema

Os problemas que o presente trabalho visa solucionar são: Quais parâmetros devem ser estabelecidos nas ferramentas de projeto e manufatura para que este método possa ser utilizado e como pode ser feita a confecção de placas com duas faces distintas utilizando máquinas CNC (Controle numérico computadorizado)/ fresadoras?

1.3 Objetivo Geral

Define-se como objetivo deste trabalho o estabelecimento de parâmetros de ferramentas de projeto e manufatura para confecção de placas de circuito impresso em Máquinas de controle numérico.

1.4 Objetivos Específicos

Dentro do objetivo geral especificado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar e padronizar os parâmetros necessários em ferramentas de *design* de placas de circuito impresso;
- b) Padronizar os recursos utilizados em ferramentas de manufatura na confecção das placas;
- c) Estudar maneiras de realizar o alinhamento por câmera na ferramenta de envio de instruções para a máquina;
- d) Estudar e implementar metodologia para a confecção de placas dupla face.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos, cada qual abordando um tópico específico. Em seu Capítulo 2, será apresentado a fundamentação teórica, introduzindo alguns conceitos necessários para o entendimento deste estudo. O tópico abordado no Capítulo 3 exporá os métodos utilizados durante a realização dos experimentos. Em seguida, expor-se-á os experimentos realizados e os resultados obtidos destes. Por fim, em seu Capítulo 5, serão apresentadas as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentadas as definições de placas de circuito impresso, máquina CNC (*Computer Numeric Control* – Controle numérico computadorizado), ferramentas de projeto e manufatura assistidos por computador, também conhecidos por CAD (*Computer Aided Design* – Projeto assistido por computador) e CAM. Apresenta-se as máquinas CNC, apresentando o que são, sua importância e utilização. Em seguida serão apresentados as ferramentas de CAD e de CAM. Além disso, serão apresentadas tecnologias comuns utilizadas na indústria e as utilizadas neste trabalho.

2.1 Placas de circuito impresso (PCI)

Credita-se, na maior parte das publicações, a criação das placas de circuito impresso à Paul Eisler, que em 1936 patenteou o método de corrosão do cobre inserido em uma superfície isolante. Caracteriza-se como circuito impresso a criação de um padrão de conexões entre componentes elétricos sobre uma chapa revestida de cobre.

O primeiro substrato utilizado para a fabricação de PCIs foi o fenolite, substância composta por papel picado ou serragem de madeira e resina fenólica. Outro substrato utilizado é a fibra de vidro, composta por uma mistura de resina epóxi e uma manta de fibra de vidro. A placa de fenolite, devido a sua composição, apresenta a capacidade de absorção de água o que pode prejudicar o produto, já a placa de fibra de vidro apresenta imunidade à água e alto grau de dureza (MEHL, 2022).

O material utilizado para a condução elétrica é o Cobre. Isso se deve ao fato de este metal ter uma elevada capacidade de condução elétrica e a possibilidade de criação de folhas de baixa espessura. Uma PCI pode ter diversas camadas (faces) cobertas de cobre que formam o circuito impresso. A forma mais simples de uma PCI é com apenas uma camada de cobre, chamada de placa de face simples, outro modelo padrão de placas é aquela com duas camadas de cobre, uma em cada face da chapa de substrato, conhecida como placa dupla face. A criação de placas multicamadas, aquelas com 3 ou mais faces, é realizada pela manufatura de diversas placas que ao final são prensadas conjuntamente e conectadas por furos metalizados.

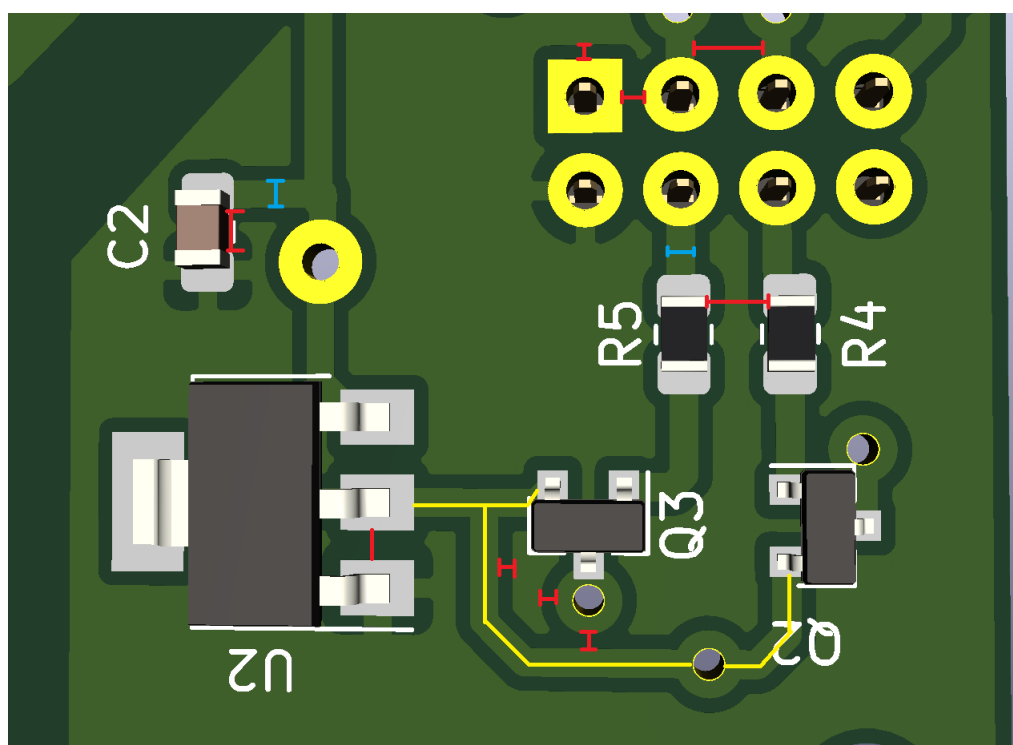
Por questão de conveniência, muitas vezes se utiliza do sistema imperial para a medição de alguns elementos das PCIs. Os principais parâmetros utilizados são a polegada e o mil, sendo o primeiro equivalente a 2,54 cm e o mil representa um milésimo de polegada, sendo assim 0,00254 cm.

Também deve-se observar alguns dos elementos das placas, são dois deles as trilhas e as ilhas. Trilhas são conexões entre elementos do circuito eletrônico que têm o mesmo potencial elétrico. Já as ilhas são áreas em que são soldados os terminais dos

componentes eletrônicos na placa, garantindo que haja contato entre o componente e a sua respectiva trilha.

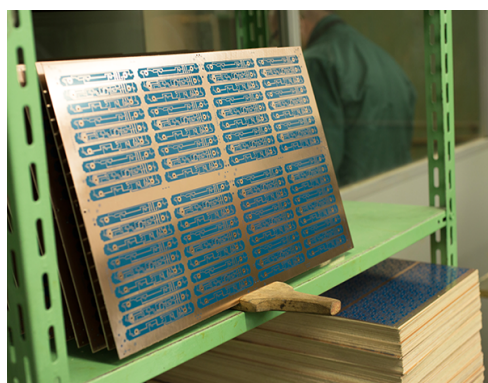
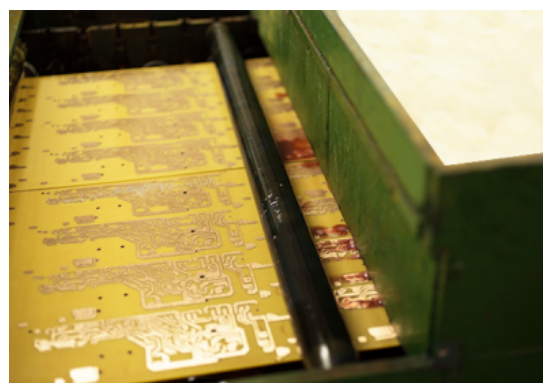
Duas das muitas regras que se deve observar no projeto de uma PCI é o *clearance* e a largura de trilha. O *clearance* é a menor distância de ar entre dois elementos condutores do circuito eletrônico. E a largura da trilha é definida pela potência que estará presente neste caminho. Na Figura 1 são destacados exemplos das regras supracitadas, sendo em vermelho o *clearance*, em azul a largura de trilha e em amarelo a trilha

Figura 1 – Elementos do circuito



Fonte: Autoria própria (2022)

A fabricação das placas de circuito impresso podem ser feitas de diversas formas, duas delas são a corrosão e a fresagem. O primeiro método, consiste em utilizar de percloreto de ferro para remover o cobre da superfície do substrato. Neste método, é feita a transferência do projeto criado na ferramenta CAD, seja por termotransferência, fototransferência ou outros métodos, para a superfície da placa, em seguida se imerge a placa em uma solução de percloreto de ferro, o qual irá realizar a corrosão de toda parte que tem o cobre exposto, assim realizando a transferência do circuito projetado para a placa. A Figura 2a representa a placa de cobre pronta para passar pelo processo de corrosão, já a Figura 2b apresenta a placa com o circuito já transferido.

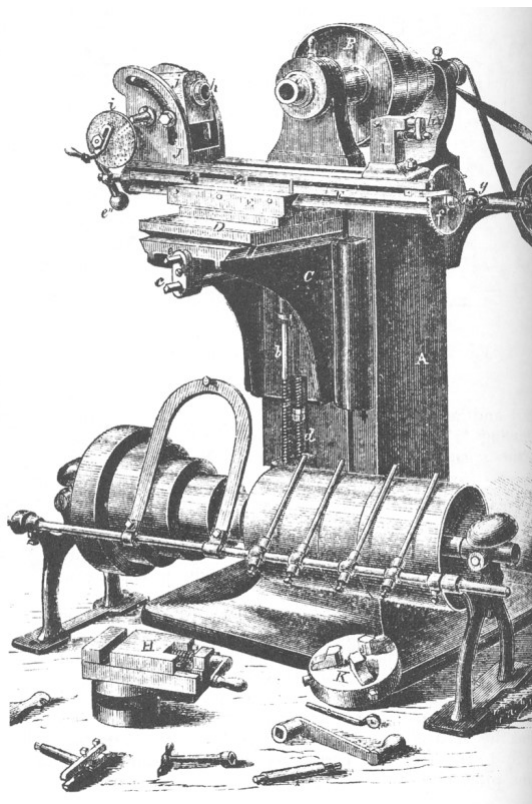
Figura 2 – Processo de corrosão**(a) Placa com desenho do circuito****(b) Placa de cobre pós-corrosão**

Fonte: Tec-ci (2022)

O método de fresagem consiste na utilização de uma máquina fresadora para realizar a retirada do cobre da superfície do substrato utilizando brocas. O processo de fresagem se resume em projetar a placa em uma ferramenta de projeto, leitura desses arquivos em uma ferramenta de manufatura e por fim o envio dos comando para a máquina fresadora, que realizará a retirada do cobre nos segmentos indicados.

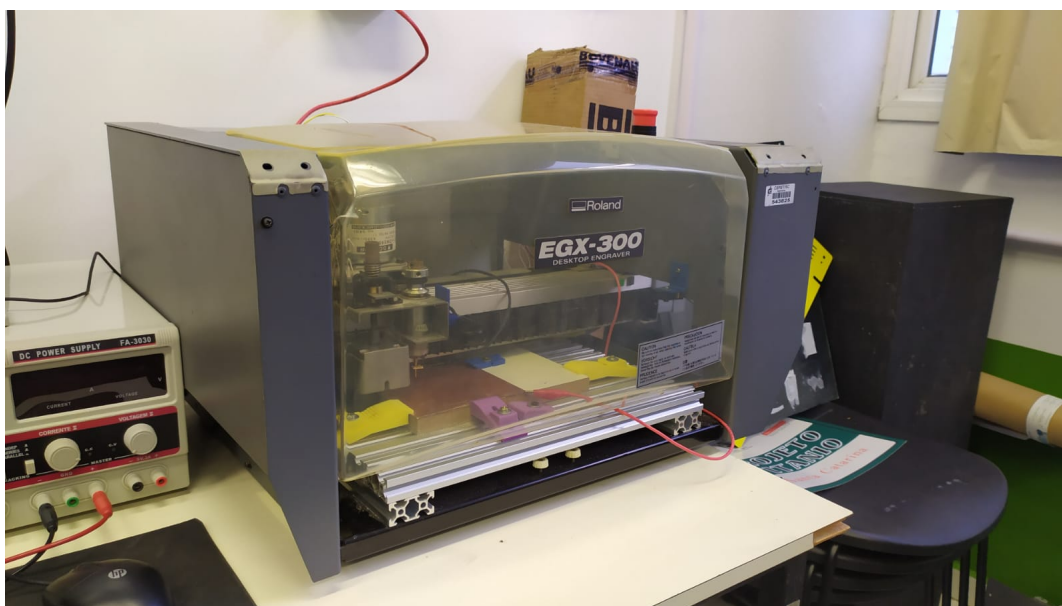
2.2 Máquina CNC

De acordo com Thyer (1991), Máquinas CNC consistem de dispositivos controlados por meio de instruções enviadas de maneira sequencial por um computador ou sistema de controle. As instruções são geradas por programas de computador, por meio de programas de CAD, ou gerados de maneira manual por profissionais especializados. O conceito de máquinas CNC surgiu em torno da década de 1950 por John T. Parsons como parte de um projeto para a Força aérea americana no MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). A primeira máquina CNC é a apresentada na Figura 3 e serviu para a criação de diversas hélices de helicópteros e fuselagens de aeronaves.

Figura 3 – Primeira máquina CNC

Fonte: Huang (2021)

A máquina CNC utilizada na realização deste trabalho foi a Roland EGX-300, apresentada na Figura 4. A máquina original conta com motor de até 15.000 rotações por minuto, área de corte de 30 cm em X, 23 cm em Y e aproximadamente 10 cm em Z. Foram realizadas modificações para a adição de fim de curso nos eixos X, Y e Z e para adição da função de auto nivelamento.

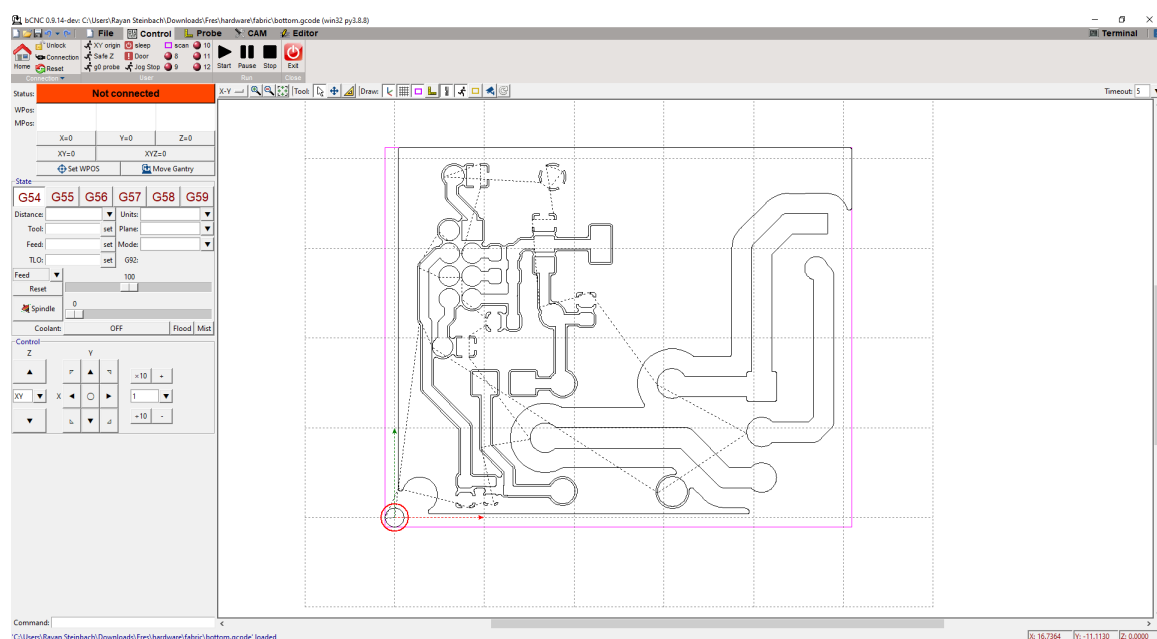
Figura 4 – Máquina CNC Roland EGX-300

Fonte: Autoria própria (2022).

O controle da máquina CNC é realizado por meio do firmware GRBL gravado em um Arduino Uno, uma placa embarcada que contém um microcontrolador permitindo a execução de programas gravados em sua memória. O GRBL é um *software* de código aberto desenvolvido na linguagem de programação C e otimizado utilizando diversas técnicas e recursos disponíveis nos *chips* microcontroladores ATmega. É compatível com todos os comandos de *g-code* padrões e o controlador da ferramenta analisa os próximos 16 passos para realizar o controle das velocidades que realizará os movimentos (GRBL, 2017).

Para o envio dos comando ao GRBL, é necessário uma ferramenta que faça o envio dos *g-code* de forma sequencial. Uma delas é o bCNC, de acordo com seu criador Vlachoudis (2017), um *software* de código aberto desenvolvido na linguagem de programação Python que permite a conexão com o *software* de controle da CNC e envio de comandos para para o mesmo. Essa ferramenta permite a visualização do arquivo lido, assim como permite o nivelamento automático da ferramenta de corte, visualização e alinhamento pela utilização de uma câmera conectada ao computador, além de outras funcionalidades úteis. Na Figura 5 é apresentada a interface do bCNC.

Figura 5 – Interface do bCNC



Fonte: Autoria própria (2022).

2.3 Ferramentas de projeto assistido por computador (CAD)

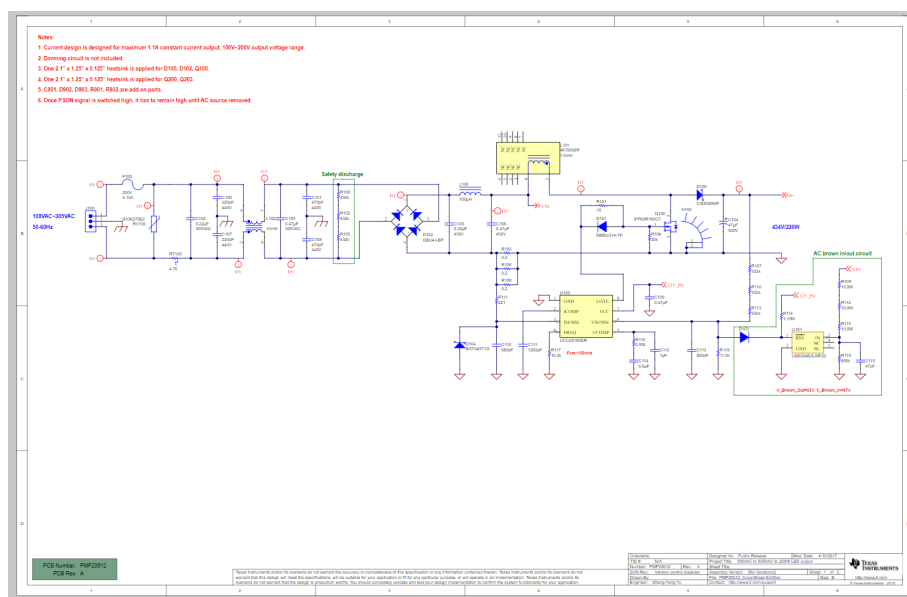
De acordo com Tornincasa *et al.* (2010), as ferramentas de CAD consistem na utilização de *softwares* para auxiliar em diversos campos do desenvolvimento de tecnologias, estruturas entre outros objetos. Surgiu em meados de 1960 com o lançamento de um sistema de CAD da IBM, uma empresa estadunidense de informática, o qual permitia que a utilização de computadores para a criação de rascunhos de produtos e a geração automática da lista de materiais dos componentes e estruturas mecânicas que compõem o projeto. Com o passar do tempo, se tornou possível realizar cálculos de engenharia nesses sistemas, facilitando o trabalho de muitos engenheiros e tornando suas soluções mais rápidas e robustas. Nos dias atuais, a tecnologia varia, permitindo tanto a criação de projetos em duas dimensões, quanto a criação de peças e modelos de três dimensões, assim como a rotação e visualização dos modelos em tempo real.

Para o campo da eletrônica, o CAD permite realizar todos processos para o projeto de uma PCI, como o desenvolvimento e simulação do comportamento do circuito e o projeto e visualização tridimensional da placa desenvolvida. Além disso, é possível também adicionar aproximações e características particulares para os elementos utilizados, permitindo que as simulações funcionais sejam mais fidedignas ao comportamento físico. Levando isso em consideração, é possível reduzir horas, até mesmo semanas, de esforço de projeto, devido à execução de cálculos complexos de maneira automática. Outros fatores benéficos dessas ferramentas são o ganho em confiabilidade, visto que uma ferramenta automatizada está menos propensa a

erros, e a possibilidade de realização de projetos mais complexos e robustos, dada a facilidade de execução proporcionada por tais *softwares*. No decorrer desta seção serão apresentadas algumas ferramentas de CAD utilizadas na eletrônica.

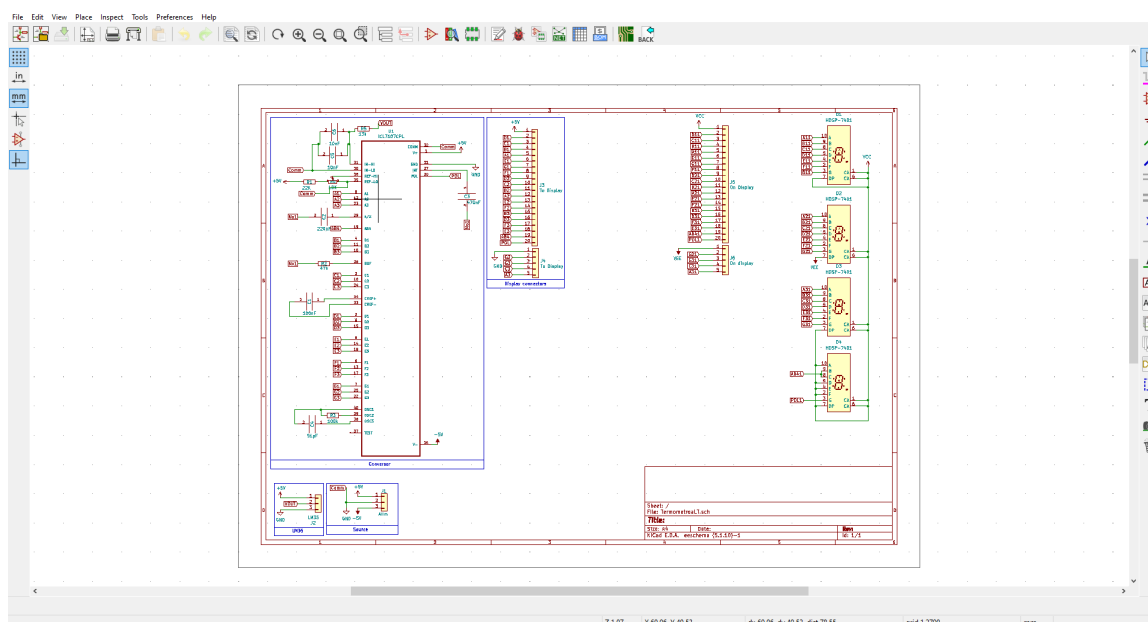
Algumas ferramentas que são utilizadas comumente no IFSC para o desenvolvimento de *layout* de PCI são o Altium Designer, KiCAD e Proteus. O Altium Designer é uma ferramenta comercial bastante robusta de CAD que permite a elaboração do desenho da placa. Foi lançado em 2005 e desde então vem apresentando novas versões com novas funcionalidades nelas. Esse *software* permite a elaboração de um diagrama esquemático do circuito, onde são inseridos os componentes e suas características físicas. É possível, com a utilização do esquemático, a elaboração da PCI, posicionando os componentes, roteando as trilhas, entre outros procedimentos. A interface PCB, abreviação de *Printed Circuit Board*, também conta com uma ferramenta de checagem das regras de montagem e posicionamento das trilhas e também da visualização 3D da placa. Nas Figuras 6 até 8 estão apresentados exemplos da interface do Altium Designer.

Figura 6 – Diagrama esquemático desenvolvido no Altium



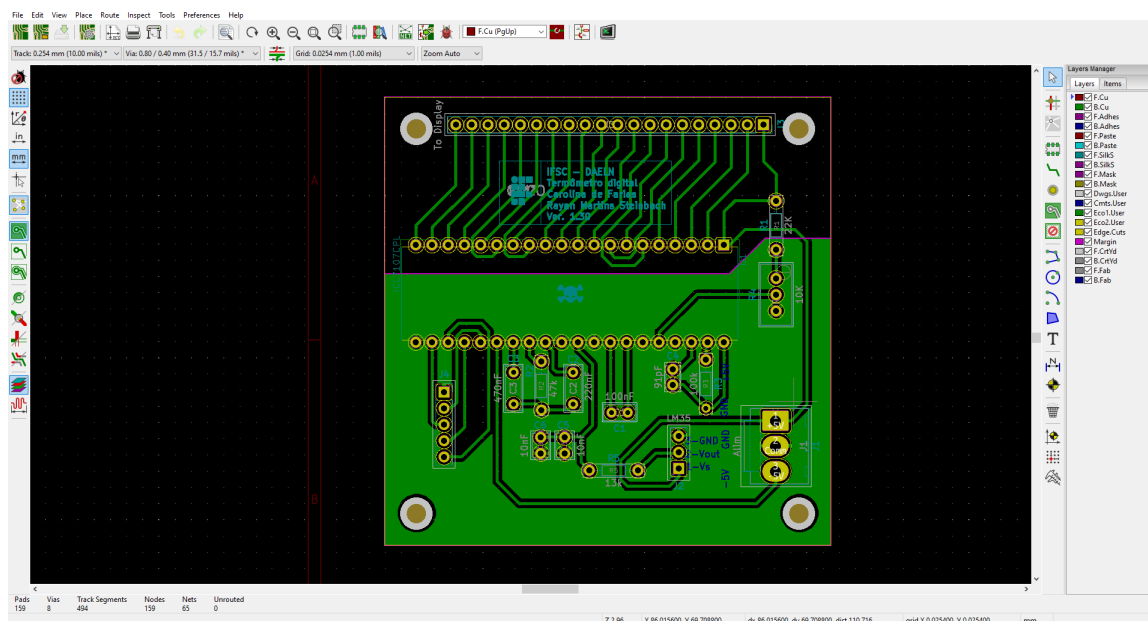
Fonte: Altium (2017).

Figura 9 – Diagrama esquemático desenvolvido no KiCAD



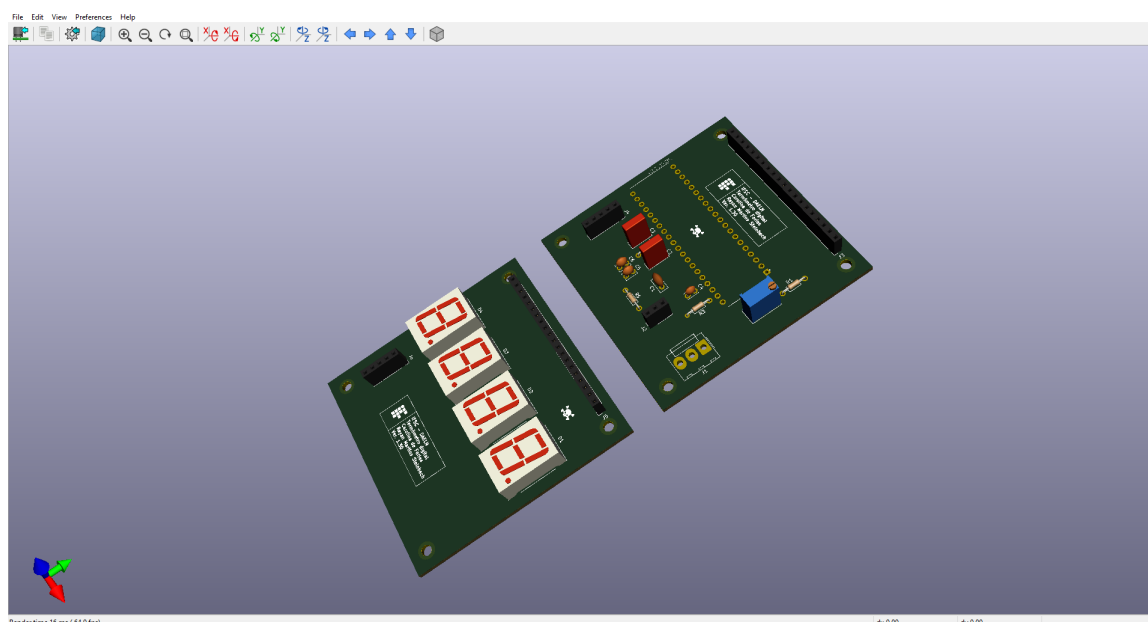
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 10 – Layout de PCI desenvolvido no KiCAD



Fonte: Autoria própria (2022).

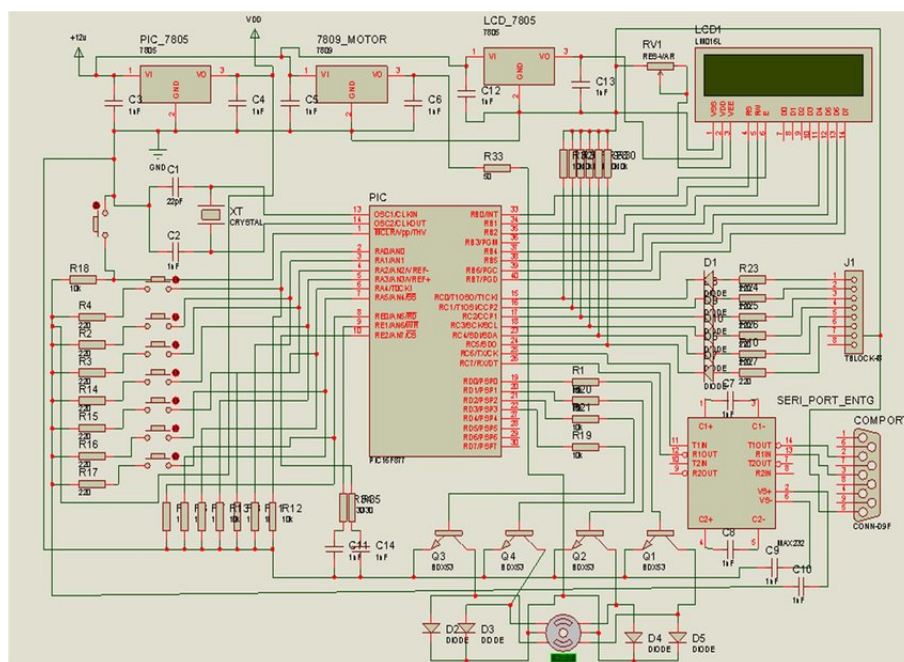
Figura 11 – Visualização 3D de uma PCI no KiCAD



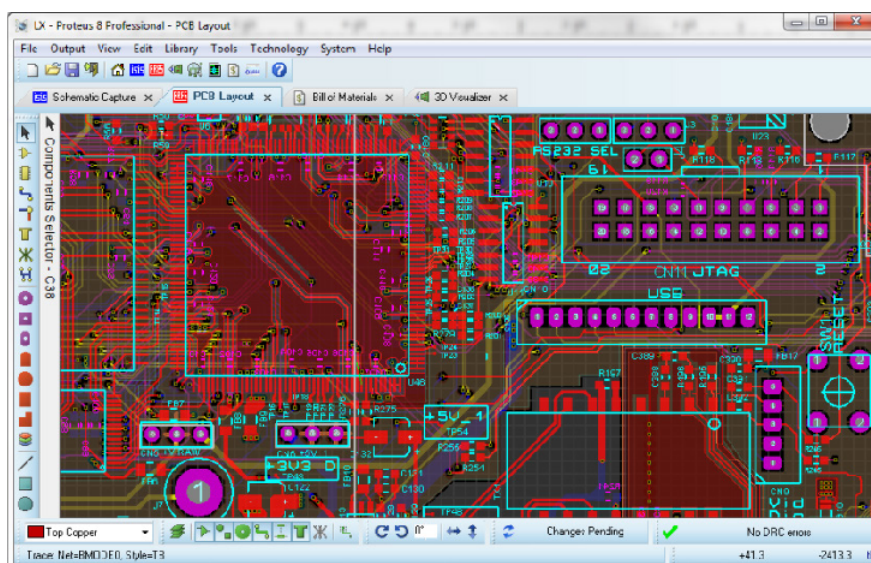
Fonte: Autoria própria (2022).

O Proteus é uma ferramenta comercial da LabCenter lançado em 1988. Esse *software* permite a simulação do funcionamento de circuitos eletrônicos considerando correntes, tensões, potência, além de entre outras grandezas. Também existem funcionalidades de geração de formas de ondas, osciloscópio digital, etc. O Proteus também permite a elaboração de aplicações IoT (*Internet of Things*) e a confecção de PCs.

Figura 12 – Circuito desenvolvido no Proteus



Fonte: Irmak *et al.* (2012)

Figura 13 – Layout de uma PCI desenvolvida no Proteus

Fonte: LabCenter (2022)

2.4 Ferramentas de manufatura assistida por computador (CAM)

Os *softwares* CAM (*Computer Aided Manufacture*) começaram a surgir no início da década de 1950 devido à utilização de máquinas de controle numérico (CNC). As ferramentas de CAM são muito utilizadas para a fabricação de produtos a partir de um material bruto. Com a utilização dessas ferramentas o trabalho de manufatura de uma peça se torna mais dinâmico e preciso. Uma vez que os comandos enviados pelo controlador à máquina serão executados sempre da maneira mais fiel possível, evitando o desperdício de recursos e melhor qualidade das peças.

Para a fabricação de PCIs, as ferramentas CAM recebem arquivos dos padrões *gerber* e *excellon*. O formato *gerber* é um conjunto de vetores bidimensionais que descrevem em código ASCII cada camada da PCI que foi produzida na ferramenta CAD e devido a este fato, é possível fazer a leitura em qualquer editor de texto. Ao interpretar estes arquivos, é gerado o *g-code*, que indica comandos que a máquina CNC deverá realizar. Um exemplo é apresentado no Código 2.1. De acordo com Champlaine e Woodcock (2015), os trechos iniciados com M representam comandos para a máquina, os comandos iniciados por G representam um tipo de movimento, os comando com X, Y e Z representam coordenadas e aqueles precedidos por F representam o *feed rate*, que é a velocidade de movimento da ferramenta da CNC. Já o formato *excellon* é um conjunto de coordenadas que representam o posicionamento dos furos da placa desenvolvida.

Código 2.1 – Exemplo de G-Code

```
1 (This preprocessor is the default preprocessor used by FlatCAM.)
2 (It is made to work with MACH3 compatible motion controllers.)
3
```

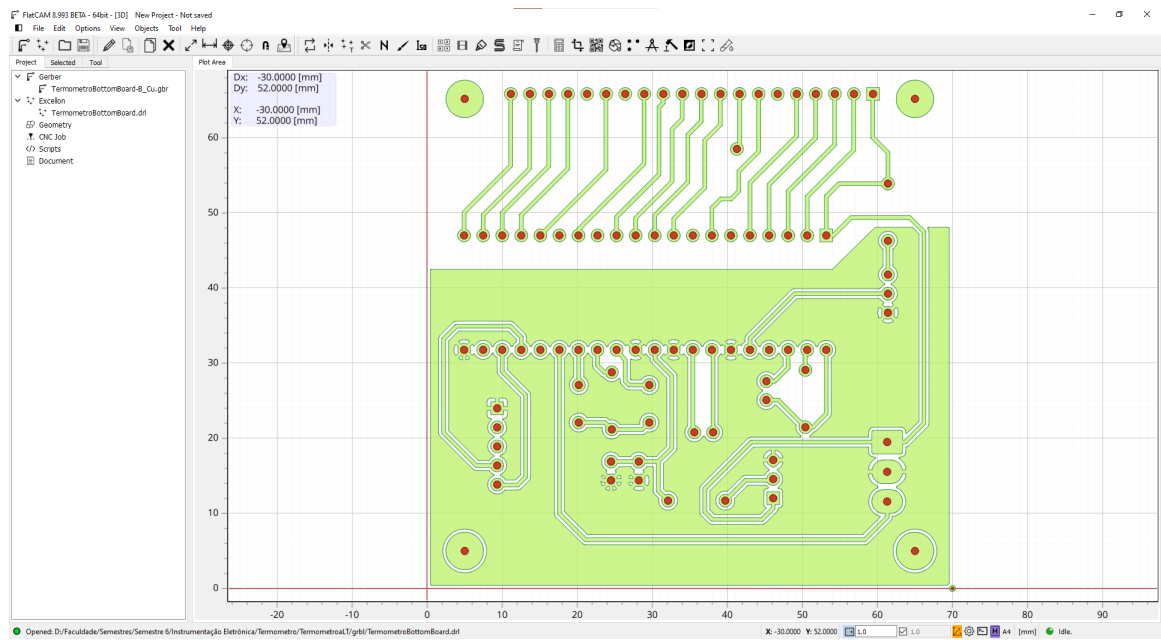
```
4 (TOOL DIAMETER: 0.2 mm)
5 (Feedrate_XY: 120.0 mm/min)
6 (Feedrate_Z: 60.0 mm/min)
7 (Feedrate rapids 1500.0 mm/min)
8 (Z_Cut: -0.05 mm)
9 (Z_Move: 2.0 mm)
10 (Z_Start: None mm)
11 (Z_End: 15.0 mm)
12 (Steps per circle: 64)
13 (Preprocessor Geometry: default)
14 (X range: 17.1000 ... 49.9000 mm)
15 (Y range: 0.1000 ... 40.9000 mm)
16 (Spindle Speed: None RPM)
17 G21
18 G90
19 G94
20 G01 F120.00
21 G00 Z2.0000
22 M03
23 G00 X17.1000 Y0.3059
24 G01 F60.00
25 G01 Z-0.0500
26 G01 F120.00
27 G01 X17.1000 Y0.1000
28 G01 X17.1000 Y0.3059
29 G01 X18.5380 Y0.3059
30 G01 X18.5629 Y0.3073
31 G01 X18.5822 Y0.3103
32 G01 X18.6047 Y0.3160
33 G01 X18.6251 Y0.3233
34 G01 X18.6411 Y0.3308
35 G01 X18.6480 Y0.3344
36 G01 X18.6605 Y0.3419
37 G01 X18.6687 Y0.3474
38 G01 X18.6841 Y0.3593
39 G01 X18.7001 Y0.3741
40 G01 X18.7135 Y0.3889
41 G01 X18.7262 Y0.4061
42 G01 X18.7376 Y0.4248
43 G01 X18.7463 Y0.4428
44 G01 X18.7500 Y0.4519
45 G01 X18.7565 Y0.4714
46 G01 X18.7609 Y0.4901
```

Fonte: Autoria própria (2022).

Algumas das ferramentas que permitem a leitura dos arquivos gerber e excellon para fabricação de PCI são o FlatCAM e CircuitCAM. O flatCAM, de acordo com Caram (2020), é um *software* de código aberto escrito em *Python* que permite realizar diversos processos com os arquivos lidos, como criar roteamento de isolamento, retirar áreas de cobre, criar placas dupla-face e criar painéis gerando arquivos gcode para a máquina CNC.

Já o CircuitCAM é uma ferramenta da empresa DCT e requer licença para sua utilização. Neste *software*, é possível criar a isolamento das trilhas, remoção do cobre, além de possibilitar a escolha do caminho que a máquina CNC utilizará. (DCT, 2020),

Figura 14 – interface do FlatCAM



Fonte: Autoria própria (2022).

2.5 Ferramentas utilizadas

Para a execução deste trabalho, foi feita a seleção de algumas ferramentas, as quais estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ferramentas utilizadas

Ferramenta	Versão	Tipo	Fonte
KiCAD	5.1.10	CAD	https://www.kicad.org/
FlatCAM	8.993	CAM	http://flatcam.org/
GRBL	1.1	Controlador	https://github.com/grbl/grbl
bCNC	0.9.14	Sender	https://github.com/vlachoudis/bCNC

Fonte: Autoria própria (2022).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como finalidade a realização do estudo da utilização de máquinas CNC para a prototipagem de placas de circuito impresso de maneira a garantir a confiabilidade, a agilidade e qualidade da confecção destas. Para isto realizou-se um estudo das métricas que devem ser utilizadas nas ferramentas de projeto e manufatura de PCIs com a intenção de estabelecer os padrões necessários para isso. Portanto, fez-se uma análise sobre o que é pesquisa e como este trabalho nela se encaixa.

Segundo Gil (2002), pesquisa é um processo racional e sistemático que proporciona respostas aos problemas em questão por meio da utilização de conhecimentos já existentes e procedimentos científicos. Com isso, é possível classificar essa pesquisa como experimental com fim de levantar um padrão de parâmetros para manipulação da ferramenta disponível.

3.1 Métodos Aplicados

Na primeira parte do desenvolvimento deste trabalho, estudou-se parâmetros para as regras de desenvolvimento das PCIs no *software* CAD, definindo valores ideais de *clearance* e a largura de trilha. As trilhas não podem ser muito finas, o que impediria a passagem de corrente elétrica, e o *clearance* não pode ser muito grande para que não fiquem filamentos de cobre entre os elementos do circuito.

Seguindo neste ponto, a segunda parte visou encontrar padrões nas ferramentas para melhor confecção da PCI nos *softwares* CAM. Buscou-se encontrar parâmetros padrões de velocidade da broca e de deslocamento da ferramenta para melhor remoção do cobre e corte da placa.

Para analisar os resultados obtidos, utilizou-se paquímetros e escalas para analisar o quão próximas do projetado as trilhas da PCI foram usinadas. Além disso, foi realizada uma análise visual para detectar se todo o cobre entre os elementos do circuito foi removido como deveria, servindo tanto para análise do *clearance* quanto para análise de profundidade de corte.

Em seguida, estudou-se os *softwares* para que se realizasse o alinhamento por câmera. Utilizando o bCNC e uma *webcam* USB conectada ao computador, é possível realizar o realinhamento da ferramenta quando é necessário movimentar a PCI em produção, como a confecção de placas dupla face e caso aconteça algum erro durante a confecção da placa.

Outro estudo feito, foi a obtenção de conhecimento do *software* CAM para remoção do cobre em determinadas áreas da placa. Com o intuito de realizar a total remoção onde não deveria haver malha de terra, ou área de cobre morto, área sem

ligação ao restante da malha de referência.

A seguir, estudou-se a confecção de placas dupla face. Para esse estudo, foi necessário unir conhecimentos sobre a utilização da ferramenta CAM, o alinhamento por câmera e alguns métodos de orientação dos vetores presentes no arquivo, com o fim de obter o melhor alinhamento possível entre as faces. Para avaliar os resultados obtidos, realizou-se em cada face os mesmos procedimentos realizados na fabricação de placas de face única e para observar o alinhamento, utilizou-se de análise visual do posicionamento dos elementos das faces.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

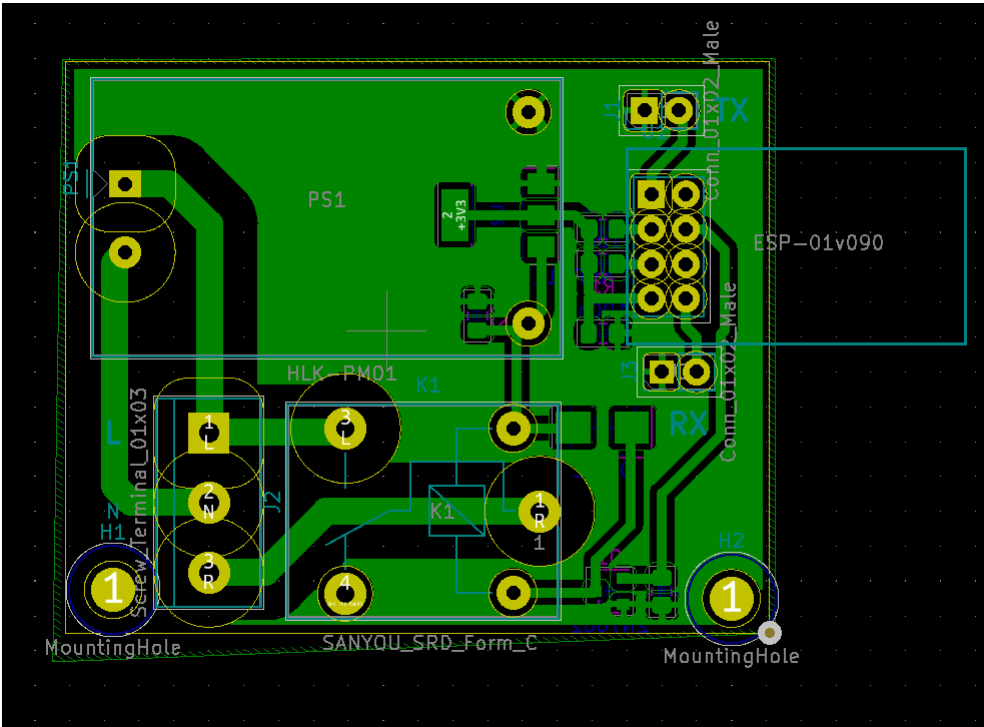
Neste capítulo serão apresentados os procedimentos realizados e os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente será mostrado como foi realizado o estudo para obtenção de parâmetros de *software* CAD e CAM além dos resultados obtidos durante o procedimento. Também será apresentado o método utilizado para desenvolvimento de PCI dupla face no FlatCAM e utilizando a câmera e a ferramenta *orient* do bCNC.

4.1 Regras de *Design* de PCI nas ferramentas de CAD e CAM

A ferramenta de remoção de cobre morto do FlatCAM apresenta três modos de operação, *Straight lines*, *Standard*, *Seed*. O primeiro consiste em realizar toda a remoção utilizando linhas retas. O método *Standard* realiza a remoção utilizando o mesmo contorno dos elementos que estão ao redor da área em questão. Por fim, o método *Seed* utiliza padrões circulares para realizar a remoção do cobre.

Para realizar os estudos sobre as regras nos *softwares* CAD e CAM, utilizou-se o projeto da placa apresentada na Figura 15 e como ferramenta o KiCAD. Para os testes iniciais, utilizou-se como parâmetros da placa, 30 mils (0,762 milímetros) como largura mínima para as trilhas e 20 mils (0,508 milímetros) de *clearance*. Gerados os arquivos gerber no KiCAD, foi utilizado o FlatCAM para gerar os códigos G necessários para a manufatura da PCI. Os parâmetros utilizados para a manufatura da placa estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, para fazer o furos, utilizou-se o *Cut Z*, parâmetro que define a distância percorrida pela broca no eixo Z, como -2,2 mm e para a remoção das áreas sem cobre utilizou-se *Feed rate*, que é a velocidade de movimento da ferramenta, de 100 mm/min, com a mesma ferramenta de isolamento e modo *Straight lines*.

Figura 15 – Projeto de placa no KiCAD



Fonte:Autoria própria (2022).

Tabela 2 – Parâmetros Isolação

Parâmetro	Valor
Cut Z	-0,1 mm
Travel Z	2.0 mm
Feed Rate	100 mm/min
Tool dia	0.1 mm

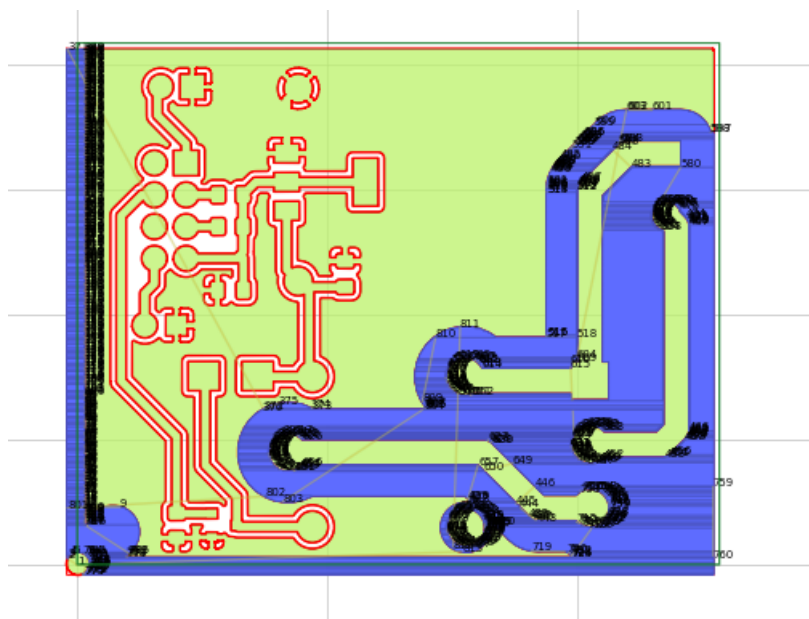
Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 3 – Parâmetros de corte final

Parâmetro	Valor
Cut Z	-2.0 mm
Travel Z	2.0 mm
Feed Rate	100 mm/min
Multi-depth	0.1 mm

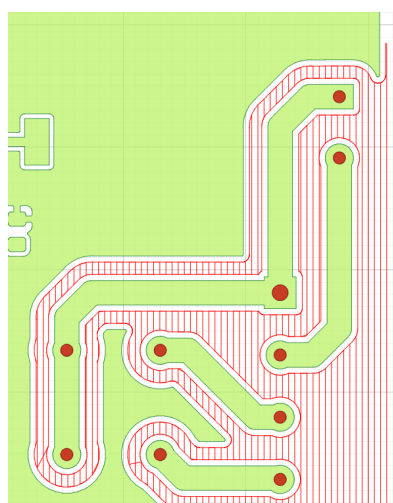
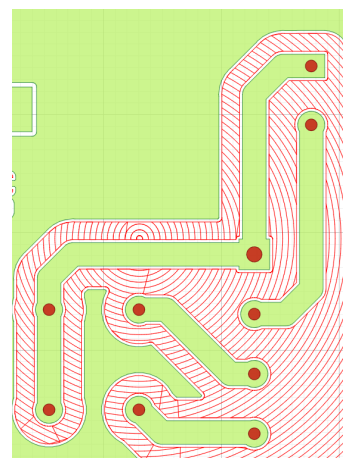
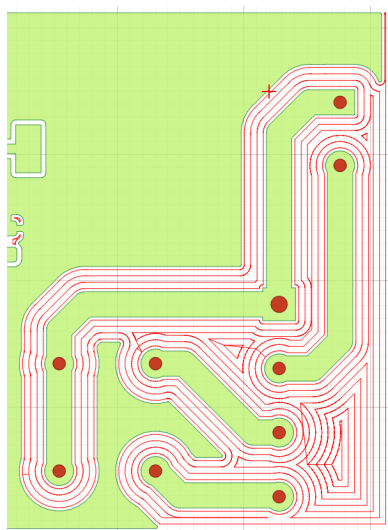
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 16 – Projeto de placa no FlatCAM



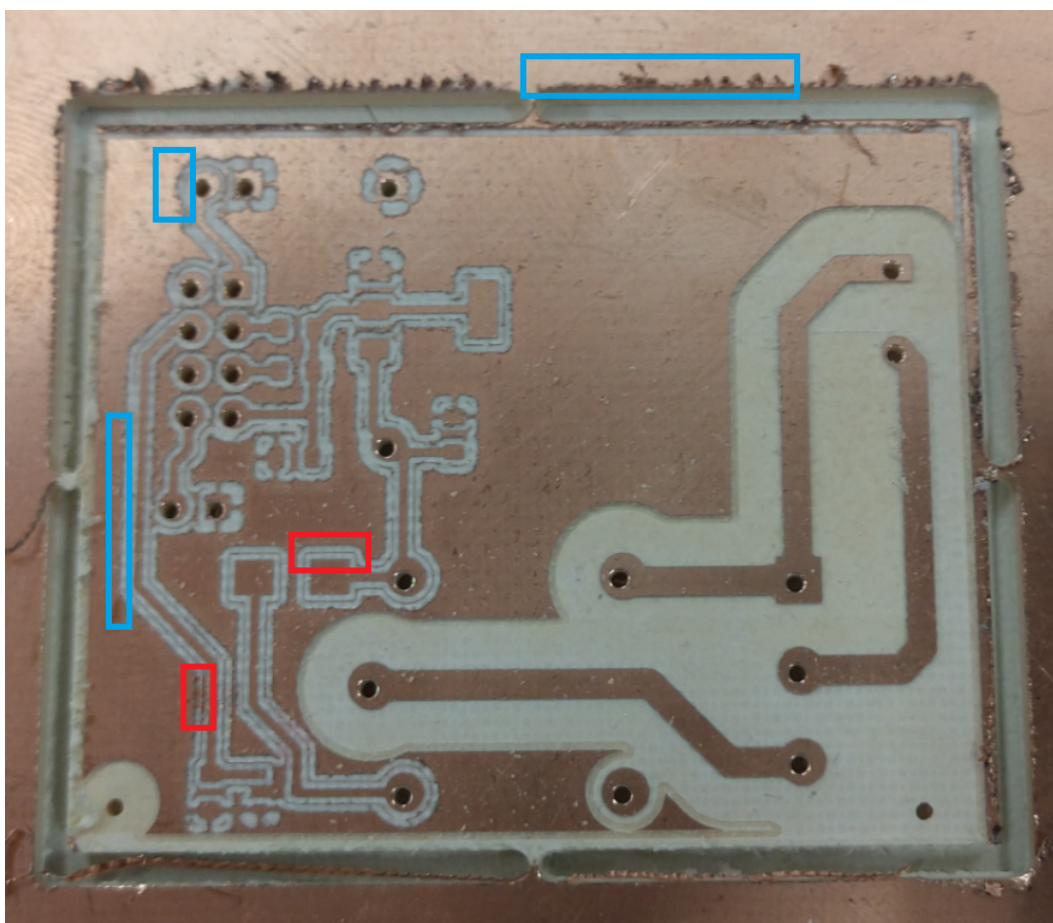
Fonte: Autoria própria (2021).

A ferramenta de remoção de cobre morto do FlatCAM apresenta três modos de operação, *Straight lines*, *Standard*, *Seed*. O primeiro, apresentado na Figura 17a, consiste em realizar toda a remoção utilizando linhas retas. O método *Standard*, Figura 17c, realiza a remoção utilizando o mesmo contorno dos elementos que estão ao redor da área em questão. Por fim, o método *Seed*, Figura 17b, utiliza padrões circulares para realizar a remoção do cobre.

Figura 17 – Modos de remoção de cobre do FlatCAM**(a) Modo *Straight lines*****(b) Modo *Seed*****(c) Modo *Standard***

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18 – Placa manufaturada

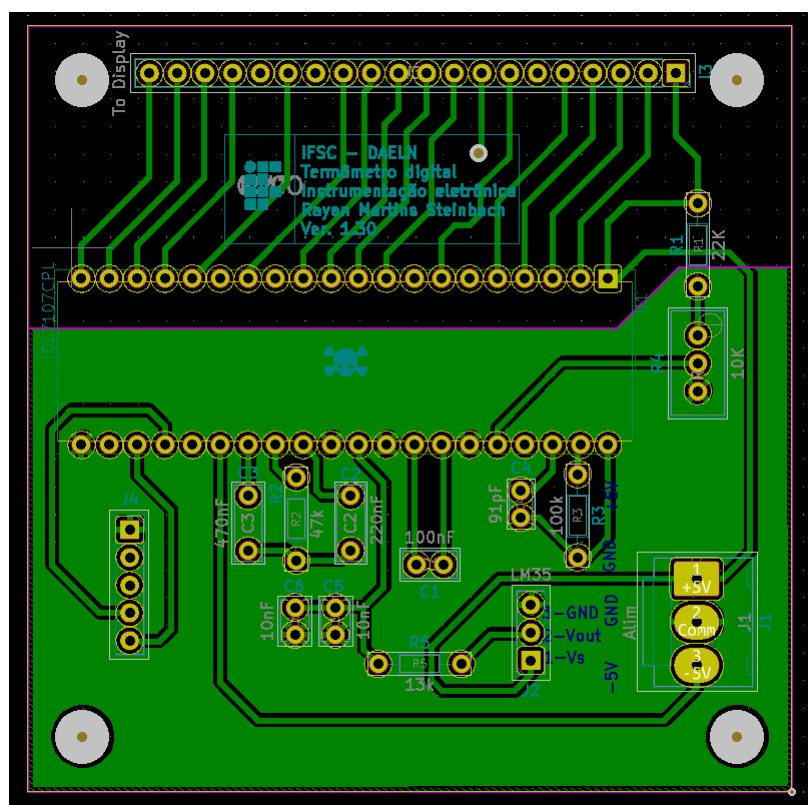


Fonte: Autoria própria (2021).

Conforme apresentado na Figura 18, é possível que se observe que restaram filamentos de cobre, exemplificados nos destaques em vermelho na Figura 18, entre as trilhas, indicando que 20 mils é um valor mais alto que o indicado para diâmetro de ferramenta utilizado. Também é possível observar, é que as trilhas apresentaram a largura projetada, não havendo falta de cobre ou áreas demasiadamente finas que prejudicariam o funcionamento do circuito, assim como os furos, que foram completamente perfurados na placa. Outro ponto que deixou a desejar foi o excesso de rebarbas, visíveis nos detalhes em azul na Figura 18, indicando que o *feedrate* determinado estava menor que o necessário, visto que a baixa velocidade de movimento da ferramenta de isolamento não gera atrito o suficiente para remover completamente o cobre.

Em uma outra PCI, apresentada na Figura 19, utilizou-se a espessura de 10 mils (0,254 milímetros) para as trilhas e 16 mils (0,404 milímetros) para o valor de *clearance*. Na ferramenta CAM, utilizou-se os valores apresentados nas Tabela 4. Para os furos, utilizou-se dos mesmos parâmetros da PCI fabricada na etapa anterior, já para a área sem cobre utilizou-se o *feed rate* de 150 mm/minuto, com a mesma ferramenta de isolamento e modo *Straight lines*, visto que estes se mostraram eficazes no passo anterior.

Figura 19 – Placa de termômetro desenvolvida no KiCAD



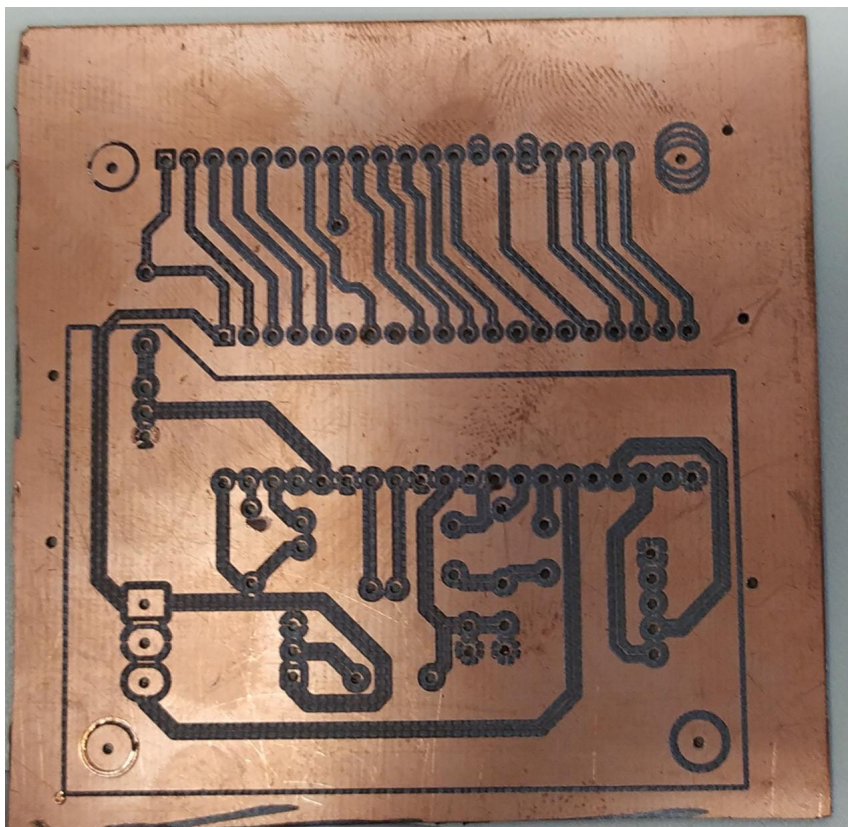
Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 4 – Parâmetros Isolação

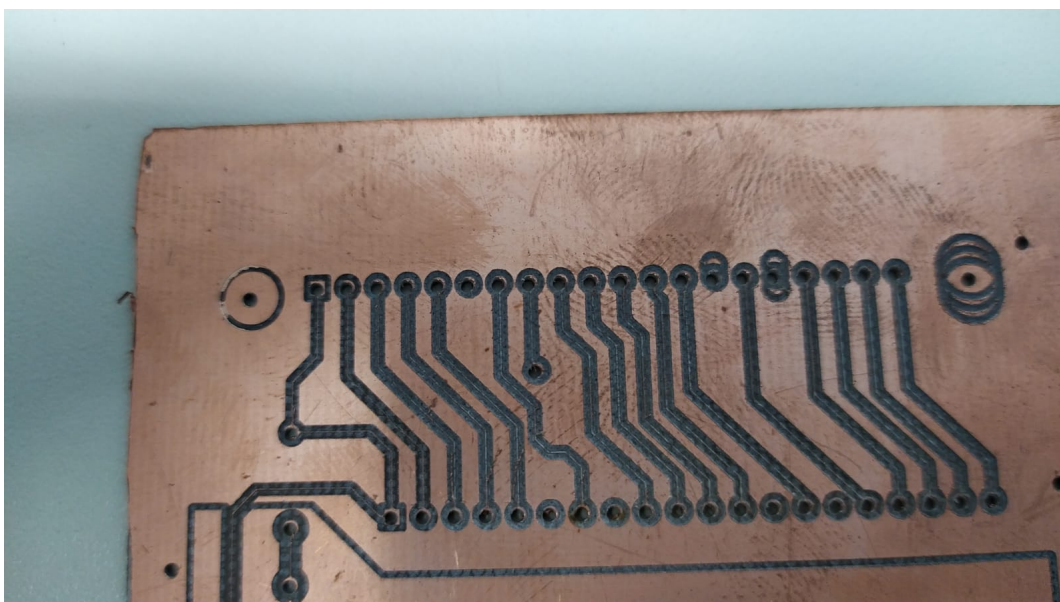
Parâmetro	Valor
<i>Cut Z</i>	-0,1 mm
<i>Travel Z</i>	2,0 mm
<i>Feed Rate</i>	150 mm/min
<i>Tool dia</i>	0,1 mm

Fonte: Autoria própria (2022).

A PCI usinada está apresentada na Figura 20. O *clearance* se mostrou suficiente para que o cobre entre a borda e a malha de terra seja totalmente removido, contudo as trilhas foram quase totalmente removidas no processo, como pode ser visto na Figura 21, visto que durante a usinagem uma parte da trilha é inevitavelmente perdida, assim resultando em uma grande perda comparada ao tamanho original. Essa perda se dá pelo fato de a ferramenta passar muito próxima da trilha ou da malha de terra, assim, se tornou necessário realizar um aumento do diâmetro da ferramenta.

Figura 20 – Placa manufaturada

Fonte: Autoria própria (2021).

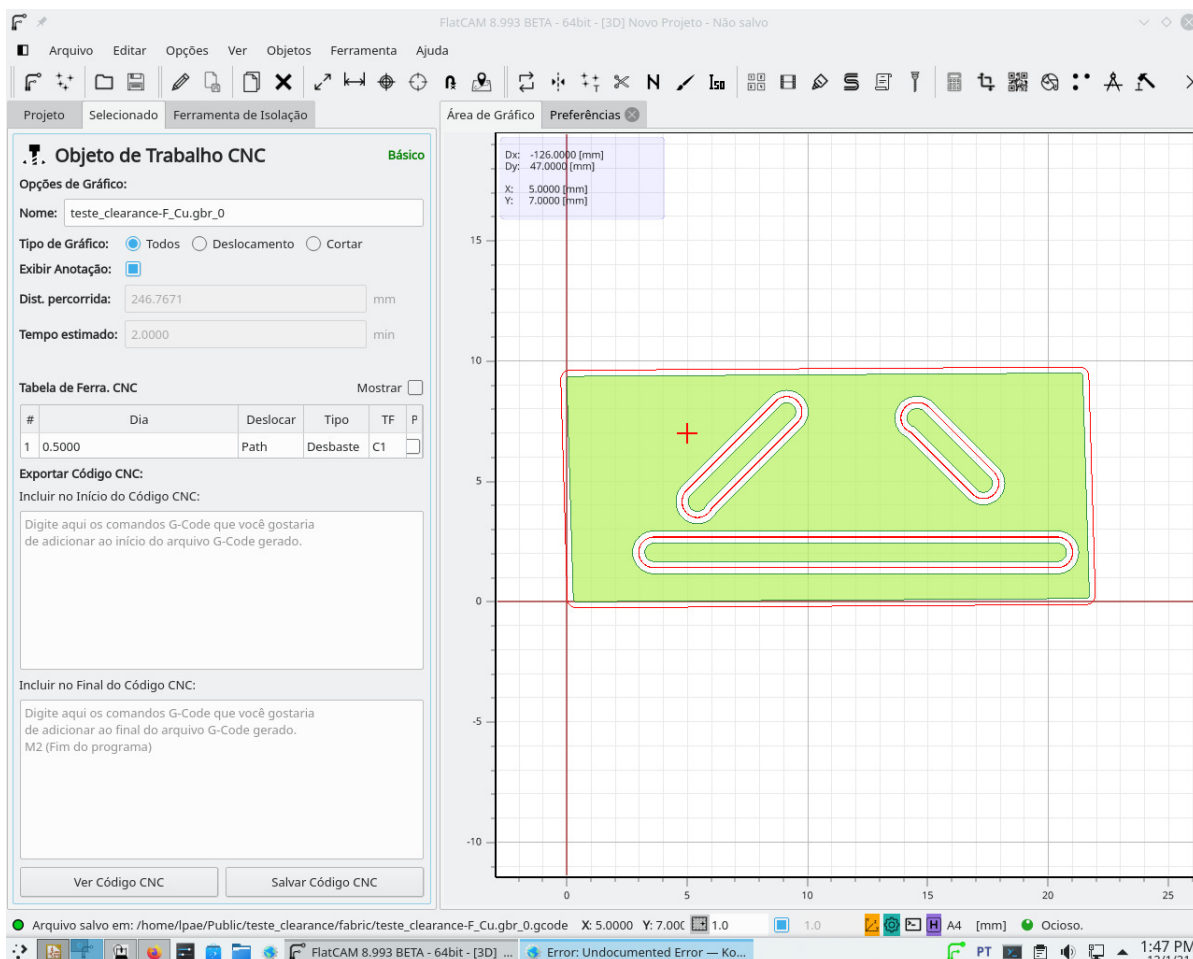
Figura 21 – Detalhe da placa manufaturada

Fonte: Autoria própria (2021).

Outro teste realizado foi a criação de duas placas idênticas com trilhas de teste para visualizar o impacto das perdas de acordo com os parâmetros de ferramenta utilizado na isolação. Foi feita a PCI apresentada na Figura 22, utilizou-se 20 mils (0,508

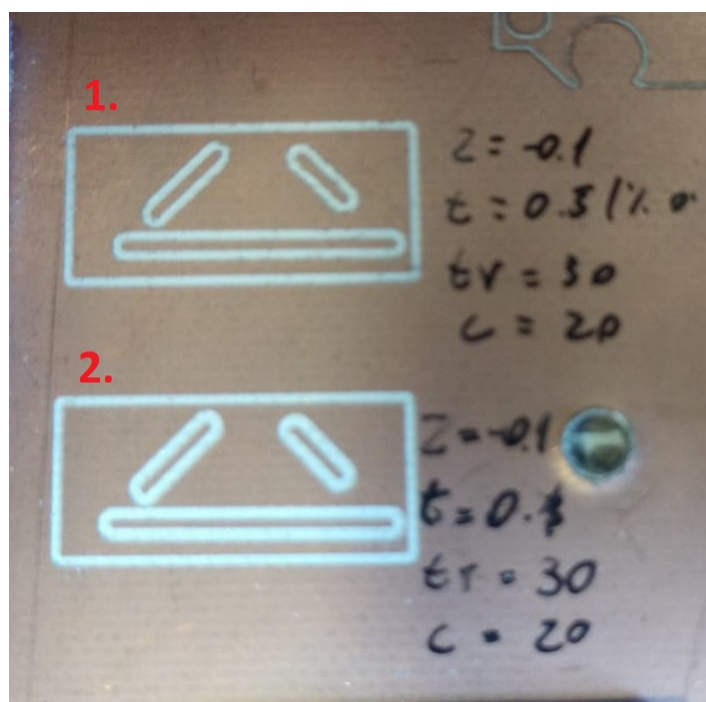
milímetros) de *clearance* e 30 mils (0,762 milímetros) para a largura das trilhas como parâmetros no KiCAD.

Figura 22 – Placa de teste Apresentada no FlatCAM



Fonte: Autoria própria (2021).

Na Figura 23 é apresentada a PCI manufaturada, onde a placa 1 foi feita com uma configuração de ferramenta de 0,5 milímetros no FlatCAM e a placa 2 utilizou-se 0,3 milímetros. Comparando-as, é possível que se perceba a diferença na espessura das trilhas, visto que na placa 1 a ferramenta passa apenas uma vez no caminho da trilha, já na placa 2 a ferramenta passa duas vezes, uma próxima à trilha e outra próxima à malha de terra, causando uma perda considerável de largura de trilha.

Figura 23 – Placas de teste manufaturadas. PCI 1 - Placa superior, PCI 2 - Placa Inferior

Fonte: Autoria própria (2021).

Utilizando destes testes, decidiu-se por utilizar os parâmetros presentes nas Tabelas 5 e 6 com o fim de otimizar a área de cobre e melhor qualidade das PCIs manufaturadas. Outro ponto que se percebeu durante os testes, foi a necessidade de ser realizado um aumento no diâmetro das ilhas dos componentes, para que algumas dessas ilhas não fiquem com uma área de cobre muito fina, causando uma má qualidade quando se solda os componentes. Além disso, foi percebido que o método *Straight lines* gera blocos muito complexos e granulares dependendo da geometria da área sem cobre, assim testou-se o método *Seed*, o qual se mostrou mais eficaz e rápido que o método anterior.

Tabela 5 – Parâmetros de *Design CAD*

Parâmetro	Valor
<i>Clearance</i>	15 mils (0,381 mm)
Largura de trilha	30 mils (0,762 mm)
Diâmetro da ilha	90 mils (2,3 mm)

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 6 – Parâmetros de *Design CAM*

Parâmetro	Valor
<i>Cut Z</i>	-0,1 mm
<i>Travel Z</i>	2,0 mm
<i>Feedrate</i>	150 mm/min
Método NCC	Seed
Diâmetro da ferramenta	0,5 mm

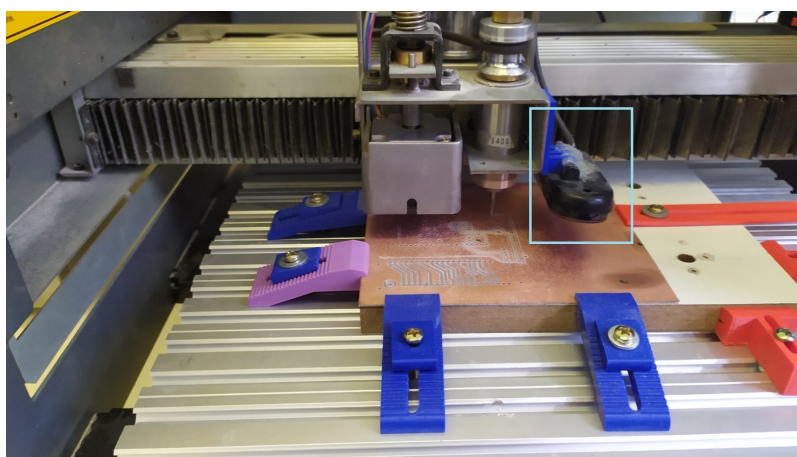
Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 Fabricação de PCI dupla face

Para que se faça a fabricação de placas dupla face, é necessário que sejam realizadas algumas etapas de configuração do bCNC, além de utilização de alguns recursos do FlatCAM, esses processos serão descritos nos subtópicos a seguir.

4.2.1 Alinhamento por Câmera no bCNC

O alinhamento por câmera é uma maneira que visa facilitar alguns processos de manufatura de PCIs. Por exemplo, para a fabricação de uma placa dupla face sem câmera, é necessário fazer furos de alinhamento, os quais servem como pontos de fixação da PCI para que a referência da placa não seja perdida. Com o alinhamento por câmera, é possível realizar a fabricação de uma PCI sem a utilização desses pontos para fixação, utilizando apenas a ferramenta bCNC. Para isso, foi feita a fixação da câmera, destacada em azul na Figura 24, no eixo da broca da fresa CNC.

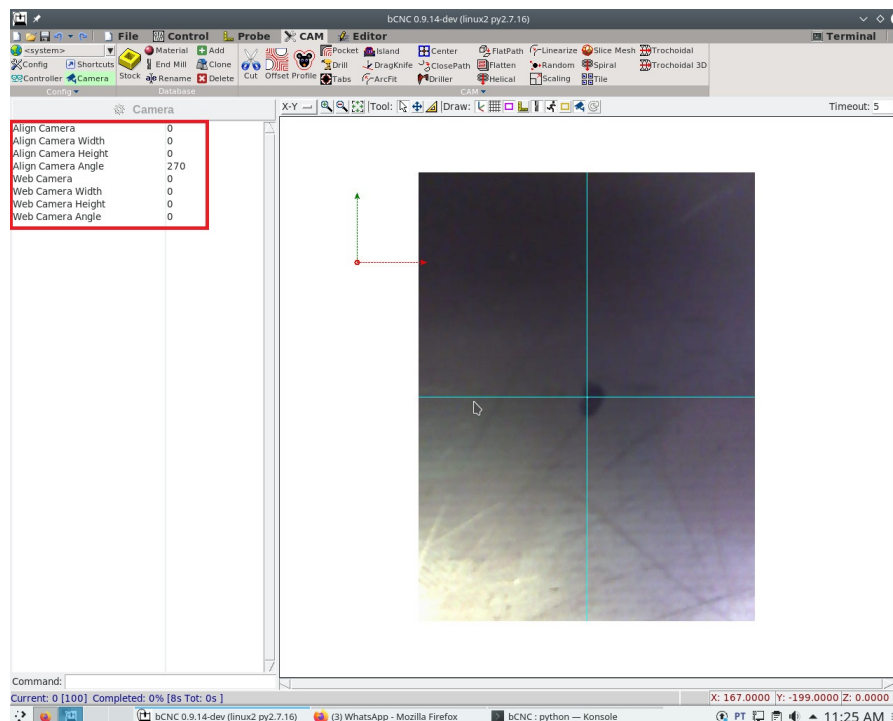
Figura 24 – Máquina CNC com câmera fixada

Fonte: Autoria própria (2021).

Para configurar o alinhamento por câmera, é necessário configurar o ângulo de rotação da câmera no bCNC, pois assim o *software* consegue fazer as alterações necessárias de exibição da imagem. Com isso, alterou-se o ângulo para 270°, conforme a Figura 25. No menu destacado é possível alterar outras configurações, como

selecionar outras câmeras, caso haja mais de uma conectada, e alterar a largura e o comprimento da imagem visualizada.

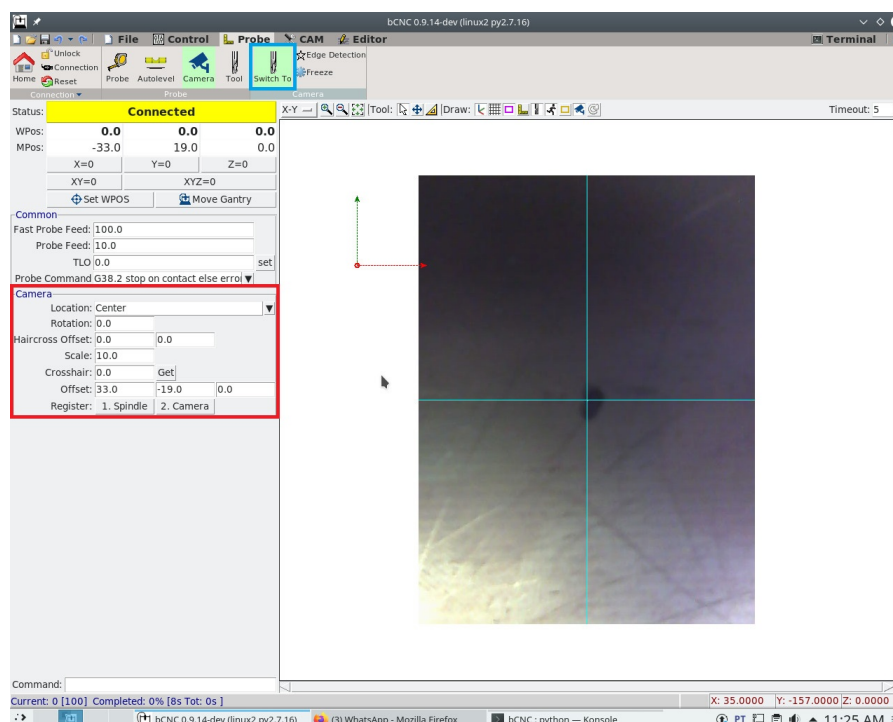
Figura 25 – Menu de configuração bCNC



Fonte: Autoria própria (2021).

Após modificar o ângulo da câmera, é necessário calcular o *offset* entre a câmera e a ferramenta da fresa. Para isso, foi feita uma marcação em uma placa fixada na mesa da fresa que serve como ponto de referência para o procedimento. Primeiro, coloca-se a ferramenta no centro da marcação e, no menu *probe*, submenu *camera*, é registrado o *spindle*. O próximo passo é mover o centro da cruz da imagem da câmera para o centro da marcação e registrar a câmera. Com isso, o bCNC calcula o *offset*, conforme apresentado na Figura 26 destacado em vermelho, permitindo alternar a referência do sistema entre câmera e ferramenta, destaque azul na Figura 26. Essa possibilidade permite que se alinhe com a câmera onde se deseja que a ferramenta fique e depois alternar novamente, fazendo com que a ferramenta vá para a posição em que estava o centro do retículo da câmera.

Figura 26 – Menu Camera



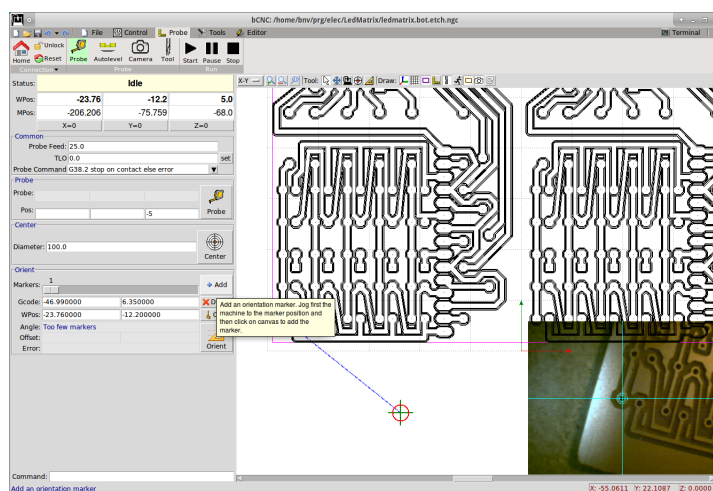
Fonte: Autoria própria (2021).

4.2.2 Orientação do objeto com bCNC

Quando a PCI que está sendo fabricada e é movida por algum motivo qualquer, o bCNC conta com uma funcionalidade chamada *orient*, que permite que as coordenadas do *gcode* sejam modificadas para condizer com a nova posição da placa.

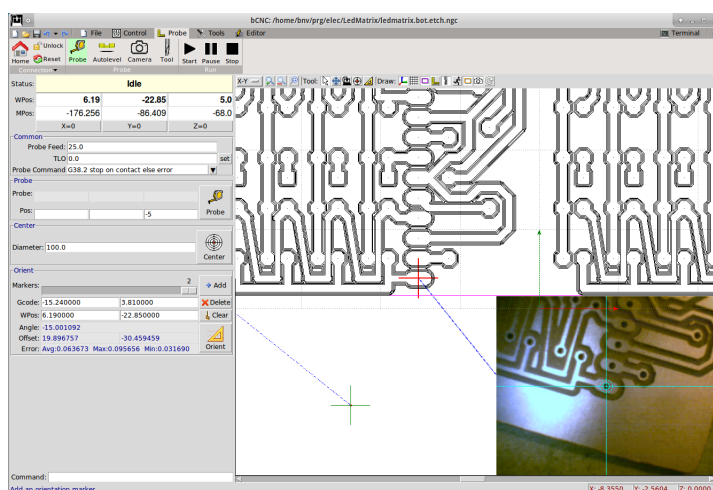
Para utilização desse recurso, é necessário alinhar pontos da PCI com pontos do objeto *gcode*. Assim, deve-se mover a ferramenta ou câmera, visto que é possível fazer de ambos os modos, para um ponto já fabricado da PCI, adicionar o ponto no *software* e selecionar o ponto correspondente no objeto *gcode*. É necessário fazer isto, no mínimo, para dois pontos. Com os pontos marcados, o bCNC calcula a inclinação da PCI e, ao utilizar da funcionalidade, reorienta o *gcode* de acordo com o ângulo calculado. O processo pode ser visualizado nas Figuras 27 a 29, retiradas da documentação do bCNC.

Figura 27 – Adição do primeiro marcador



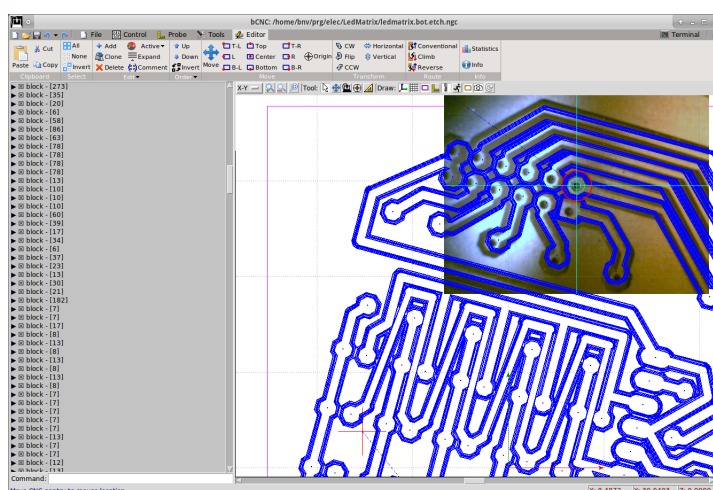
Fonte: Vlachoudis (2017).

Figura 28 – Adição do segundo marcador



Fonte: Vlachoudis (2017).

Figura 29 – Objeto orientado

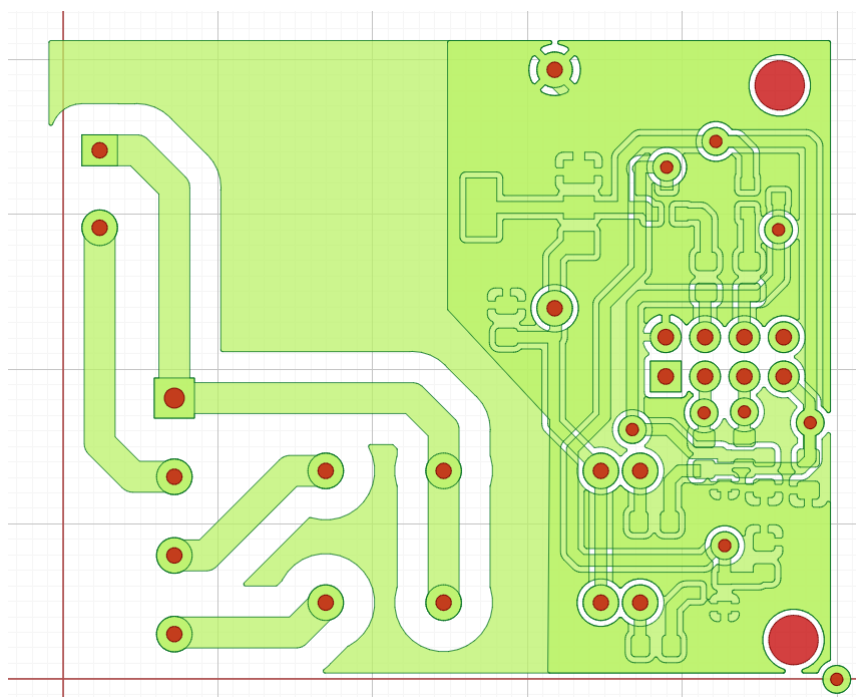


Fonte: Vlachoudis (2017).

4.2.3 Modo dupla face FlatCAM

O FlatCAM conta com uma ferramenta, *2Sided Tool*, que auxilia nas transformações necessárias para o desenvolvimento de placas dupla face. Essa ferramenta conta com operações de espelhamento, que permitem colocar pontos como referência, ou outro objeto, e espelhar o gerber/excellon/geometria em relação a essa referência, tanto no eixo X quanto no eixo Y. Conta também com a possibilidade de definir coordenadas dos limites do objeto e, por fim, tem um menu de adição de pontos de alinhamento na placa, que permite criar furos que são espelhados em relação ao centro do objeto definido no menu *Bounds Values*. O menu da ferramenta está apresentado na Figura 31. A seguir será apresentado o procedimento de modificação da PCI apresentada na Figura 30.

Figura 30 – Placa original gerada no kiCAD



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 31 – Menu ferramenta dupla face FlatCAM

2-Sided PCB

Mirror Operation:
 GERBER: **Mirror**
 EXCELLON: **Mirror**
 GEOMETRY: **Mirror**

Mirror Parameters:
 Mirror Axis: ☐ X ☒ Y
 Reference: ☐ Point ☒ Box
 Reference Object:
☒ Gerber ☐ Excellon ☐ Geometry

Bounds Values:
 X min:
 Y min:
 X max:
 Y max:
 Centroid:
Calculate Bounds Values

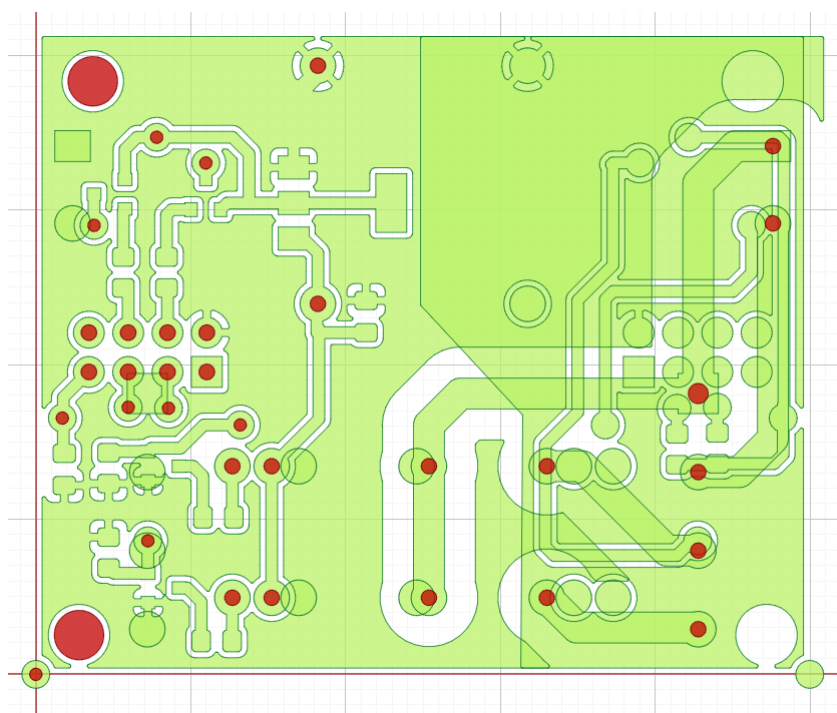
PCB Alignment:
 Drill Diameter:
 Align Axis: ☒ X ☐ Y
 Reference:
 Alignment Drill Coordinates:

Add **Delete Last**
Create Excellon Object

Reset Tool

Fonte: Autoria própria (2022).

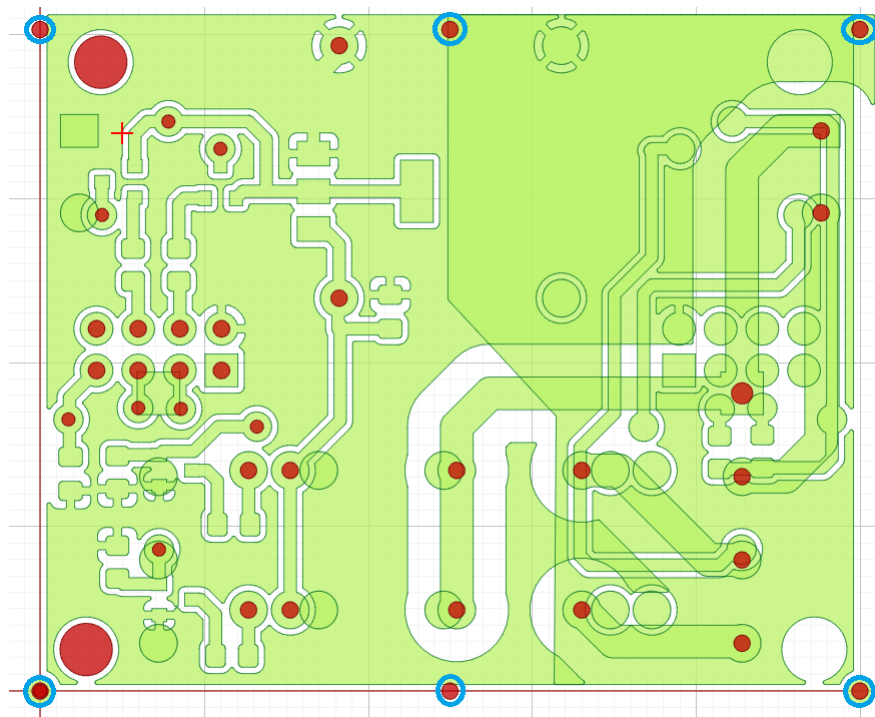
Para o desenvolvimento de placas de circuito impresso, é necessário, de acordo com a forma mais difundida, espelhar a camada *bottom* do *design* desenvolvido no software CAD para que seja alinhada com a camada de cima e possa ser inserido posteriormente a camada de *silk* de maneira que não fique espelhada. Para isso, no menu *Mirror Parameters*, pode ser selecionado tanto o Eixo X quanto o Y para fazer o espelhamento, assim foi escolhido, por questões de melhor compatibilidade das placas de cobre disponíveis com a CNC, o espelhamento em relação ao eixo Y e como referência o gerber da camada *top*. O resultado é apresentado na Figura 32.

Figura 32 – *bottom* e *drill* espelhados no eixo Y

Fonte: Autoria própria (2022).

Após o espelhamento, são adicionados os pontos de alinhamento. Estes pontos se mostraram como bons facilitadores durante os testes para alinhamento das camadas. Decidiu-se criar 3 pontos alinhados no eixo X, que se encontram na origem do eixo, na metade do comprimento da PCI e no canto inferior mais extremo da placa. Levando isso em consideração, na ferramenta *2Sided Tool*, o menu *PCB Alignment* permite definir o diâmetro dos furos, no caso em questão utilizou-se o mesmo diâmetro da ferramenta de furação, 1 milímetro, o eixo de alinhamento foi escolhido o X, a referência é a mesma selecionada nos parâmetros de espelhamento, e as coordenadas foram adicionadas. Após isso, a ferramenta gera os furos de alinhamento, destacados pelos círculos azuis na Figura 33. Após isso, foi seguido o procedimento padrão de gerar a geometria e o gcode para utilização no bCNC.

Figura 33 – Furos de alinhamento gerados

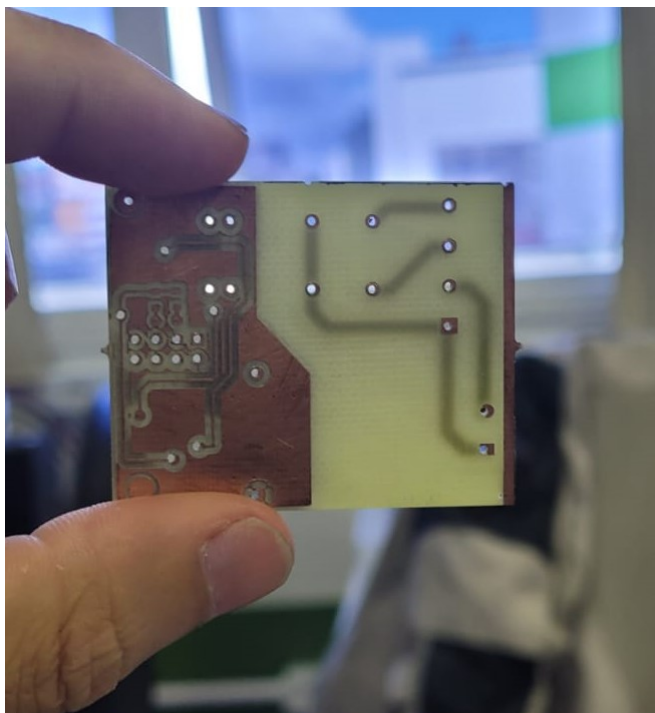


Fonte: Autoria própria (2022).

4.2.4 Resultados obtidos

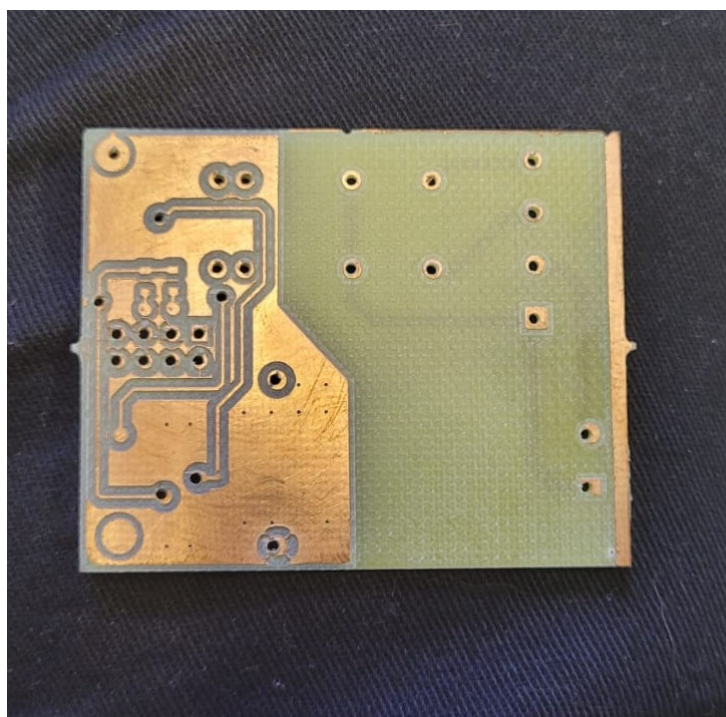
Foram manufaturadas duas placas utilizando as ferramentas apresentadas acima. Na primeira placa manufaturada, o alinhamento entre as camadas de cobre *top* e *bottom* não apresentou problemas, apenas nos parâmetros de ferramenta que foi utilizado valores incorretos, resultando em trilhas finas, conforme apresentado nas Figuras 34 até 36. Outro problema observado foi o tamanho das ilhas que, assim como as trilhas, apresentaram tamanhos muito finos, o que resultaria em uma má fixação dos componentes quando soldados.

Figura 34 – PCI 1 - Visão do alinhamento

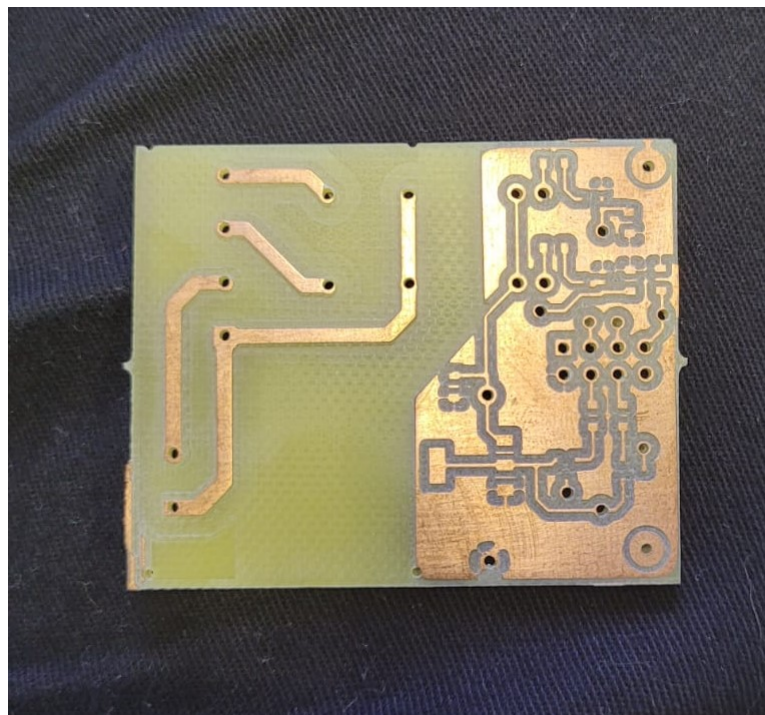


Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 35 – PCI 1 - Visão da camada superior



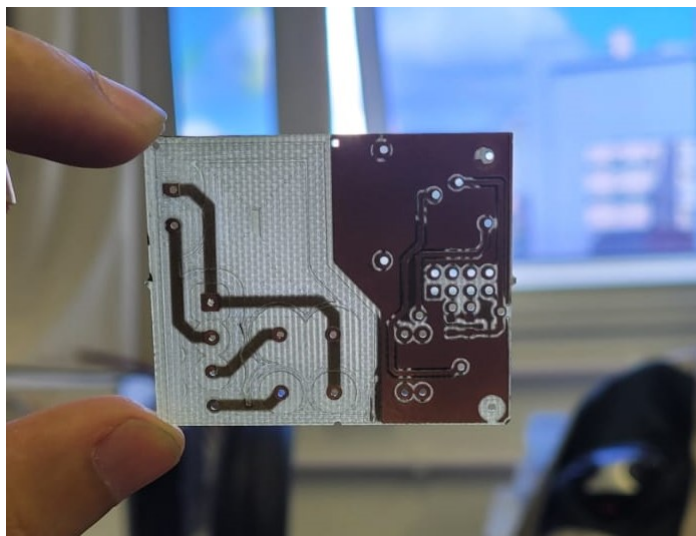
Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 36 – PCI 1 - Visão da camada inferior

Fonte: Autoria própria (2022).

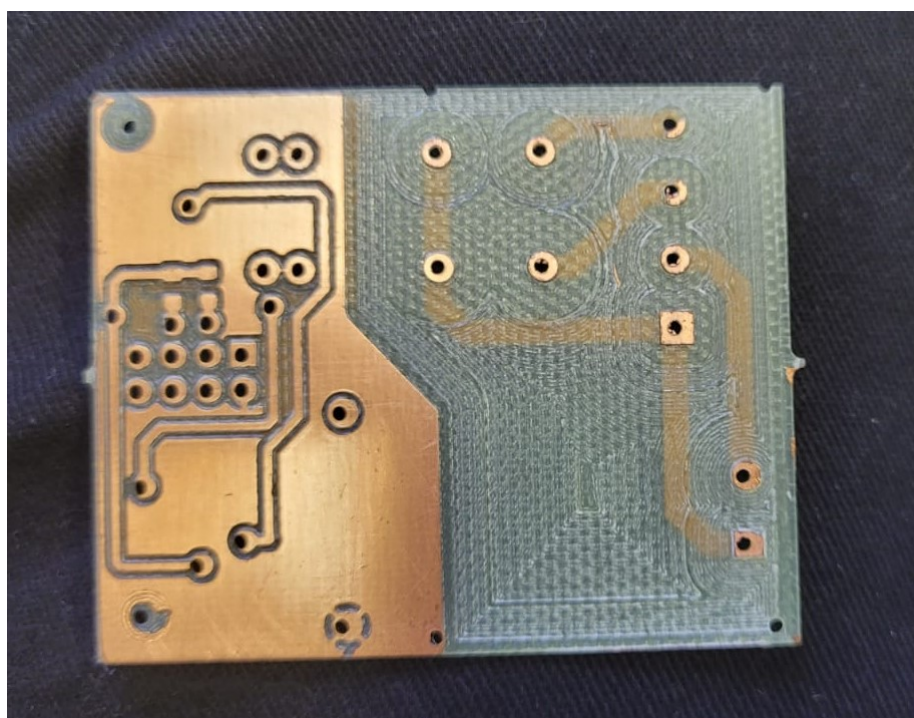
Para corrigir os problemas encontrados na primeira PCI, foi realizada a manufatura de outra placa utilizando parâmetros diferentes de ferramenta, mas o mesmo procedimento para o alinhamento das camadas de cobre. O alinhamento obtido foi tão bom quanto o da primeira PCI, visto que os pontos de início e fim das trilhas se conectam onde deveriam, e as ilhas ficaram na posição correta. Outro ponto observado foi que as ilhas, exceto por duas no topo da Figura 37, que apresentaram desgaste decorrido do movimento muito intenso da ferramenta de isolamento da fresa, ficaram de um tamanho bom, permitindo uma boa fixação e soldagem dos componentes.

Figura 37 – PCI 2 - Visão do alinhamento

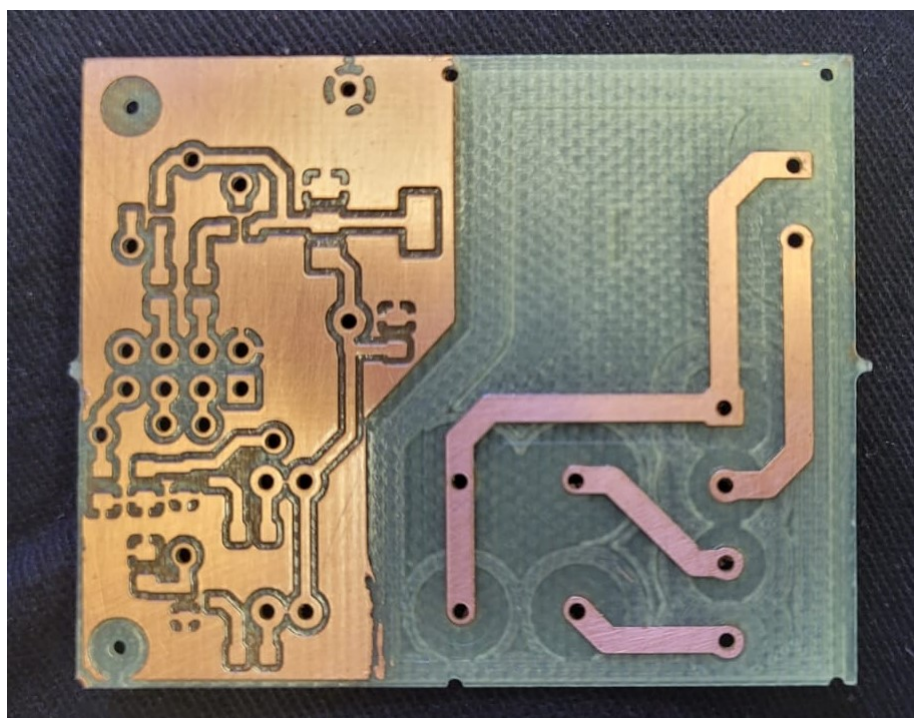


Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 38 – PCI 2 - Visão da camada superior



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 39 – PCI 2 - Visão da camada inferior

Fonte: Autoria própria (2022).

4.3 Parâmetros estabelecidos

A manufatura de placas de circuito impresso é um processo complexo, que exige atenção aos detalhes para que não haja erros no produto final. Assim, buscando-se obter a maior fidelidade entre projeto e produto, foram estabelecidos parâmetros padrões que estão listados a seguir nas Tabelas 7 e 8. Um tutorial de como realizar a manufatura de placas dupla face pode ser encontrado no Apêndice A.

Tabela 7 – Parâmetros de *Design CAD*

Parâmetro	Valor
<i>Clearance</i>	15 mils (0,381 mm)
Largura de trilha	30 mils (0,762 mm)
Diâmetro da ilha	90 mils (2,3 mm)

Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 8 – Parâmetros de *Design CAM*

Parâmetro	Valor
<i>Cut Z</i>	-0,1 mm
<i>Travel Z</i>	2,0 mm
<i>Feedrate</i>	150 mm/min
Método NCC	Seed
Diâmetro da ferramenta	0,5 mm

Fonte: Autoria própria (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A manufatura da PCI é um passo importante e oneroso do processo de desenvolvimento de um produto eletrônico que exige atenção aos detalhes e rigurosidade de quem está realizando esse procedimento. Para isso, foram estabelecidos parâmetros para ferramentas de CAD e CAM, que permitem a utilização de máquinas fresadoras CNC para a realização deste importante passo. Também definiu-se um procedimento para que seja possível realizar a manufatura de placas dupla face de modo a ter maior qualidade e confiabilidade no processo. Este procedimento está apresentado no Apêndice A.

Com isso estabelecido, se cumpre o objetivo geral deste trabalho que foi o estabelecimento de parâmetros para ferramentas de CAD e CAM para a manufatura de PCI em máquinas CNC. Também foram cumpridos os objetivos específicos de identificar os parâmetros de *clearance* e largura de trilha nas ferramentas CAD, a padronização de parâmetros na ferramenta de CAM. Além disso, os dois objetivos estipulados de implementar o alinhamento por câmera e a metodologia para confecção de PCI dupla face foram cumpridos com o estabelecimento do procedimento presente no Apêndice A.

Com esses parâmetros e procedimentos estabelecidos, é possível realizar a criação de placas dupla face, assim como placas de face simples, conforme especificado na seção 1.4. Com isso estabelecido, este trabalho proporciona a oportunidade de realizar a manufatura de placas de circuito impresso de maneira simples e robusta para os alunos que tiver a possibilidade de acesso a uma das máquinas CNC disponibilizadas no IFSC, permitindo uma maior confiabilidade e tempo para que possam dedicar a outras tarefas de projeto

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Outras possibilidades que podem ser exploradas em próximos trabalhos, são a utilização da máquina CNC laser para o processo de identificação dos componentes presentes nas camadas das PCIs e a confecção de painéis, visto que o FlatCAM traz essa, e muitas outras, funcionalidades.

REFERÊNCIAS

- ADLER, P. Cad/cam: managerial challenges and research issues. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 36, n. 3, p. 202–215, 1989. 15
- ALTIUM. **Altium Designer**. 2017. Disponível em: <https://www.altium.com/>. Acesso em: 05 Jan. 2022. 23, 24
- CARAM, J. P. **FlatCAM: Free and Open-source PCB CAM**. 2020. Disponível em: <http://flatcam.org/>. Acesso em: 05 Jan. 2022. 28
- CHAMPLAIN, J.; WOODCOCK, J. **understanding gcode commands**. 2015. Disponível em: <https://www.picengrave.com/Pic%20Programs%20Page/PDF%20Files/misc/Understanding%20Gcode.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2022. 27
- DCT. **CAM-Software CircuitCAM v7**. 2020. Disponível em: <https://www.circuitcam.com/>. Acesso em: 18 Jan. 2022. 29
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. [S.l.]: Editora Atlas, 2002. 30
- GRBL. **GRBL**. 2017. Disponível em: <https://github.com/grbl/grbl>. Acesso em: 15 Jan. 2022. 21
- HUANG, L. **CNC History: The Origination and Evolution of CNC Machining**. 2021. Disponível em: <https://www.rapiddirect.com/blog/cnc-history/>. Acesso em: 21 Mar. 2022. 20
- IRMAK, E. *et al.* Implementation of an interactive remote laboratory platform for stepper motor experiments. In: . [S.l.: s.n.], 2012. p. DS3e.5–1. ISBN 978-1-4673-1970-6. 26
- KICAD. **KiCad EDA**. 2022. Disponível em: <https://www.kicad.org>. Acesso em: 05 Jan. 2022. 24
- LABCENTER. **Proteus**. 2022. Disponível em: <https://www.labcenter.com/>. Acesso em: 05 Jan. 2022. 27
- LADOU, J. Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, v. 209, n. 3, p. 211–219, 2006. ISSN 1438-4639. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1438463906000204>. 15
- MEHL, E. L. D. M. **CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**. 2022. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf. Acesso em: 21 Mar. 2022. 17
- TEC-CI. **Corrosão de placas de circuito impresso**. 2022. Disponível em: <https://tec-ci.com.br/blog/circuito-impresso/corrosao-circuito-impresso/>. Acesso em: 22 Mar. 2022. 19
- THYER, G. E. **Computer Numerical Control of Machine Tools**. 2. ed. [S.l.]: Butterworth Heinemann, Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 978-0-7506-0119-1, 0750601191. 19

TORNINCASA, S. *et al.* **THE FUTURE AND THE EVOLUTION OF CAD**. 2010. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.403.220&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022. 22

VLACHOUDIS, V. **bCNC**. 2017. Disponível em: <https://github.com/vlachoudis/bCNC>. Acesso em: 15 Jan. 2022. 21, 44, 62, 63

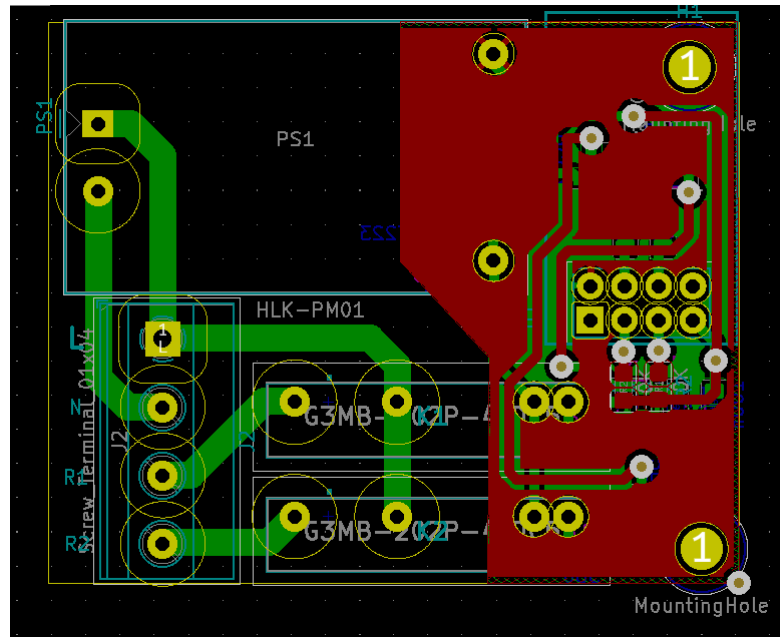
APÊNDICES

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO PARA A CRIAÇÃO DE PLACAS DUPLA FACE

Apresentar-se-á neste capítulo o procedimento detalhado para a criação de uma placa dupla face utilizando uma ferramenta CAD, FlatCAM e bCNC.

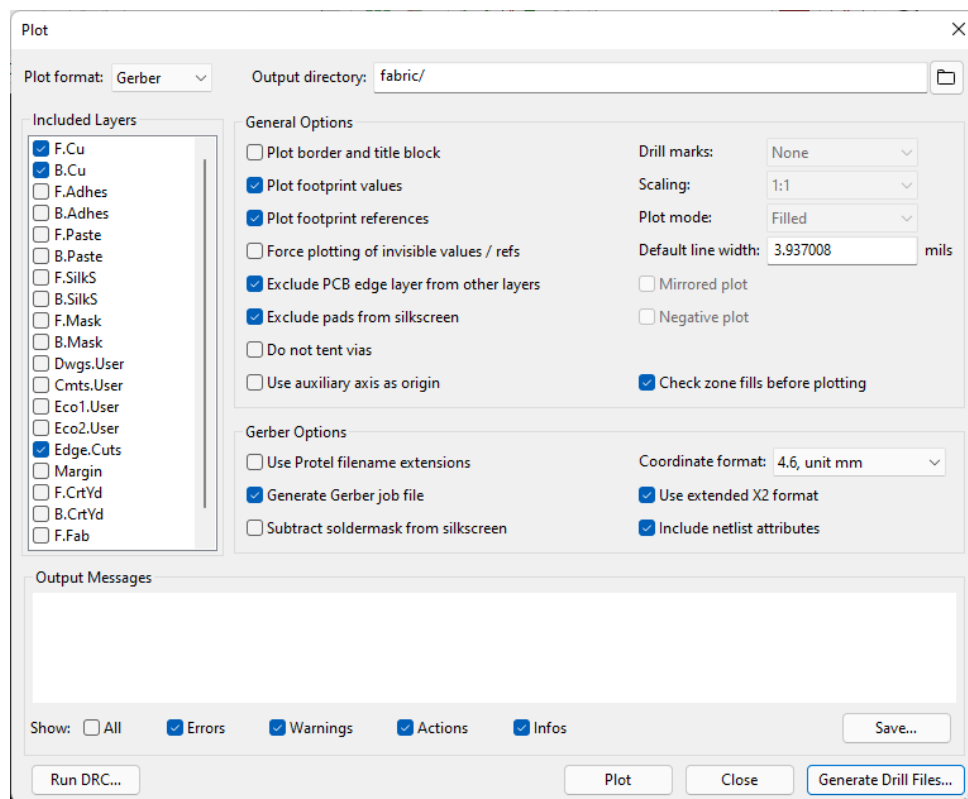
1. Gerar em uma ferramenta de CAD o projeto da placa dupla face;

Figura 40 – Placa gera na ferramenta CAD

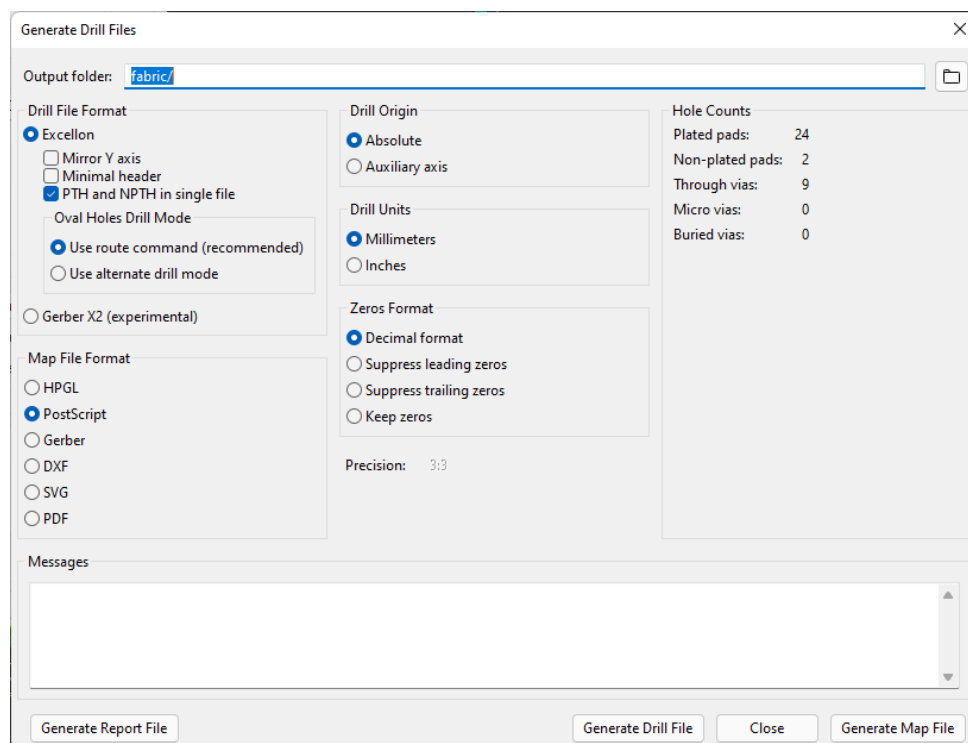


Fonte: Autoria própria (2022).

2. Gerar os arquivos Gerber para as camadas *top*, *bottom* e *Edge cuts* e excellon contendo os furos PTH e NPTH em um arquivo único;

Figura 41 – Menu *plot* do KiCAD

Fonte: Autoria própria (2022).

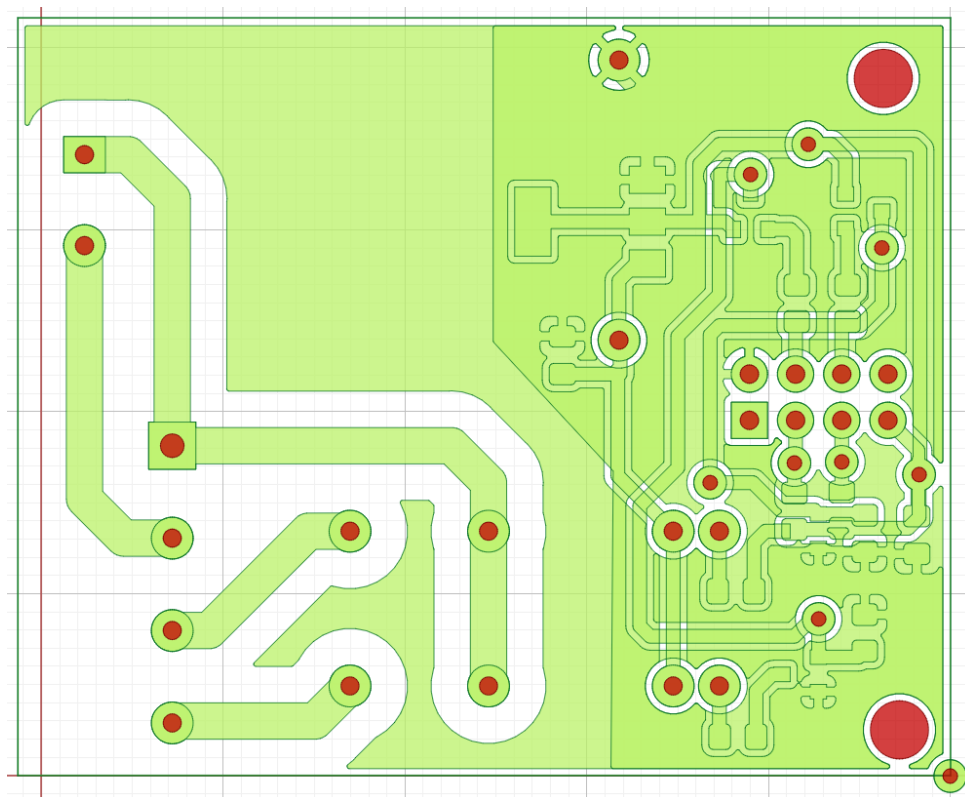
Figura 42 – Menu *drill* do KiCAD

Fonte: Autoria própria (2022).

3. Importar os Arquivos gerados no passo anterior no FlatCAM e realizar o alinha-

mento dos objetos gerados;

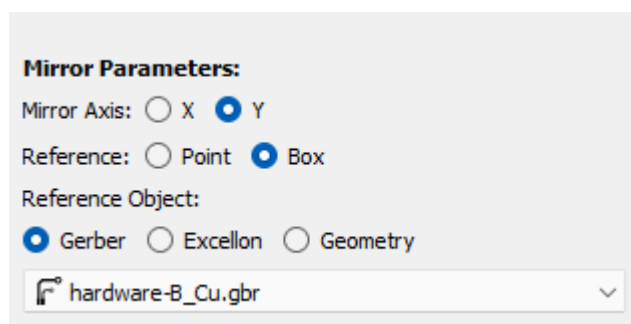
Figura 43 – Objetos importados e alinhados no FlatCAM



Fonte: Autoria própria (2022).

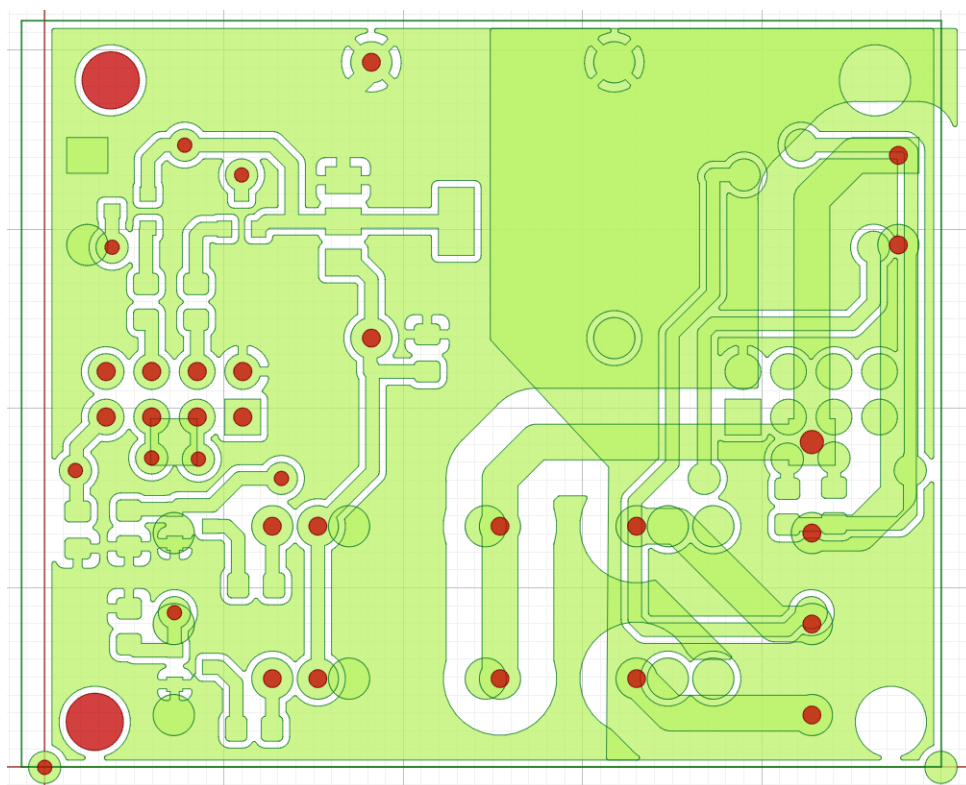
4. Definir na ferramenta *2Sided Tool* do FlatCAM a camada *bottom* como objeto de referência para o espelhamento e o eixo de espelhamento como Y;

Figura 44 – Parâmetros de espelhamento



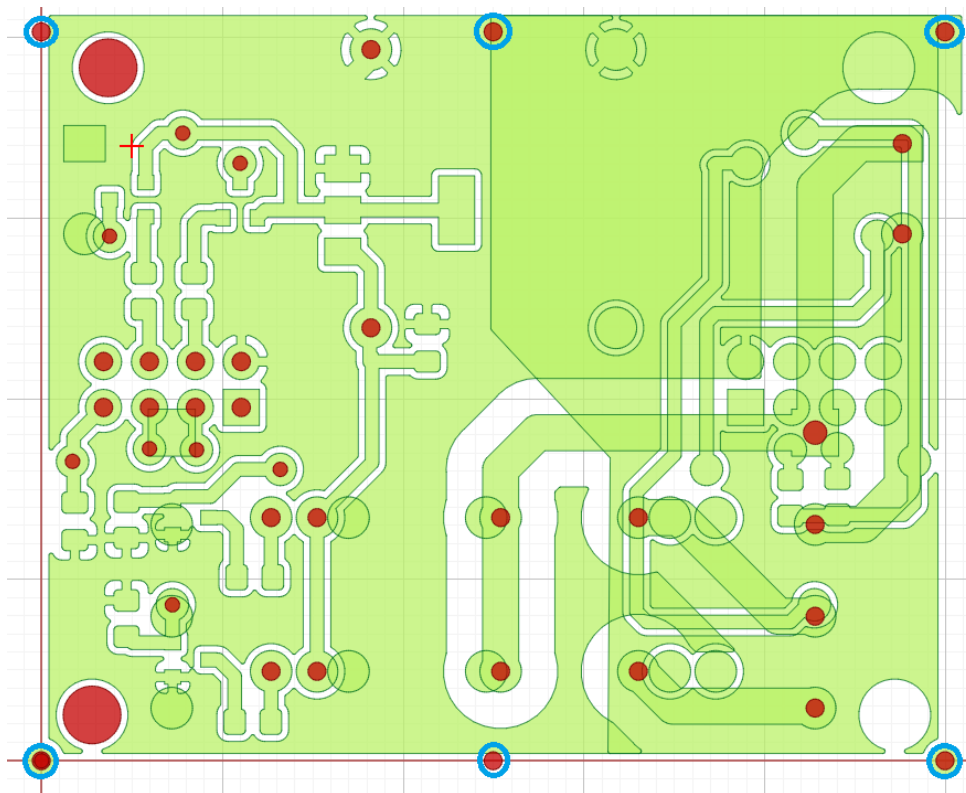
Fonte: Autoria própria (2022).

5. Realizar o espelhamento da camada *Bottom* e dos furos do projeto;

Figura 45 – Objeto com camada *bottom* e *drill* espelhados

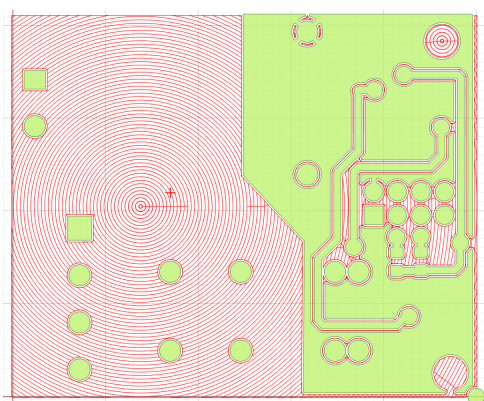
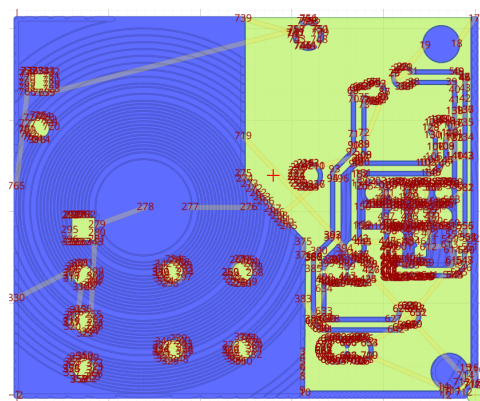
Fonte: Autoria própria (2022).

6. Gerar os furos de alinhamento utilizando o eixo X para alinhamento e as coordenadas (0,0), (metade da largura da placa, 0), (largura da placa, 0), por fim gerar o objeto excellon;

Figura 46 – Objeto com furos de alinhamento gerados

Fonte: Autoria própria (2022).

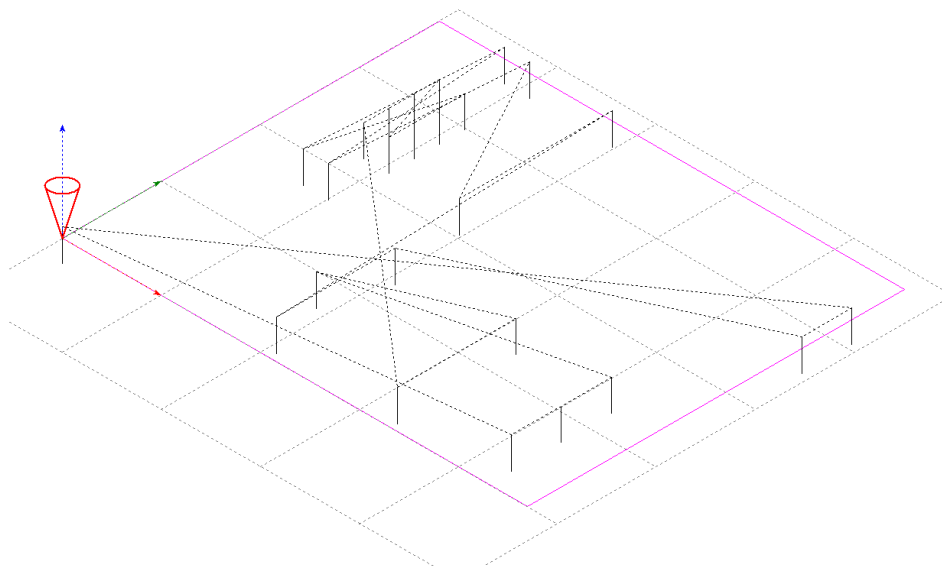
7. Gerar as geometrias e os trabalhos para a CNC para ambas as faces e para os furos;

Figura 47 – Geometria e trabalho gerados no FlatCAM**(a) Geometria gerada****(b) Trabalho para a CNC gerado**

Fonte: Autoria própria (2022).

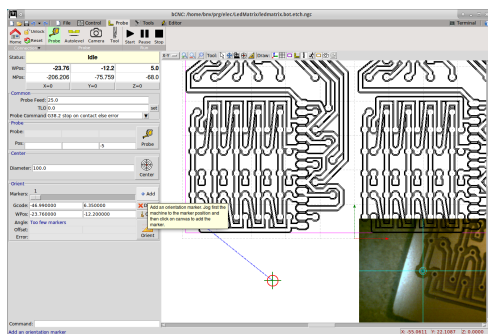
8. No bCNC, realizar a perfuração da PCI e a confecção de um dos lados da placa;

Figura 48 – Arquivo com os furos bCNC

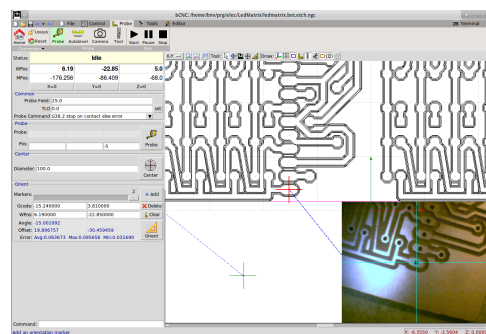


Fonte: Autoria própria (2022).

9. Após finalizado, girar a placa da mesma maneira que o espelhamento no FlatCAM e definir o ponto (0,0) no furo de alinhamento equivalente ao inicial;
10. Utilizar a ferramenta *Orient* do bCNC e o *G-code* dos furos, os de alinhamento ou os da própria PCI, para calcular a nova posição física da placa;

Figura 49 – Orientação do objeto usando modo *orient*

(a) Objeto referência



(b) Marcação dos pontos

Fonte: Vlachoudis (2017).

11. Carregar o arquivo da face restante e rotacionar com os valores calculados no passo anterior;

