

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Matheus do Sacramento Constantino

**Desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso de um Sistema de
Controle Automático para uma Microcâmara Climática**

Juiz de Fora

2024

Matheus do Sacramento Constantino

**Desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso de um Sistema de
Controle Automático para uma Microcâmara Climática**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Juiz de Fora como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica – Ênfase em
Robótica e Automação Industrial

Orientador: Prof. Dr. Daniel de Almeida Fernandes

Juiz de Fora

2024

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo L^AT_EX do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Constantino, Matheus do Sacramento.

Desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso de um Sistema de Controle Automático para uma Microcâmara Climática / Matheus do Sacramento Constantino. – 2024.

43 f. : il.

Orientador: Daniel de Almeida Fernandes

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2024.

1. Câmara climática. 2. Controle automático. 3. Placa de Circuito Impresso (PCI). 4. Roteamento de PCI. 5. Psicrometria. I. Fernandes, Daniel de Almeida, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
REITORIA - FACENG - Depto. de Energia Elétrica

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

DATA DA DEFESA: 11 / 10 / 2024

HORÁRIO DE INÍCIO: 9:15

CANDIDATO: Matheus do Sacramento Constantino

ORIENTADOR: Prof. Dr. Daniel de Almeida Fernandes

TÍTULO DO TRABALHO: Desenvolvimento de uma placa de circuito impresso de um sistema de controle automático para uma microcâmara climática

BANCA EXAMINADORA/INSTITUIÇÃO:

PRESIDENTE: Prof. Dr. Daniel de Almeida Fernandes (UFJF)

AVALIADOR 1: Prof. Dr. Estevão Coelho Teixeira (UFJF)

LOCAL: Auditório "escadinha" - Sala 4118 - Faculdade de Engenharia/UFJF

Nesta data, em sessão pública, após exposição oral de cerca de 35 minutos, o candidato foi arguido pelos membros da banca examinadora. Em decorrência dessa arguição, a banca considerou o candidato:

☒ **APROVADO**

☐ **REPROVADO**

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é abaixo assinada pelos membros da banca e pelo candidato.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel de Almeida Fernandes, Professor(a)**, em 11/10/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Matheus do Sacramento Constantino, Usuário Externo**, em 11/10/2024, às 20:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Estevao Coelho Teixeira, Professor(a)**, em 13/10/2024, às 19:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o



código verificador **2040609** e o código CRC **0960BA7B**.

Referência: Processo nº 23071.937224/2024-16

SEI nº 2040609

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar a este momento.

Aos meus pais, Rita e Sérgio, pela educação, por todo o amor, compreensão e suporte ao longo de toda a minha vida.

À minha esposa Aline, pelo amor e companheirismo nos últimos anos.

Ao professor Daniel de Almeida Fernandes, que me orientou neste trabalho e dedicou incontáveis horas a este e outros projetos, pelos ensinamentos, confiança e amizade ao longo destes últimos anos.

Aos vários amigos e colegas com quem convivi durante esses anos, alguns dos quais levarei para toda a vida.

À Universidade Federal de Juiz de Fora, pelo ensino e pelas oportunidades de participar de projetos como o Grupo de Educação Tutorial (GET) do curso de Engenharia Computacional, Monitoria e Iniciação Científica.

Aos técnicos e professores dos diversos departamentos em que cursei disciplinas, que contribuíram de maneiras diversas para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus colegas de trabalho, que tornam minhas tardes melhores.

RESUMO

O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) destinada a um sistema de controle automático da umidade relativa do ar dentro de uma microcâmara climática que está sendo desenvolvida por pesquisadores da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Campus Diadema, em colaboração com pesquisadores da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O sistema deverá controlar uma pastilha Peltier, no momento apenas em malha aberta, mas em breve deverá permitir o controle também em malha fechada. A PCI desenvolvida é do tipo dupla face, o que possibilita sua confecção em um dos laboratórios da Faculdade de Engenharia da UFJF, e possui quatro regiões bem delimitadas: i) potência (incluindo uma parte de alta temperatura), ii) analógica (condicionamento de sinais e controle), iii) digital (centrada em uma placa Arduino Nano) e iv) fontes de alimentação. Durante o processo de projeto da PCI, foram aplicadas boas práticas de roteamento, incluindo a criação de grandes áreas de cobre que ajudam a melhorar a integridade do sinal e reduzir a interferência eletromagnética. O trabalho também apresenta algumas decisões que foram tomadas durante o processo de roteamento da PCI.

Palavras-chave: Câmara climática; controle automático; Placa de Circuito Impresso (PCI); roteamento de PCI; psicrometria.

ABSTRACT

This work focuses on the development of a Printed Circuit Board (PCB) for an automatic control system of relative humidity inside a climatic microchamber which is being developed by researchers at the Federal University of São Paulo (UNIFESP), Diadema Campus, in collaboration with researchers at the Federal University of Juiz de Fora (UFJF). The PCB currently controls a thermoelectric cooler in open loop, but it will soon control the thermoelectric cooler in closed loop as well. The developed PCB is double-sided so that it can be manufactured in one of the laboratories of the Faculty of Engineering at UFJF. It has four well-defined regions: i) power (including a high-temperature region), ii) analogue (signal conditioning and control), iii) digital (centred on an Arduino Nano board), and iv) power supplies. During the PCB design process, good routing practices were applied, including the creation of large copper areas which help to improve signal integrity and reduce electromagnetic interference. This work also presents some of the decisions that were made during the PCB routing process.

Keywords: Automatic control; climatic chamber; Printed Circuit Board (PCB); PCB routing; psychrometrics.

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
	LISTA DE TABELAS	x
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1	Introdução	1
1.1	Introdução e motivação	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do trabalho	1
2	Referencial teórico	3
2.1	Introdução	3
2.1.1	História	3
2.2	Componentes de uma PCI	4
2.2.1	Componentes eletrônicos	4
2.2.1.1	Resistores	4
2.2.1.2	Capacitores	5
2.2.1.3	Indutores	5
2.2.1.4	Diodos	6
2.2.1.5	Transistores	6
2.2.1.6	Circuitos integrados	7
2.2.1.7	Conectores	9
2.2.2	Composição de uma PCI	9
2.2.2.1	Condutor	9
2.2.2.2	Base	10
2.2.2.3	Trilhas	10
2.2.2.4	Ilhas	10
2.2.2.5	Vias	10
2.2.2.6	Serigrafia	11
2.2.2.7	Máscara de solda	11
2.3	Tipos de PCIs	11
2.3.1	Classificações	11
2.3.1.1	PCI de face simples	12
2.3.1.2	PCI de dupla face	12
2.3.1.3	PCI multicamadas	12
2.3.2	Materiais de uma PCI	13
2.3.2.1	Tipos de laminados	13
2.3.3	Tecnologias de montagem	14
2.3.3.1	Montagem através de furos	14
2.3.3.2	Montagem em superfície	15

2.4	Projeto de PCIs	15
2.4.1	Etapas	15
2.4.1.1	Arquivos em formato Gerber	16
2.4.2	Diagramas elétricos ou eletrônicos	17
2.4.2.1	Diagrama de blocos	17
2.4.2.2	Diagrama esquemático	18
2.4.2.3	Diagrama de leiaute	18
2.5	Leiaute da PCI	20
2.5.1	Posicionamento dos componentes	20
2.5.2	Roteamento da PCI	22
2.5.2.1	Plano de referência	23
2.6	Integridade de sinal	24
2.6.1	Ruídos elétricos	24
2.6.2	Integridade de energia	24
2.6.3	Compatibilidade eletromagnética	24
2.6.4	Diafonia	26
2.6.4.1	Técnicas de prevenção de diafonia	26
2.6.5	Capacitores de desacoplamento	27
3	PCI para um protótipo de sistema de controle automático . .	28
3.1	Introdução	28
3.2	Diagrama esquemático do circuito eletrônico	29
3.3	Breve descrição do circuito eletrônico	31
3.4	Placa de circuito impresso	34
3.4.1	Camadas da PCI	35
3.4.2	Modelos 3D da PCI	36
4	Conclusão	39
4.1	Conclusões	39
4.2	Trabalhos futuros	40
	REFERÊNCIAS	41

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de Circuito Integrado (CI). Encapsulamento DIP.	8
Figura 2 – Exemplos de CIs. Encapsulamentos SMT.	8
Figura 3 – Exemplo da numeração dos pinos de dois encapsulamentos distintos. . .	8
Figura 4 – Anatomia (componentes) de uma PCI.	9
Figura 5 – Representação dos tipos de vias	11
Figura 6 – Representação do laminado de uma PCI.	13
Figura 7 – Ilustração da tecnologia de montagem <i>Through-Hole Technology</i> (THT). .	14
Figura 8 – Ilustração da tecnologia de montagem <i>Surface-Mount Technology</i> (SMT). .	15
Figura 9 – Exemplos de símbolos padrões presentes em diagramas esquemáticos. .	19
Figura 10 – Boas práticas de roteamento.	23
Figura 11 – Representação de tipos de EMI	25
Figura 12 – Exemplificação da regra 3-W.	27
Figura 13 – Protótipo de microcâmara climática	28
Figura 14 – Diagrama esquemático do circuito eletrônico	30
Figura 15 – FPB de 3ª ordem e amplificador não inversor	32
Figura 16 – Somador não inversor e controlador PI	32
Figura 17 – Amplificador de instrumentação para medição de tensão.	33
Figura 18 – Amplificador não inversor para medição de corrente.	33
Figura 19 – Exemplo do <i>footprint</i> TO-92 com as ilhas inalteradas.	34
Figura 20 – Exemplo do <i>footprint</i> TO-92 com as ilhas modificadas.	34
Figura 21 – Trilhas utilizadas no roteamento da PCI.	35
Figura 22 – Agrupamento funcional dos circuitos na PCI.	36
Figura 23 – Camada de cobre superior (Lado dos Componentes (LC)).	36
Figura 24 – Camada de cobre inferior (Lado da Solda (LS)).	37
Figura 25 – Serigrafia da PCI.	37
Figura 26 – Modelo 3D do LC da PCI dupla face.	38
Figura 27 – Modelo 3D do LS da PCI dupla face.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns exemplos comuns de designadores de referência.	19
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Conversor Analógico-Digital
AI	Amplificador de Instrumentação
Amp Op	Amplificador Operacional
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor bipolar de junção)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CI	Circuito Integrado
D/A	Conversor Digital-Analógico
DIP	<i>Dual In-line Package</i> (Encapsulamento em linha dupla)
EDA	<i>Electronic Design Automation</i> (Software para projetos de eletrônica)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade eletromagnética)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência eletromagnética)
ESL	<i>Equivalent Series Inductance</i> (Indutância em série equivalente)
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i> (Resistência em série equivalente)
EUA	Estados Unidos da América
FET	<i>Field-Effect Transistor</i> (Transistor de efeito de campo)
FPB	Filtro Passa-Baixas
IC	Iniciação Científica
IEM	Interferência Eletromagnética
IGBT	<i>Insulated-Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor bipolar de porta isolada)
LC	Lado dos Componentes
LCCC	<i>Leadless Ceramic Chip Carrier</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
LS	Lado da Solda
LSI	<i>Large-Scale Integration</i> (Integração em grande escala)
MA	Malha Aberta
MF	Malha Fechada
MSI	<i>Medium-Scale Integration</i> (Integração em média escala)
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente de temperatura negativo)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (PCI)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PI	Proporcional-Integral
PLCC	<i>Plastic Lead Chip Carrier</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> (Modulação por largura de pulso)
SMD	<i>Surface-Mount Device</i> (Componente para montagem em superfície)
SMT	<i>Surface-Mount Technology</i> (Tecnologia de montagem em superfície)
SOIC	<i>Small Outline Integrated Circuit</i>
SSI	<i>Small-Scale Integration</i> (Integração em pequena escala)
THD	<i>Through-Hole Device</i> (Componente para montagem através de furos)

THT	<i>Through-Hole Technology</i> (Tecnologia de montagem através de furos)
TP	<i>Test Point</i> (Ponto de teste)
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
ULSI	<i>Ultra Large-Scale Integration</i> (Integração em ultra grande escala)
UNIFESP	Universidade Federal de São Paulo
VLSI	<i>Very Large-Scale Integration</i> (Integração em muito grande escala)

1 Introdução

1.1 Introdução e motivação

As Placas de Circuito Impresso (PCIs) possuem hoje uma papel importantíssimo na indústria eletrônica. O desenvolvimento da tecnologia, contribuiu para a miniaturização dos componentes, como é o caso do surgimento dos componentes para montagem em superfície (*Surface-Mount Device* (SMD)). Além disso, houve avanços nos processos de fabricação, o que permitiu não só que espaço e tamanho dos equipamentos produzidos fossem otimizados, de forma que produtos como celulares e computadores, por exemplo, se tornassem cada vez mais compactos sem que houvesse perda de recursos, como também aumento da confiabilidade no processo, permitindo expandir sua utilização para áreas mais críticas, como a área médica, por exemplo. Um outro aspecto do advento das PCIs é que tornou-se mais fácil o processo de produção em massa, que implica numa redução do preço de custo de produção, tornando muitos produtos mais acessíveis. Além do aspecto industrial, outro público que se beneficiou foram os *hobbystas*, ou entusiastas da eletrônica, que podem hoje com uma certa facilidade desenhar placas e fabricá-las, transformando suas ideias em protótipos para que possam realizar testes e, talvez, até instigar a novas ideias. Outro aspecto mais contemporâneo do avanço na utilização dessas placas é a formação de grupos com esse interesse em comum, através de fóruns temáticos, que compartilham ideias e aprendizado.

A ideia de realização deste trabalho surgiu a partir de um projeto de Iniciação Científica (IC) desenvolvido na UFJF, cujo objetivo era o desenvolvimento de um sistema de controle da umidade relativa do ar para uma microcâmara climática, onde uma das necessidades era o desenvolvimento de uma PCI para a construção de um protótipo. O projeto teve início com a parceria dos professores Rogério de A. Vieira, da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), e Daniel de A. Fernandes, da UFJF.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma PCI, começando com a revisão de conceitos fundamentais necessários ao seu desenvolvimento. A revisão passa por tópicos como os principais componentes, eletrônicos e não eletrônicos, de uma PCI, materiais utilizados na fabricação de PCIs, técnicas e boas práticas necessárias à alocação dos componentes e ao roteamento do circuito, entre outros.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho divide-se em quatro capítulos. O presente capítulo abre o trabalho.

O [Capítulo 2](#) apresenta uma breve revisão teórica de conceitos ligados ao desenvolvimento de PCIs, passando por definições de elementos comumente encontrados nas

placas, breves observações de características reais dos principais componentes utilizados nos circuitos elétricos/eletrônicos, boas práticas que devem ser adotadas tanto durante o projeto do diagrama esquemático quanto durante o roteamento de uma PCI, comentários acerca de integridade dos sinais elétricos, ruídos elétricos, compatibilidade eletromagnética e *crosstalk*.

O [Capítulo 3](#) apresenta informações sobre o projeto eletrônico do protótipo desenvolvido, observações sobre o processo de desenvolvimento da PCI e a arte final dela.

O [Capítulo 4](#) apresenta algumas observações finais, possíveis oportunidades de melhoria e trabalhos futuros.

2 Referencial teórico

2.1 Introdução

Um equipamento elétrico é composto por componentes elétricos ou eletrônicos interconectados para desempenhar uma função pré-determinada (Khandpur, 2006). Inicialmente, na época dos tubos de vácuo, também conhecidas como válvulas termiônicas, e um pouco além, os equipamentos eram construídos por meio de fios conectados à mão e utilizando-se soldagem ponto a ponto. Os fios eram decapados, revestidos com estanho e, em seguida, soldados (Khandpur, 2006). Esse procedimento resultava na construção de equipamentos grandes, volumosos, pesados e eletricamente ineficientes, tornando-os inadequados para utilização em alguns setores como aviação e hospitais, por exemplo, o que gerou demanda para que fossem desenvolvidos equipamentos menores e mais compactos (Khandpur, 2006).

A evolução natural ocorrida em áreas diversas, com o desenvolvimento de componentes cada vez menores e a utilização da miniaturização deu origem a uma nova técnica de interconexão de componentes elétricos ou eletrônicos que ficou conhecida como PCI (Khandpur, 2006). O desenvolvimento de um processo mais econômico para a fabricação de PCIs, sua reprodutibilidade em escala industrial, além da utilização de um processo de soldagem que permite garantir melhores conexões elétricas entre os componentes da PCI, contribuíram para o avanço e disseminação da utilização de PCIs como nos dias atuais (Marks & Caterina, 2000).

2.1.1 História

Khandpur (2006) afirma que a história do desenvolvimento de PCIs é recente e seu uso comercial data dos anos iniciais da década de 1950. Considerando a tecnologia moderna de desenvolvimento de PCIs, a principal contribuição foi realizada pelo engenheiro e inventor austríaco Paul Eisler, que é considerado o pai das PCIs. Ele propôs a utilização de um material isolante revestido por uma folha de cobre como base na fabricação de placas. Além disso, propôs também que ambos os lados da base revestida tivessem condutores e que eles fossem conectados utilizando-se ilhós, ou *eyelets*, em inglês (Khandpur, 2006).

A utilização mais frequente de PCIs teve início após o fim da Segunda Guerra Mundial (1939–1945), momento em que começaram a ser produzidas em larga escala (Marks & Caterina, 2000), pois, além da utilização militar, houve uma grande demanda de produtos de consumo como rádios e televisões. Naquele momento, houve uma troca da utilização de placas de face simples por placas de dupla face (Khandpur, 2006). Na década de 1970, as PCIs já eram amplamente utilizadas nos mais diversos produtos: nos eletrônicos de consumo, equipamentos médicos e científicos, na área aeroespacial e,

mais adiante, na indústria de computadores pessoais. Devido a isso, novos processos de fabricação foram desenvolvidos e houve uma redução do tamanho das placas com a utilização de placas multicamadas e rígido-flexíveis, além do desenvolvimento de novas tecnologias de componentes como a tecnologia de montagem em superfície (Khandpur, 2006).

2.2 Componentes de uma PCI

Uma PCI possui duas funções principais: i) fornecer suporte mecânico aos componentes elétricos/eletrônicos e ii) permitir suas interligações elétricas. Uma PCI é composta, essencialmente, por dois elementos: i) a base, que é formada por um material isolante, rígido ou flexível, que fornece suporte para que os condutores e os componentes possam ser montados sobre ela; e ii) condutores, geralmente de cobre, que, além de interconectar eletricamente os componentes, fornecem pontos de soldagem para eles (Khandpur, 2006; Scarpino, 2014).

2.2.1 Componentes eletrônicos

Um componente eletrônico é, concisamente, um elemento capaz de manipular eletricidade (Khandpur, 2006). Eles possuem formas e encapsulamentos diversos e suas funções dependem de seus propósitos específicos no circuito (Khandpur, 2006). Os componentes possuem algumas características que devem ser levadas em conta durante o projeto eletrônico e da PCI. Ressalta-se que os componentes possuem diferentes encapsulamentos e materiais constituintes, e que algumas dessas características variam de acordo com a escolha do material ou encapsulamento.

2.2.1.1 Resistores

O resistor é um dos componentes mais simples e comuns de se encontrar em PCIs (Khandpur, 2006; Gibilisco, 2013). Eles podem atuar em um circuito como limitadores de corrente, divisores de tensão, divisores de corrente, entre outras funções. A propriedade física do resistor de se opor ao fluxo de corrente elétrica é conhecida como resistência elétrica, medida em Ohms (Ω). Os resistores podem ser de resistência fixa ou variável. Com respeito aos tipos de resistores, em relação ao material utilizado em sua fabricação, destacam-se os resistores de filme de carbono, filme metálico e de fio (Khandpur, 2006).

Em relação às principais características observadas nos resistores, têm-se (Khandpur, 2006): i) a **resistência** e a **tolerância**, que são, respectivamente, o valor nominal da resistência entre os dois terminais do componente, a uma temperatura de 25 °C, e o seu possível desvio percentual em relação a esse valor nominal, que determina a faixa na qual a resistência real pode situar-se; ii) o **coeficiente de temperatura**, que expressa a variação da resistência em relação à temperatura, dada em partes por milhão do valor

nominal por °C (ppm/°C), que depende do material utilizado na fabricação do resistor; iii) a **potência**, que expressa o valor máximo de potência que o resistor é capaz de dissipar de maneira contínua; iv) a **tensão contínua máxima** que pode ser aplicada ao resistor; e v) informações de **efeitos parasitas** que podem ocorrer em altas frequências.

2.2.1.2 Capacitores

Trata-se de um componente passivo que armazena energia sob a forma de campo elétrico. É constituído por duas placas condutoras (eletrodos) separadas por um material isolante (dielétrico). Alguns materiais, como papel, mica, cerâmica ou filme plástico, são utilizados como dielétricos e impactam diretamente algumas de suas características, seja fisicamente, como seu tamanho, seja eletricamente, como sua tolerância e tensão de operação (Khandpur, 2006). A razão entre a quantidade de carga armazenada e a diferença de potencial aplicada é chamada de **capacitância**, cuja unidade de medida é o Farad (F). Suas aplicações no circuito incluem (Khandpur, 2006): i) filtragem de ondulação (*ripple*, em inglês) em fontes de alimentação; ii) acoplamento e desacoplamento em amplificadores; iii) controle de tempo em circuitos osciladores; iv) outras.

Na escolha dos capacitores que serão utilizados em uma PCI, deve-se atentar a alguns aspectos, dentre os quais destacam-se (Khandpur, 2006): i) a **capacitância** e a **tolerância** que são, respectivamente, o valor nominal da capacitância a 25 °C e o desvio possível deste valor; ii) a **tensão de operação** do capacitor, que indica a tensão contínua máxima que pode ser aplicada ao capacitor sem causar-lhe dano; e iii) efeitos parasitas, como a **resistência equivalente em série**, ou *Equivalent Series Resistance* (ESR), em inglês, que é uma medida da resistência resultante da estrutura interna do capacitor, como as conexões e o eletrólito.

Encontra-se, também, capacitores variáveis. Eles possuem em sua estrutura um estator, com área fixa, e um rotor, para possibilitar a variação da capacitância (Khandpur, 2006).

2.2.1.3 Indutores

Os indutores são elementos construídos basicamente a partir de um fio condutor enrolado sobre um núcleo, que pode ou não ser de ar, para que se possa trabalhar com a indutância, cuja unidade é o Henry (H). A indutância é a propriedade física do indutor de se opor às mudanças na intensidade da corrente elétrica que o percorre (Khandpur, 2006; Gibilisco, 2013). Estes bipolos elétricos são comumente encontrados em fontes de alimentação e circuitos de áudio e rádio frequência, e são utilizados principalmente para filtragem de sinais (Khandpur, 2006).

2.2.1.4 Diodos

São componentes polarizados, constituídos por materiais semicondutores que, idealmente, permitem o fluxo de corrente apenas em uma dada direção (Khandpur, 2006; Gibilisco, 2013) e possuem uma relação tensão-corrente não linear (Sedra et al., 2023). Seu terminal positivo é chamado de anodo e seu terminal negativo é chamado catodo (Sedra et al., 2023). Sua utilização nos circuitos incluem projetos de retificação e chaveamento de sinais, entre outras funções (Khandpur, 2006; Sedra et al., 2023). Existem alguns tipos de diodos que funcionam de maneira mais específica, dentre os quais se destacam (Khandpur, 2006; Sedra et al., 2023):

- **Diodo zener:** É um diodo que possui corrente reversa baixa até certa tensão reversa pré-definida, chamada de tensão zener, na qual, após sua ultrapassagem, há uma súbita queda da resistência e um aumento da corrente reversa, no entanto, com o diodo zener mantendo sua tensão aproximadamente constante. Aplicações típicas deste tipo de diodo são: i) regulação de tensão em fontes de alimentação; ii) ceifamento ou limitação de sinais elétricos (*clipper*, em inglês); iii) outras.
- **Diodo emissor de luz:** É muito conhecido como *Light-Emitting Diode* (LED), em inglês. Emite luz quando é polarizado diretamente. Costuma-se utilizá-lo, individualmente ou em matriz, quando se deseja fornecer informações visuais na placa, como, por exemplo, se determinado módulo do circuito está ativo.

2.2.1.5 Transistores

O transistor bipolar de junção (*Bipolar Junction Transistor* (BJT), em inglês) é um componente semicondutor com três terminais: Base (B), Coletor (C) e Emissor (E). Uma característica importante desses transistores é que pequenas variações na corrente da base podem provocar grandes alterações no fluxo de corrente emissor-coletor (Frenzel, 2017), o que permite que ele atue no circuito, principalmente, como chave ou amplificador (Khandpur, 2006). Existem também os transistores de potência, que são fisicamente mais robustos que os de sinal e, comumente, são montados em dissipadores de calor (Khandpur, 2006). Algumas das características que devem ser observadas ao se escolher o transistor incluem: i) polaridade (PNP ou NPN), ii) tensões máximas permitidas e iii) potência máxima dissipada.

Outro tipo comum de transistor é o de efeito de campo (*Field-Effect Transistor* (FET), em inglês), que também possui três terminais: fonte (*Source* (S), em inglês), porta (*Gate* (G), em inglês) e dreno (*Drain* (D), em inglês) (Khandpur, 2006). Esse tipo de transistor i) é controlado por tensão, ou seja, uma pequena variação de tensão em seu terminal porta pode provocar uma grande alteração no fluxo de corrente fonte-dreno, e ii) possui a capacidade de realizar chaveamentos rápidos (comutação rápida).

Além desses dois tipos de transistores, há ainda o transistor bipolar de porta isolada (*Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT), em inglês). Ele é utilizado tipicamente em aplicações de eletrônica de potência. Esse tipo de transistor é controlado por tensão, através do terminal porta (G), que pode produzir grandes alterações no fluxo de corrente emissor-coletor, além da capacidade de realizar chaveamentos rápidos (Khandpur, 2006).

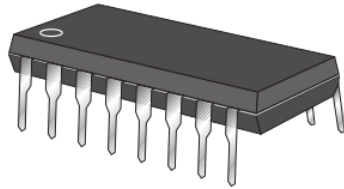
2.2.1.6 Circuitos integrados

Um Circuito Integrado (CI) é um tipo de circuito eletrônico composto por diversos componentes (ex.: resistores, capacitores, transistores, entre outros) em formas miniaturizadas, todos integrados em um único encapsulamento ou invólucro (*package*, comumente chamado de *chip*, em inglês). O encapsulamento pode apresentar uma alta densidade de componentes eletrônicos sobre uma base de Silício (Si) (Floyd, 2007; Khandpur, 2006). Existem diversos tipos de CIs, com diferentes tamanhos, tipos de pinagens e encapsulamentos. De modo geral, há dois tipos principais de CIs: analógicos e digitais. Os primeiros são CIs que processam sinais analógicos. São caracterizados por apresentarem sinais de saída proporcionais aos sinais de entrada. Exemplos de famílias de CIs desse tipo são: i) Amplificadores Operacionais (Amp Ops); ii) reguladores de tensão/corrente; iii) Conversores Analógicos-Digitais (A/Ds) e Conversores Digitais-Analógicos (D/As); iv) etc. Os CIs que processam sinais digitais estão presentes em todas as áreas da eletrônica atualmente: computadores, controle industrial, sistemas de comunicação, equipamentos médicos, entre muitas outras. Pode-se utilizar soquetes para instalar os CIs nas PCIs, uma vez que a utilização de soquetes permite realizar a substituição dos CIs, em caso de problemas, com uma grande facilidade e segurança da integridade física dessas PCIs (Khandpur, 2006; Frenzel, 2017).

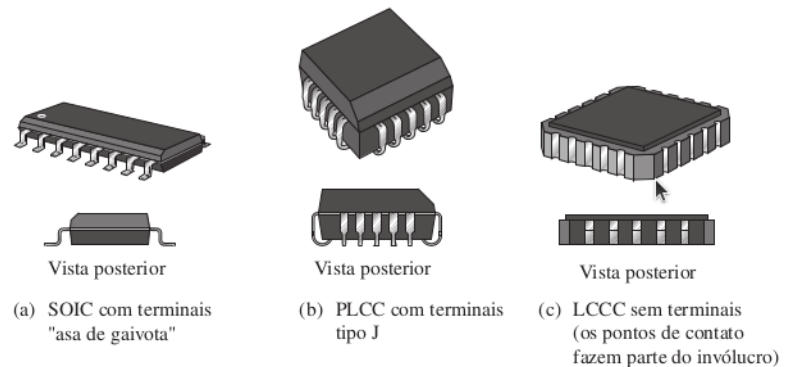
Os CIs estão disponíveis em diversos tipos de encapsulamentos ou invólucros. Alguns exemplos são mostrados nas Figuras 1–3. Considerando os CIs pertencentes à tecnologia de montagem através de furos (*Through-Hole Technology* (THT), em inglês), tem-se o encapsulamento *Dual In-line Package* (DIP) como o mais comum. Este tipo de encapsulamento possui os pinos dispostos em duas linhas paralelas. Com relação aos CIs da tecnologia de montagem em superfície (*Surface-Mount Technology* (SMT), em inglês), três encapsulamentos são mais comuns: i) *Small Outline Integrated Circuit* (SOIC), ii) *Plastic Lead Chip Carrier* (PLCC) e iii) *Leadless Ceramic Chip Carrier* (LCCC) (Floyd, 2007). Importa esclarecer que os tipos de encapsulamento mencionados não são os únicos que existem. Além disso, os CIs possuem diferentes números de terminais. Por exemplo, na Figura 1, tem-se um DIP16, ou seja, um encapsulamento DIP com 16 terminais. Na Figura 2, tem-se um SO16, um PLCC20 e um LCCC20. Todos os tipos de encapsulamento possuem um pequeno ponto, um entalhe ou uma borda chanfrada que permite fazer a correta identificação do pino 1, como ilustrado na Figura 3. A contagem dos pinos de um CI é feita sempre no sentido anti-horário (ver Figura 3).

Figura 2 – Exemplos de CIs. Encapsulamentos SMT.

Figura 1 – Exemplo de CI.
Encapsulamento DIP.

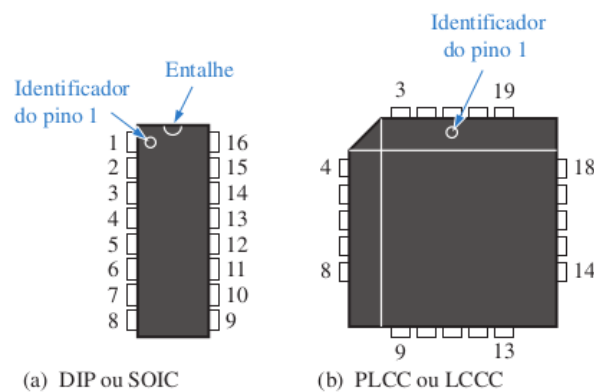


Fonte: Floyd (2007, p. 36).



Fonte: Floyd (2007, p. 37).

Figura 3 – Exemplo da numeração dos pinos de dois encapsulamentos distintos.



Fonte: Floyd (2007, p. 37).

Os CIs digitais são classificados de acordo com sua complexidade. A classificação considera o número de portas lógicas presentes no encapsulamento, isto é (Floyd, 2007):

- **Integração em pequena escala** (*Small-Scale Integration* (SSI), em inglês): CIs que possuem até dez circuitos de portas lógicas equivalentes por invólucro, como portas lógicas simples e *flip-flops*.
- **Integração em média escala** (*Medium-Scale Integration* (MSI), em inglês): CIs que possuem de 10 a 100 portas lógicas equivalentes por invólucro, como codificadores, decodificadores, registradores, multiplexadores, etc.
- **Integração em grande escala** (*Large-Scale Integration* (LSI), em inglês): CIs que possuem de 100 a 10k portas lógicas equivalentes por invólucro, como memórias, etc.
- **Integração em muito grande escala** (*Very Large-Scale Integration* (VLSI), em inglês): CIs que possuem de 10k a 100k portas lógicas equivalentes por invólucro.

- **Integração em ultra grande escala** (*Ultra Large-Scale Integration* (ULSI), em inglês): CIs que possuem mais de 100k portas lógicas equivalentes por invólucro, como microprocessadores, memórias de grande capacidade, etc.

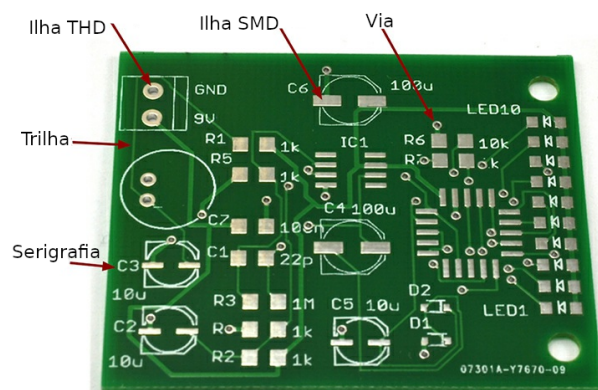
2.2.1.7 Conectores

Os conectores são utilizados para estabelecer conexões elétricas e mecânicas entre componentes da PCI e elementos externos a ela, ou entre diferentes partes de uma mesma PCI, permitindo a continuidade de sinais elétricos (Marks & Caterina, 2000; Khandpur, 2006). Existem diversos tipos de conectores, sendo um dos mais comuns o conector de pinos, que oferece encaixe mecânico fácil e rápido. Nesses conectores, a conexão elétrica é realizada através do encaixe de um pino condutor exposto, conhecido como plugue, em um terminal condutor parcialmente oculto, chamado receptor. Ao escolher um conector, deve-se considerar algumas características importantes como i) a quantidade de contatos disponível, ii) a temperatura máxima de operação, iii) a força necessária para conectar e desconectar, iv) a resistência elétrica no ponto de contato, v) a corrente máxima suportada e vi) a tensão máxima de isolamento (Marks & Caterina, 2000).

2.2.2 Composição de uma PCI

Esta subseção descreve a composição básica de uma PCI. A Figura 4 mostra um exemplo de PCI, onde se pode observar alguns dos elementos que são descritos em seguida.

Figura 4 – Anatomia (componentes) de uma PCI.



Fonte: Adaptada de Monk (2014).

2.2.2.1 Condutor

É o componente que provê a interligação elétrica entre os componentes e pontos para solda de seus terminais (Khandpur, 2006; Scarpino, 2014). Comumente, utiliza-se o cobre como material condutor devido à sua relação de custo e boas propriedades elétricas (Scarpino, 2014).

2.2.2.2 Base

A base é o componente da placa feito de material isolante, também conhecido por substrato, responsável por fornecer suporte aos componentes que serão montados nela e às trilhas condutoras do circuito, além de isolar eletricamente as trilhas adjacentes (Khandpur, 2006; Scarpino, 2014; Mitzner et al., 2019). Costuma-se utilizar como substrato FR-2 e FR-3, laminados de fenolite, e FR-4, um laminado de fibra de vidro ou resina epóxi resistente a fogo (Mitzner et al., 2019). Ver a Figura 4.

2.2.2.3 Trilhas

As trilhas são os caminhos condutores através dos quais os sinais são transmitidos pela placa (Dalmaris, 2021). Servem de alimentação elétrica também, especialmente quando não há planos (camadas inteiras, *layers*, em inglês) de referência (terra ou *ground* (GND), em inglês) e de alimentação elétrica (ex.: 3,3 V; 5 V; ± 12 V; etc.). Elas se iniciam e terminam nas ilhas dos componentes (ver Figura 4). Do ponto de vista do roteamento da placa, deve-se levar em consideração suas características como largura e comprimento, além dos ângulos formados durante o roteamento do caminho (Dalmaris, 2021).

2.2.2.4 Ilhas

As ilhas são pequenas áreas de cobre onde os terminais dos componentes são soldados, permitindo a conexão dos componentes às trilhas (ver Figura 4). Elas possuem formatos diversos (ex.: oval, redondo, quadrado, entre outros). As ilhas também podem servir como pontos específicos através dos quais se realizam medições, testes e calibrações de circuitos.

2.2.2.5 Vias

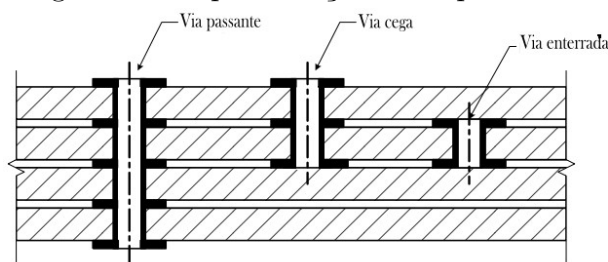
As vias são furos metalizados, geralmente com diâmetro (muito) menor que o dos outros furos como das ilhas, que permitem o fluxo de sinal ou alimentação elétricos entre camadas e/ou faces de uma PCI (ver Figura 4). Classificam-se as vias de acordo com o modo como o furo é realizado (Scarpino, 2014). Apesar de existirem outros tipos de vias, três delas são mais comumente encontradas em PCIs (Marks & Caterina, 2000):

- **Via passante** (*through-out via*, em inglês): Via que interliga as faces (camadas mais externas) e também as camadas internas de uma PCI. Costuma-se chamá-la apenas de **via**. Devido ao seu menor custo em relação às outras, é a mais utilizada.
- **Via cega** (*blind via*, em inglês): Via que conecta uma face a pelo menos uma camada interna de uma PCI. Marks & Caterina (2000) ressaltam seu uso quando há necessidade de isolar circuitos críticos.

- **Via enterrada** (*buried via*, em inglês): Via também chamada de **via interna**, é utilizada para conectar duas ou mais camadas internas de uma PCI. Costuma-se encontrá-la apenas em PCIs com alta densidade de componentes.

A Figura 5 ilustra os tipos de vias mencionados acima e suas diferenças.

Figura 5 – Representação dos tipos de vias.



Fonte: Adaptada de Marks & Caterina (2000).

2.2.2.6 Serigrafia

São elementos gráficos (ex.: letras, números, linhas e imagens; ver Figura 4) adicionados à arte final da PCI com o objetivo de acrescentar informações ou até mesmo por questões estéticas (Dalmaris, 2021). É muito utilizada para identificar os componentes em uma PCI, pareando-os com os componentes do diagrama esquemático do circuito eletrônico correspondente, e para identificar pinos de CIs e conectores. As cores normalmente disponíveis são branco, amarelo e a preto (Dalmaris, 2021).

2.2.2.7 Máscara de solda

A máscara de solda, uma camada fina de um polímero, geralmente verde ou azul, mas disponível em diversas cores (ex.: branca, preta, lilás e vermelha), é aplicada sobre toda a face da Placa de Circuito Impresso, excetuando-se sobre as ilhas e os furos, para protegê-la de oxidar, e, além disso, facilitar a soldagem e prevenir a ocorrência de curtos-circuitos pela formação de pontes de estanho entre as ilhas, pois não ocorre a aderência da solda (Dalmaris, 2021). Ver a Figura 4.

2.3 Tipos de PCIs

2.3.1 Classificações

As formas mais comuns de classificação de uma PCI são as seguintes: i) quanto ao número de camadas condutoras (ex.: face simples, dupla face ou multicamadas); ii) quanto à tecnologia de montagem utilizada (ex.: montagem em superfície, montagem através de furos ou mista); e iii) quanto ao tipo do material utilizado como substrato (ex.: rígido, flexível ou rígido-flexível) (Khandpur, 2006). Outras classificações ainda possíveis são: iv)

quanto à natureza do circuito (ex.: analógico, digital, misto, alta frequência, micro-ondas, etc); e v) quanto à complexidade e/ou densidade de componentes (ex.: baixa, média ou alta) ([Marks & Caterina, 2000](#)).

2.3.1.1 PCI de face simples

Este tipo de PCI é o mais simples de se entender e fabricar ([Scarpino, 2014](#)). Este tipo de PCI possui apenas uma de suas faces com condutor. O lado onde os componentes são soldados é chamado de Lado da Solda (LS), o outro lado é denominado Lado dos Componentes (LC). Nela é comum a utilização de *jumppers*¹ para saltar trilhas já existentes, permitindo a conexão com outras trilhas sem que essas se interseccionem. Quando possível, utilizam-se os próprios componentes para realizar esses saltos ([Khandpur, 2006](#)).

2.3.1.2 PCI de dupla face

PCIs de dupla face possuem trilhas condutoras em ambas camadas externas, isto é, nas duas faces visíveis, faces superior e inferior, e geralmente uma alta densidade de componentes, pois, nesse caso, apenas uma face não costuma ser suficiente para realizar o roteamento da placa, sendo necessária a utilização de trilhas condutoras em ambas as faces para evitar o cruzamento de trilhas ([Scarpino, 2014](#); [Khandpur, 2006](#)). Segundo [Khandpur \(2006\)](#), essas PCIs podem ser de dois tipos: i) de dupla face com furos metalizados (vias) para realizar a conexão elétrica entre as faces superior e inferior e ii) de dupla face sem furos metalizados, nas quais os terminais dos componentes são utilizados para realizar as conexões, soldando-os em ambas faces ([Khandpur, 2006](#)).

2.3.1.3 PCI multicamadas

São PCI constituídas por um ou mais núcleos, que são substratos revestidos por uma ou duas camadas condutoras ([Mitzner et al., 2019](#)), separados por um material isolante muito fino conhecido por *prepreg* ([Khandpur, 2006](#)). Esse tipo de PCI é utilizado quando há uma grande densidade de componentes, necessitando-se mais do que duas camadas para realizar o roteamento do circuito, algumas especificidades com relação a ruídos ou interferência (*crosstalk*, em inglês), além de situações em que se necessita de camadas específicas como planos de referência (terra ou GND) ou de alimentação elétrica, por exemplo ([Khandpur, 2006](#); [Scarpino, 2014](#)). Para realizar a interligação elétrica entre as camadas, quando necessário, utilizam-se vias, como descrito na [Subsubseção 2.2.2.5](#).

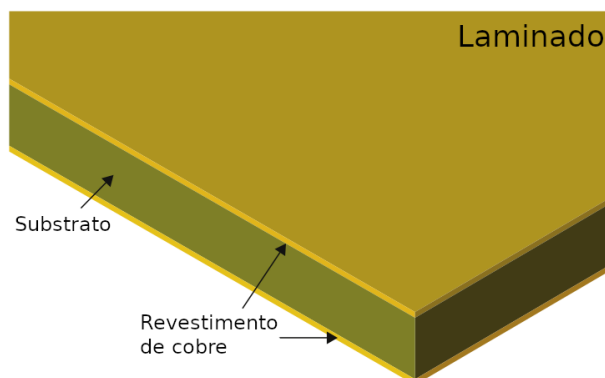
¹ O *jumper* é um condutor que salta sobre trilhas já posicionadas, permitindo a continuidade de uma trilha condutora de sinal elétrico. É utilizado em situações nas quais outras alternativas são menos desejáveis ou inexistentes, como trilhas excessivamente longas ou inexistência de espaço para se traçar outras trilhas.

2.3.2 Materiais de uma PCI

Existem diversos materiais dielétricos disponíveis para serem utilizados como substrato. Sua escolha é um ponto crucial no projeto de uma PCI ([Marks & Caterina, 2000](#)). Para fazer a escolha, é necessário considerar suas características elétricas e físicas, ou melhor, a adequação delas às necessidades do circuito que será montado na PCI, além de questões relativas à disponibilidade do material e ao seu custo de fabricação ([Marks & Caterina, 2000](#)). Os principais materiais utilizados são: i) fenolite (FR-2 e FR-3), ii) composite (CEM-1), iii) fibra de vidro (FR-4), iv) poliamida (GI) v) e politetrafluoretileno (PTFE) ([Marks & Caterina, 2000](#)).

Os laminados utilizados em uma PCI são compostos por uma mistura de materiais de reforço, como papel ou fibra de vidro, impregnados com resinas, geralmente epóxi ou fenólica, que adicionam rigidez e resistência mecânica a esses substratos ([Khandpur, 2006](#)). O laminado forma a base isolante que receberá a(s) camada(s) condutora(s), como mostrado na [Figura 6](#). A produção desses laminados envolve a compressão das camadas, sob calor e pressão, utilizando uma prensa hidráulica ([Khandpur, 2006](#)).

Figura 6 – Representação do laminado de uma PCI.



Fonte: Adaptada de [Mitzner et al. \(2019\)](#).

2.3.2.1 Tipos de laminados

Os principais tipos de laminados disponíveis e suas características são ([TEC-CI, 2023](#)):

- **Fenolite:** Composto de papelão impregnado com resina fenólica, utilizado principalmente em PCIs de face simples. Possui boa isolamento elétrica, mas não é indicado para ambientes com alta umidade, pois nesses ambientes pode ocorrer absorção de água, alterando essa propriedade essencial do substrato.

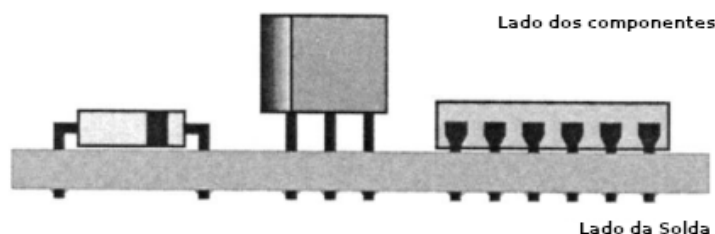
- **Fibra de vidro:** Conhecida como FR-4², costuma ser utilizada em PCIs comerciais de dupla face ou multicamadas, sendo, no segundo caso, o laminado mais viável economicamente. Possui boa resistência mecânica e boas propriedades dielétricas, além de baixa absorção de água em ambientes úmidos.
- **Composite:** Composto por tecido de fibra de vidro, papel impregnado e resina epóxi, exibe tonalidade amarelada. Possui propriedades mecânicas e dielétricas intermediárias em relação ao fenolite e à fibra de vidro.
- **Poliamida:** Indicada para a fabricação de circuitos impressos flexíveis devido à sua flexibilidade.
- **PTFE:** Politetrafluoretileno, conhecido pela marca comercial Teflon®, é indicado para circuitos de alta frequência.
- **Alumínio:** Conhecido também por *Metal Core* (MCPCB), costuma ser empregado em PCIs que necessitam de alta dissipação de calor.

2.3.3 Tecnologias de montagem

2.3.3.1 Montagem através de furos

Também conhecida como **montagem convencional**, esse tipo de montagem utiliza componentes cujos terminais são inseridos em uma das faces da PCI, isto é, pelo LC, atravessam as ilhas até atingirem a face oposta, ou seja, o LS, onde são soldados (Khandpur, 2006), como ilustrado na Figura 7. Em outras palavras, essa tecnologia de montagem utiliza componentes do tipo para montagem através de furos (*Through-Hole Devices* (THDs), em inglês). Tais componentes foram dominantes ao longo do século XX (Scarpino, 2014) e ainda são muito utilizados em PCIs amadoras ou em protótipos, uma vez que esses componentes são mais fáceis de soldar e de realizar reparos nas PCIs (Dalmaris, 2021).

Figura 7 – Ilustração da tecnologia de montagem THT.



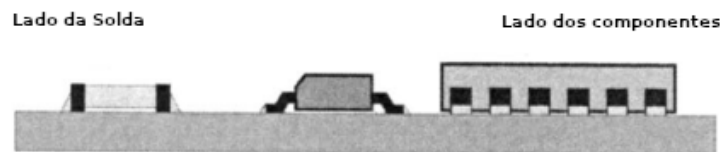
Fonte: Adaptada de O'Hara (1998).

² A sigla de *Flame Retardant* (FR), em inglês, indica, junto com o número que a sucede, qual a classe de retardamento de chamas à qual o material pertence.

2.3.3.2 Montagem em superfície

Essa tecnologia de montagem utiliza componentes do tipo para montagem em superfície, como ilustrado na [Figura 8](#). Ela é preferida para fabricação em grande escala e para placas de tamanho reduzido ([Dalmaris, 2021](#)), uma vez que os componentes para montagem em superfície são menores e mais baratos que suas versões para montagem através de furos, e não há necessidade de perfuração das PCIs para montá-los ([Monk, 2014](#); [Scarpino, 2014](#)).

Figura 8 – Ilustração da tecnologia de montagem SMT.



Fonte: Adaptada de [O'Hara \(1998\)](#).

2.4 Projeto de PCIs

Durante o projeto e o processo de roteamento de uma PCI, deve-se atentar a questões que envolvem aspectos diversos tais como mecânicos, elétricos, ambientais, funcionais, etc., dos quais se pode destacar ([Khandpur, 2006](#)):

- **Requisitos mecânicos:** Aspectos físicos dos componentes (ex.: largura, altura, formato, etc.), além da localização na PCI, tipo de tecnologia de montagem, otimização das dimensões da PCI, etc.
- **Requisitos elétricos:** Finalidade do circuito, características elétricas aceitáveis para os componentes (ex.: tolerância, tamanho, etc.), vias, ilhas e trilhas condutoras, etc.
- **Requisitos funcionais:** Ergonomia, interação entre o humano e o sistema (ex.: localização de botões, *displays*, etc.), facilidade de realizar manutenções, confiabilidade, etc.
- **Requisitos ambientais:** Susceptibilidade a vibrações, impactos mecânicos, altas ou baixas temperaturas, áreas marítimas, etc.

2.4.1 Etapas

[Dalmaris \(2021\)](#) sugere um guia de etapas para elaboração de uma PCI. O processo pode ser dividido em duas linhas, primeiramente em relação à criação do diagrama esquemático e, posteriormente, em relação ao roteamento da PCI.

Para a captura do diagrama esquemático, o autor sugere as seguintes etapas:

1. Realizar configurações de preferências pessoais do aplicativo utilizado, configurar a página e escolher a grade que será utilizada no projeto.
2. Adicionar os símbolos dos componentes disponíveis no programa utilizado e, se necessário, criar os símbolos faltantes.
3. Organizar os símbolos em blocos funcionais e associá-los aos *footprints* correspondentes.
4. Conectar os elementos através de “fios” ou de rótulos (*labels*).
5. Nomear as redes criadas pelas interconexões realizadas.
6. Checar se as regras elétricas definidas para o projeto foram obedecidas. Recursos para isso costumam ser disponibilizados pelos aplicativos através de funções como o *Electrical Rules Check* (ERC), em inglês.
7. Adicionar as informações textuais ou gráficas necessárias para eventuais complementações ou comentários.

Em relação ao roteamento da PCI, o autor sugere as seguintes etapas:

1. Realizar configurações de preferências pessoais do aplicativo utilizado e dos requisitos do projeto.
2. Importar os componentes adicionados no diagrama esquemático como *footprints*.
3. Delimitar o tamanho e a forma esperada para a PCI.
4. Dispor os *footprints* e ajustá-los em suas posições mais convenientes.
5. Rotear a PCI e criar as áreas de cobre.
6. Realizar ajustes e adicionar informações na camada de serigrafia.
7. Checar se as regras definidas para o projeto foram obedecidas e, em caso negativo, fazer os ajustes necessários para que sejam obedecidas.
8. Exportar os arquivos, geralmente em formato Gerber, para fabricação da PCI.

2.4.1.1 Arquivos em formato Gerber

Os arquivos em formato Gerber são utilizados para enviar o projeto de uma PCI para a fabricação. Eles podem ter formato padrão ou estendido (Varteresian, 2002; Scarpino, 2014). Esse tipo de arquivo tem seu formato definido no padrão RS-274X, que é conhecido como o formato Gerber estendido. O formato original foi desenvolvido pela empresa *Gerber*

Systems Corporation, que hoje pertence à companhia belga *Ucamco*. A empresa tem disponibilizado gratuitamente as especificações do formato em seu sítio eletrônico.

Cada ficheiro Gerber contém, em formato de texto com uma sintaxe própria, a geometria de uma camada pertencente à PCI, que informa ao sistema de fabricação parâmetros como forma, medidas e posição, entre outras coisas, de cada uma das geometrias ([Scarpino, 2014](#)). Um pequeno exemplo, adaptado de [Scarpino \(2014\)](#), é exibido a seguir:

```
%FSLAX24Y24*%
%M0IN*%
%ADD10C,0.8000*%
D10*
X5000Y5000D03
M02*
```

No exemplo dado, as primeiras linhas referem-se a configurações globais, como a definição de que todas as medidas estão em polegadas. Em seguida, um círculo de diâmetro igual a 0,8 polegadas é associado ao código D10. Então, são informadas as coordenadas (0,5; 0,5) para o código D10, sendo (0,0; 0,0) a origem. Por último, o final do arquivo é indicado. Mais detalhes podem ser encontrados em [Scarpino \(2014\)](#) ou na documentação disponibilizada pela empresa.

2.4.2 Diagramas elétricos ou eletrônicos

Alguns tipos de diagramas elétricos ou eletrônicos são comumente utilizados para descrever os circuitos elétricos ou eletrônicos de equipamentos. Dentre eles, destacam-se o diagrama de blocos, que abstrai o circuito, separando-o por blocos funcionais, e o diagrama esquemático, que descreve eletricamente o circuito e, geralmente, é mais complexo de se interpretar. Um diagrama menos comum de ser fornecido no produto final, mas presente no desenvolvimento do projeto, é o diagrama de leiaute, que trata da disposição física dos componentes e do roteamento da PCI.

2.4.2.1 Diagrama de blocos

Trata-se de um conjunto de representações, pouco detalhadas, porém representativas, dos subsistemas que compõe um equipamento e suas interconexões. Os blocos normalmente são representados por retângulos com um texto identificando de qual subsistema se trata. As conexões normalmente são representadas por flechas uni ou bidirecionais para indicar o fluxo dos sinais entre os subsistemas ([Khandpur, 2006](#); [Gibilisco, 2013](#)).

2.4.2.2 Diagrama esquemático

O diagrama esquemático, uma das primeiras etapas no projeto de uma PCI, é composto por diversos símbolos, que representam os componentes elétricos ou eletrônicos, e por linhas que os conectam, que caracterizam suas conexões elétricas no circuito (Khandpur, 2006; Gibilisco, 2013). Cabe observar que este tipo de diagrama não tem como objetivo fornecer características físicas ou mecânicas dos componentes (Khandpur, 2006).

Os símbolos gráficos são representações simplificadas dos componentes e costumam lembrar sua construção física ou alguma característica funcional. Junto a eles, há informações como uma identificação, denominada **designador de referência**, que é composta por uma ou mais letras — que identifica qual é o componente — e um número — que permite diferenciar entre componentes do mesmo tipo —, permitindo a correspondência única dos símbolos com os componentes no diagrama de leiaute, o valor, geralmente seguido de sua unidade, e, algumas vezes, informações adicionais. Alguns possuem também identificação de sua pinagem e de sua identificação, como os CIs e conectores, por exemplo (Khandpur, 2006; Varteresian, 2002).

Existem alguns institutos como o *American National Standards Institute* (ANSI), o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e a *International Electrotechnical Commission* (IEC) que contribuem introduzindo padronizações a respeito dos vários símbolos que podem ser utilizados para construir diagramas esquemáticos e as letras correspondentes a cada tipo de componente no designador de referência (Khandpur, 2006). Na Tabela 1, são apresentadas as letras padronizadas para os designadores de alguns componentes comumente utilizados.

O processo de criação do diagrama esquemático, ou de captura de esquemático — termo também utilizado —, consiste, essencialmente, de três etapas: i) inserir ou criar o símbolo correspondente ao componente; ii) posicioná-lo no diagrama; e iii) realizar as conexões entre os símbolos (Varteresian, 2002). Ver Subseção 2.4.1. Nesse processo, deve-se considerar alguns aspectos, denominados **boas práticas**, dentre os quais destacam-se: i) as tensões elétricas dos subcircuitos representados no diagrama costumam diminuir de cima para baixo no diagrama; ii) as entradas dos sinais encontram-se à esquerda e as saídas à direita, ou seja, o sinal flui da esquerda para direita; iii) CIs que englobam, fisicamente, um mesmo elemento, devem adicionar uma letra ao final do designador de referência de cada componente para associar a qual elemento do encapsulamento ele se refere. Na Figura 9 são exibidos alguns símbolos de componentes presentes no diagrama.

2.4.2.3 Diagrama de leiaute

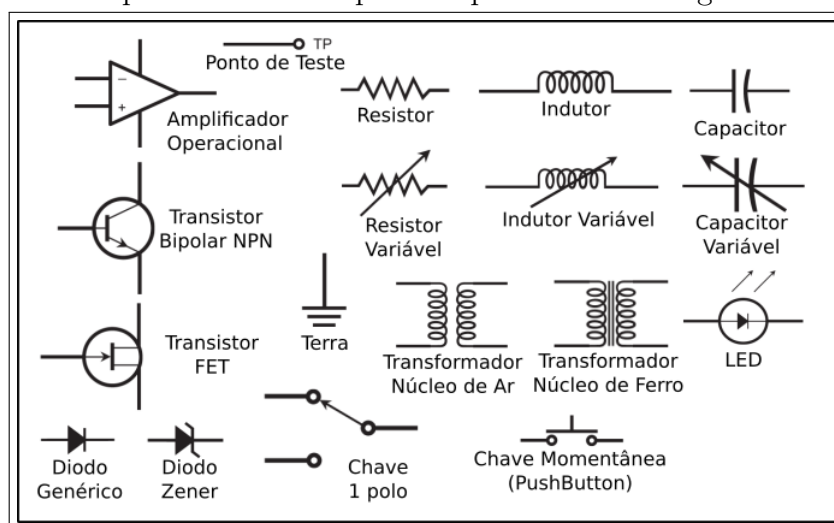
Após a realização da captura do esquemático, segue-se para o desenvolvimento do diagrama de leiaute (*layout diagram*, em inglês) da PCI (Gibilisco, 2013). Nele, os compo-

Tabela 1 – Alguns exemplos comuns de designadores de referência.

Componente	Designador
Amplificador	AR
Bateria	BT
Capacitor	C
Chave	S
Circuito integrado	U ou IC
Conectores	J ou P
Diodo	D ou CR
Emissor de Luz	DS (display)
Retificador	D ou CR
Zener	D ou VR
Fusível	F
Indutor	L
Instrumento de medição	M
<i>Jumper</i>	W, P ou R
Microprocessador	U
Motor ou ventoinha	B
Plugue ou conector macho	P
Ponto de teste	TP
Potenciômetro	R
Resistência	R
Termistor	RT
Transformador	T
Transistor	Q

Fonte: [Khandpur \(2006\)](#).

Figura 9 – Exemplos de símbolos padrões presentes em diagramas esquemáticos.



Fonte: Adaptada de [Gibilisco \(2013\)](#).

nentes previamente inseridos no diagrama esquemático são acrescentados, cujo símbolos, agora, consideram aspectos físicos, tais como sua forma e dimensão, depois são posicionados

e interligados eletricamente através de trilhas condutoras — o processo chamado de roteamento da PCI. Ver [Subseção 2.4.1](#). As representações físicas dos componentes, utilizadas no diagrama, são denominadas *footprints* ([Varteresian, 2002](#)).

Os *footprints* normalmente são compostos por elementos pertencentes a diferentes camadas da PCI. Os símbolos, em geral, possuem um designador de referência que se relaciona com um componente no diagrama esquemático (ver [Tabela 1](#)), as ilhas, a serigrafia da forma do componente e, por vezes, alguma outra informação, como polaridade ou identificação de algum pino específico.

Algumas boas práticas que devem ser consideradas durante o processo de captura do diagrama esquemático incluem ([Khandpur, 2006](#)):

- O diagrama esquemático deve apresentar um fluxo de sinal da esquerda (entrada) para a direita (saída).
- As tensões elétricas mais elevadas devem ser representadas acima das tensões mais baixas, ou seja, as tensões elétricas dos subcircuitos representados no diagrama esquemático devem aumentar de baixo para cima.
- Deve-se evitar, sempre que possível, o cruzamento das linhas que interligam os elementos, pois pode-se confundir um cruzamento com uma junção.
- Em CIs com mais de um elemento, deve-se adicionar uma letra após o número identificador no designador de referência. Por exemplo, um CI denotado por U1, contendo quatro Amp Ops individuais, deverá ser identificado pelos designadores de referência “U1A”, “U1B”, “U1C” e “U1D”.

2.5 Leiaute da PCI

Dispor os componentes na PCI é uma etapa crítica, pois as escolhas feitas influenciam tanto o modo como as trilhas serão traçadas quanto questões relativas à fabricação, montagem dos componentes e futuras manutenções e reparos ([Marks & Caterina, 2000](#)). As ações de alocar os componentes e realizar a interligação elétrica deles (roteamento) são referidas na literatura como leiaute da PCI. Para que o circuito funcione corretamente, é necessário que todas essas etapas sejam realizadas cuidadosamente ([Varteresian, 2002](#)).

2.5.1 Posicionamento dos componentes

Uma vez que o posicionamento dos componentes afeta diretamente o roteamento de uma PCI, suas formas de teste e manutenção, e sua fabricabilidade e montagem, essa etapa torna-se uma das mais críticas de todo o projeto ([Marks & Caterina, 2000](#)). Além disso, algumas características da PCI, como a tecnologia de montagem adotada, tipo de

utilização e método de soldagem dos componentes, influenciam diretamente o processo de posicionamento dos componentes (Mitzner et al., 2019).

Os autores Khandpur (2006), Mitzen et al. (2019), Bogatin (2021) e Varteresian (2002) fazem recomendações acerca da alocação dos componentes. Um compilado de algumas das boas práticas descritas por esses autores é:

- As conexões entre os componentes de uma PCI e de fora dela devem ser realizadas próximas à bordas da PCI.
- De modo geral, sugere-se alocar primeiramente os componentes fixos, como conectores, dissipadores de calor e outros e, então, posicionar os componentes ligados a eles.
- Em circuitos sensíveis, os componentes críticos devem ser alocados primeiro. Nos menos críticos, uma boa prática é posicionar os componentes de acordo com o fluxo de sinais. Sugere-se, ainda, quando possível, alocar próximos uns dos outros os componentes interligados eletricamente, tal como no diagrama esquemático, pois essa proximidade entre eles possibilita a redução do comprimento das trilhas.
- Recomenda-se posicionar os componentes maiores, como microcontroladores, por exemplo, antes dos componentes menores, como resistores e capacitores, por exemplo, aproveitando-se os espaços disponíveis entre os componentes maiores.
- Costuma-se, também, alocar primeiro os componentes que possuem diversas conexões, de modo que os componentes interligados a eles possam ficar próximos.
- Deve-se ter atenção ao posicionamento próximo de elementos associados, isto é, capacitores de desacoplamento devem ficar bem próximos aos pinos dos CIs cujos sinais e linhas de alimentação devem filtrar, LEDs devem ficar próximos àquilo que se deseja indicar, pontos de teste (*Test Points* (TPs), em inglês) devem ficar próximos aos sinais que interessa medir/testar, etc.
- Recomenda-se, sempre que possível, utilizar a grade de 2,54 mm para dispor os componentes, pois ela corresponde a 100 mils³ — outra unidade muito utilizada nesse contexto e também disponível nos programas de edição de PCIs — que corresponde à distância padrão entre os pinos do encapsulamento DIP de CIs. Recomenda-se, ainda, manter os componentes alinhados — em linhas e/ou colunas — e espaçados uniformemente, para uma visualização mais harmônica.
- Em PCIs que receberão soldagem por máquinas, os componentes THT devem, preferencialmente, estar no lado oposto ao da solda.

³ 1 mil corresponde a um milésimo de polegada.

- Componentes polarizados, como diodos e capacitores, devem ficar orientados de modo consistente para facilitar os testes.
- Cada componente deve ser alocado de modo que, se necessária uma futura substituição dele, não seja necessário dessoldar outros componentes ao redor para que seja possível retirá-lo da PCI.
- Requisitos elétricos normalmente têm preferência em relação aos requisitos mecânicos.
- Deve-se atentar, no processo de alocação, para a separação dos circuitos analógicos e digitais, e circuitos de baixa e alta potência, de baixa e alta frequência, etc.

2.5.2 Roteamento da PCI

[Varteresian \(2002\)](#) enfatiza que não há como classificar um roteamento como “bom” ou “ruim”, mas que existem alguns aspectos que, se considerados, permitem obter resultados melhores.

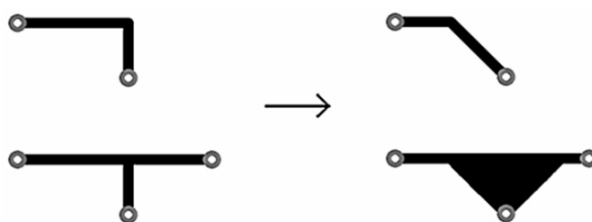
O posicionamento dos componentes é feito em uma etapa anterior à de roteamento, entretanto, diante da possibilidade de realizar um roteamento melhor, pode ser necessário o reposicionamento de alguns dos componentes durante o processo de roteamento ([Marks & Caterina, 2000](#)).

Existem muitas maneiras de se realizar o roteamento e, por isso, alguns podem resultar em uma maior presença de ruídos. Dessa maneira, existem algumas recomendações que podem fazer com que o roteamento resulte no bom funcionamento do circuito, com pouco ruído ([Bogatin, 2021](#)). Algumas dessas recomendações são reproduzidas a seguir ([Khandpur, 2006](#); [De Lima & Villaça, 2012](#)):

- Sempre traçar trilhas com o menor comprimento possível, uma vez que trilhas longas podem captar mais ruídos elétricos. Ver [Figura 10](#).
- Dimensionar as trilhas, ilhas e vias considerando as tensões e correntes a que estarão submetidas.
- Desenhar, sempre que possível, polígonos nas trilhas de (maior) potência e, em alguns casos, nas de sinais também. Ver [Figura 10](#).
- As trilhas não devem formar ângulos agudos, pois podem resultar em falhas na remoção do cobre. Ver [Figura 10](#).
- Deve-se evitar também mudança de direção das trilhas formando ângulos de 90°. Costuma-se realizar mudanças de 45°, por questões de melhores características elétricas, além de ser um menor comprimento.

- Quando o condutor passar entre ilhas ou outras áreas condutoras, o espaçamento deve ser igualmente distribuído.
- Deve-se aplicar o espaçamento mínimo apenas onde necessário; fora isso, deve-se ter um maior espaçamento entre os condutores.
- Em PCIs de dupla face, é comum traçar as trilhas em um dos lados na direção horizontal ou vertical e, do lado oposto, na direção vertical ou horizontal.
- Atentar ao dimensionamento dos condutores de alimentação e de referência, pois eles podem apresentar perdas resistivas significativas durante o funcionamento do circuito que resultam em instabilidades de alimentação ou referência, com prejuízo do funcionamento do circuito. Esse cuidado deve ser ainda maior em circuitos com sinais digitais e de alta frequência.

Figura 10 – Boas práticas de roteamento.



Fonte: [De Lima & Villaça \(2012\)](#).

Segundo [Varteresian \(2002\)](#), trilhas ou planos de referência (terra ou GND) são pontos principais de atenção em uma PCI, pois todos os sinais, em algum momento, passarão por eles. O autor afirma também que uma PCI sem um terra sólido pode não ter uma tensão de referência fixa. Desse modo, o roteamento do sinal de terra deve ser feito com trilhas mais largas, pois trilhas finas apresentam impedâncias mais altas e, em altas frequências, são menos indutivas. Nesse contexto, uma solução melhor que trilhas mais largas são os chamados planos de terra ([Varteresian, 2002](#)).

2.5.2.1 Plano de referência

Um plano, no contexto das PCIs, é uma região sólida de cobre ([Khandpur, 2006](#)). Assim, um plano de terra é um plano de referência para as tensões elétricas (0 V) ([Khandpur, 2006](#); [Varteresian, 2002](#)). Caso não seja possível dedicar um plano inteiro, deve-se adicionar áreas extensas de cobre ligadas ao GND em ambas faces da placa, traçando apenas trilhas curtas em um dos lados, geralmente o LS, para que, pelo menos em um dos lados, a trilha de referência seja praticamente contínua ([Bogatin, 2021](#); [Varteresian, 2002](#)). As regiões em ambas as faces podem ser conectadas eletricamente utilizando-se vias, ou através dos terminais de componentes montados através de furos (THT), pois essas áreas i) fornecem

proteção contra interferências externas, ii) diminuem o acoplamento entre trilhas ruidosas e iii) fornecem um caminho para escoamento da eletricidade estática na PCI. Além disso, essas áreas reduzem a quantidade de cobre que deve ser retirada da placa no processo de fabricação. Uma observação importante que o autor faz é em relação às ilhas de cobre isoladas — sem conexão elétrica com o terra — que podem causar interferências ou ruídos, pois podem tornar-se grandes antenas ou acopladores de sinais ruidosos (Varteresian, 2002). Atualmente, é mais comum se utilizar o termo “plano de referência”, ficando o termo “plano de terra” reservado somente aos casos onde realmente há uma conexão elétrica com o aterramento (Mitzner et al., 2019).

2.6 Integridade de sinal

As linhas de transmissão — nesse caso, as trilhas — conduzem sinais de um ponto a outro de uma PCI. A integridade do sinal diz respeito à garantia de que as formas de onda na saída permaneçam idênticas, ou muito semelhantes, às da entrada, ou seja, que não haja distorção do sinal, independentemente da frequência, ao longo de uma trilha (Paul, 2006; Brooks, 2003).

2.6.1 Ruídos elétricos

A interconexão elétrica entre os componentes de um circuito sempre acarreta alguma perda de desempenho, pois sempre possibilita a entrada de ruído eletromagnético no circuito elétrico (Bogatin, 2021). Um ruído acontece quando um sinal interfere em outro, fazendo com que ele se apresente diferente do esperado/desejado (Ott, 2011; Mitzner et al., 2019). Segundo Mitzner et al. (2019), há duas categorias de ruídos: i) ruído de fundo/ambiental (*background noise*, em inglês), quando sinais que têm origem em circuitos elétricos fisicamente próximos ou no ambiente interferem no funcionamento esperado/desejado, e ii) ruído intrínseco dos componentes, que se referem a questões térmicas, construtivas e de interconexão entre os componentes.

2.6.2 Integridade de energia

A integridade de energia refere-se ao estudo da eficácia e dos problemas relacionados, simplificada, à distribuição de energia da fonte às cargas, incluindo quaisquer componentes que entreguem energia e suas interconexões (DiBene, 2014; Bogatin, 2018).

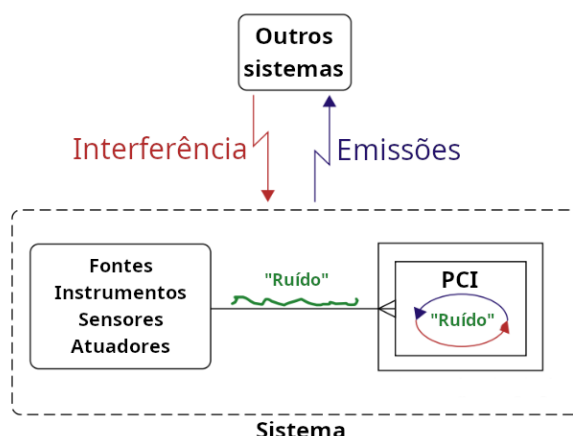
2.6.3 Compatibilidade eletromagnética

Paul (2006) afirma que um sistema é eletromagneticamente compatível com o ambiente (eletromagnético) se ele: i) não causa interferência em outro sistema no ambiente e nem em si mesmo; e ii) não é susceptível a emissões de outros sistemas. A Compatibilidade

Eletromagnética (CEM) pode ser agrupada em interna ou externa. A categoria interna compreende degradações de sinal causadas através dos caminhos de transmissão, incluindo acoplamentos parasitas entre circuitos, problemas conhecidos por reflexões e diafonia (*crosstalk*, em Inglês). A categoria externa engloba os problemas de emissões e imunidade (Montrose, 2000). A Figura 11 facilita a compreensão destes conceitos.

Três estágios da CEM que devem ser considerados no leiaute de uma PCI são: geração, transmissão e recepção de energia eletromagnética. A fonte é responsável pela emissão, que é recebida pelo receptor através de um caminho de acoplamento, o que pode resultar em interferência eletromagnética, ocasionando um comportamento inesperado/indesejado do receptor (Paul, 2006). Circuitos digitais de alta frequência são as principais fontes de radiação eletromagnética. Nesses circuitos, as trilhas podem funcionar como antenas, fato que torna o tamanho da trilha um aspecto importante no projeto de uma PCI (Khandpur, 2006). A transferência de energia eletromagnética pode ser agrupada em: i) emissão irradiada, ii) emissão conduzida, e iii) susceptibilidade à irradiação e susceptibilidade à condução (Paul, 2006).

Figura 11 – Representação de tipos de Interferência Eletromagnética (IEM).



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

A emissão refere-se à situação em que um equipamento pode causar interferência eletromagnética em outros ou em seu próprio ambiente eletromagnético.

- **Emissão irradiada:** Não é necessário um meio físico e a energia é transmitida através de ondas eletromagnéticas.
- **Emissão conduzida:** A energia é transmitida por meios físicos, como cabos e fios condutores elétricos.

Susceptibilidade refere-se à situação em que um equipamento pode ser um receptor de ruídos elétricos, como IEMs ou descargas eletrostáticas. Imunidade, por outro lado, é a capacidade de um circuito ou equipamento elétrico operar satisfatoriamente na presença

de IEM, com um nível de desempenho pré-definido. Quando um sistema não é imune, ele é susceptível, e a susceptibilidade expressa sua propensão a ser corrompido por IEMs (Montrose, 2000; Ott, 2011).

2.6.4 Diafonia

Diafonia é um termo utilizado em língua portuguesa para descrever o acoplamento eletromagnético indesejado (capacitivo ou indutivo) entre trilhas adjacentes, fios, trilha e fio, e quaisquer outros componentes de um circuito elétrico sujeitos a distúrbios eletromagnéticos (Montrose, 2000; Bogatin, 2018). Para ocorrer tal fenômeno, são necessários três condutores: fonte, “vítima” e referência. A linha de referência, comum entre as linhas “agressora” e “vítima”, permite que aconteça um acoplamento indutivo ou capacitivo entre elas (Montrose, 2000). Uma forma de minimizar tais efeitos é estabelecer um plano de referência amplo e uniforme (Bogatin, 2018).

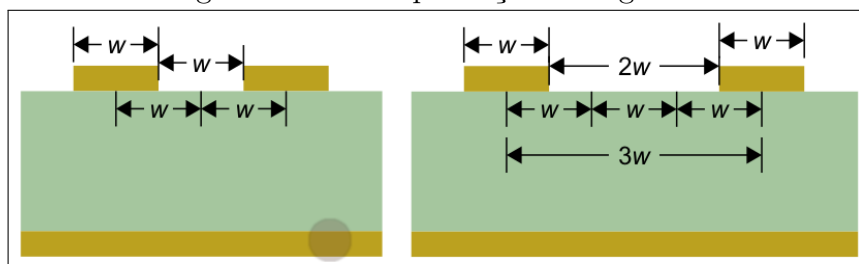
2.6.4.1 Técnicas de prevenção de diafonia

Segundo Montrose (2000), existem algumas boas práticas no projeto do leiaute de PCIs que ajudam a prevenir *crosstalk*. Algumas dessas recomendações são:

- Agrupar famílias lógicas de acordo com suas funcionalidades.
- Reduzir a distância física entre os componentes durante suas alocações.
- Reduzir o comprimento de trilhas paralelas, evitando-as quando possível ou distanciando-as suficientemente para que não haja acoplamento entre elas.
- Alocar componentes distantes de conexões de Entrada-Saída(E/S) e de áreas suscetíveis a acoplamentos.
- Reduzir a distância da trilha de sinal para a referência (terra ou GND).
- Em placas multicamadas, recomenda-se rotear as trilhas de camadas adjacentes ortogonais uma à outra. Além disso, nessas placas, sugere-se separar fontes de ruídos (osciladores, E/S, etc.) em diferentes camadas.

Outra técnica que pode ser utilizada, menos complexa, é a chamada “Regra 3-W”. Ela possibilita minimizar o acoplamento entre as trilhas. A técnica consiste em separar as trilhas em, pelo menos, três vezes a largura (*width*, em inglês) de uma trilha, medida do centro à borda da trilha (Montrose, 2000). A Figura 12 mostra exemplos tanto do distanciamento adotado convencionalmente quanto o determinado pela regra 3-W.

Figura 12 – Exemplificação da regra 3-W.



Fonte: (Mitzner et al., 2019).

2.6.5 Capacitores de desacoplamento

O uso de capacitores de desacoplamento em PCIs é amplamente realizado, visando garantir a integridade dos sinais, além de reduzir as IEMs. A recomendação é de se utilizar pelo menos um capacitor de desacoplamento ligado a cada pino de alimentação dos CIs. Escolhas bastante comuns de valores para esses capacitores são de 0,01 μF e 0,1 μF (Archambeault & Drewniak, 2013). Além disso, é bastante comum o uso de mais do que um capacitor em paralelo.

A justificativa para o uso desses capacitores é que eles armazenam cargas elétricas localmente, próximas aos pinos de alimentação elétrica dos CIs, e então fornecem corrente aos CI quando eles alteram seus estados lógicos. Por isso, recomenda-se que esses capacitores sejam alocados o mais próximo possíveis dos CI, também para que possam fornecer um caminho de baixa impedância dos pinos do CI até o plano de referência (terra ou GND). Outra observação é que os capacitores utilizados para essa função devem possuir baixa resistência em série equivalente (*Equivalent Series Resistance* (ESR), em inglês), como os capacitores de dielétricos cerâmicos, e também baixa indutância em série equivalente (*Equivalent Series Inductance* (ESL), em inglês) (Archambeault & Drewniak, 2013). Apesar da ênfase dada na utilização com CIs, na verdade, capacitores de desacoplamento devem ser utilizados junto a quaisquer componentes que experimentem transições rápidas de níveis lógicos (Montrose, 2000).

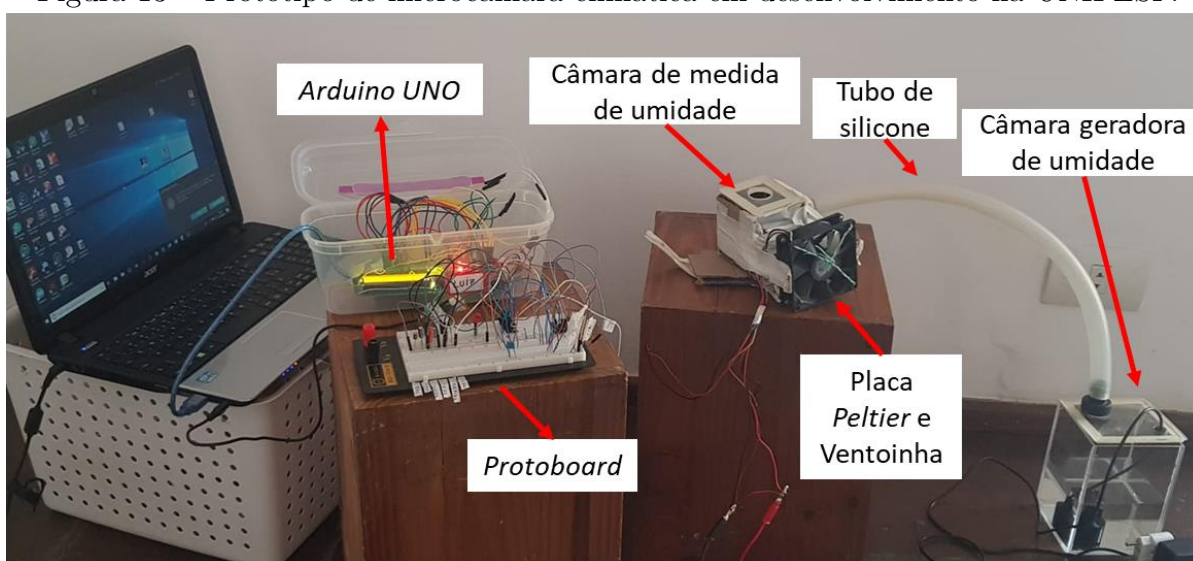
3 PCI para um protótipo de sistema de controle automático da umidade relativa do ar dentro de uma microcâmara climática

3.1 Introdução

Uma das linhas de pesquisa em que o Prof. Rogério de A. Vieira, do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), campus Diadema/SP, atua é voltada ao estudo e desenvolvimento de materiais cerâmicos com propriedades elétricas, que os caracterizam como potencialmente empregáveis em aplicações de sensoriamento tais como sensores eletrônicos de umidade, entre outros. Entre outras composições químicas, Prof. Rogério, seus colegas do referido instituto e seus orientados dedicam-se ao estudo de cerâmicas de molibdato de estrôncio (SrMoO_4) como sensores de umidade relativa do ar atmosférico (Braga, 2022).

Ao procurar no mercado nacional de equipamentos para laboratórios, os pesquisadores citados não conseguiram encontrar uma microcâmara climática que atendesse suas necessidades específicas de ensaios para estudar e validar as propriedades do sensor cerâmico de SrMoO_4 , dopado com gadolínio, como sensor de umidade. Somente câmaras climáticas maiores estão disponíveis comercialmente, porém seu custo é proibitivo. Assim, eles se viram obrigados a desenvolver a própria microcâmara climática, como aquela que é mostrada do centro à direita na Figura 13. O Prof. Rogério então uniu forças com o Prof. Daniel de A. Fernandes, do Departamento de Energia Elétrica da UFJF, para completar o desenvolvimento da microcâmara climática, mais especificamente na tarefa de controlar a umidade relativa do ar dentro da microcâmara climática.

Figura 13 – Protótipo de microcâmara climática em desenvolvimento na UNIFESP.



Fonte: Braga (2022).

Uma câmara climática como as disponíveis comercialmente, dito de forma simplificada, é um tipo de equipamento automático utilizado para condicionar o ar contido no

interior de uma câmara isolada hermética, luminosa e termicamente do meio ambiente. Trabalha com pressões próximas à pressão atmosférica e é dotada de sistemas automáticos tanto de resfriamento e aquecimento quanto de umidificação e desumidificação do ar contido em seu interior (Vieira, 2021; Pires, 2020; Nascimento & Basso, 2019; Sousa, 2018). A temperatura do ar, sua umidade relativa e a pressão do vapor d'água são mutuamente dependentes entre si. O estudo das relações entre tais grandezas físicas é denominado psicrometria (Simões-Moreira & Neto, 2019; Dwyer, 2009). As dimensões do equipamento dependem em grande medida da finalidade à qual ele se destina, variando desde forma e tamanho similares aos de um refrigerador doméstico até uma sala ampla. Câmaras climáticas são utilizadas em centros de pesquisa, indústrias e universidades, nas áreas alimentícia, cosmética, eletrônica e microeletrônica, farmacêutica, química e petroquímica, entre outras. Permitem realizar ensaios de laboratório tais como: i) condições de envelhecimento ou tempo de prateleira (*shelf life*, em inglês) de alimentos, bebidas, combustíveis, cosméticos, medicamentos, plantas, sementes, etc.; ii) comportamento de insetos, pequenos animais e plantas; iii) durabilidade e exatidão de equipamentos em geral, especialmente eletrônicos ou que façam uso de componentes eletrônicos; e iv) calibração (exatidão e precisão) e certificação de sensores e padrões industriais e laboratoriais.

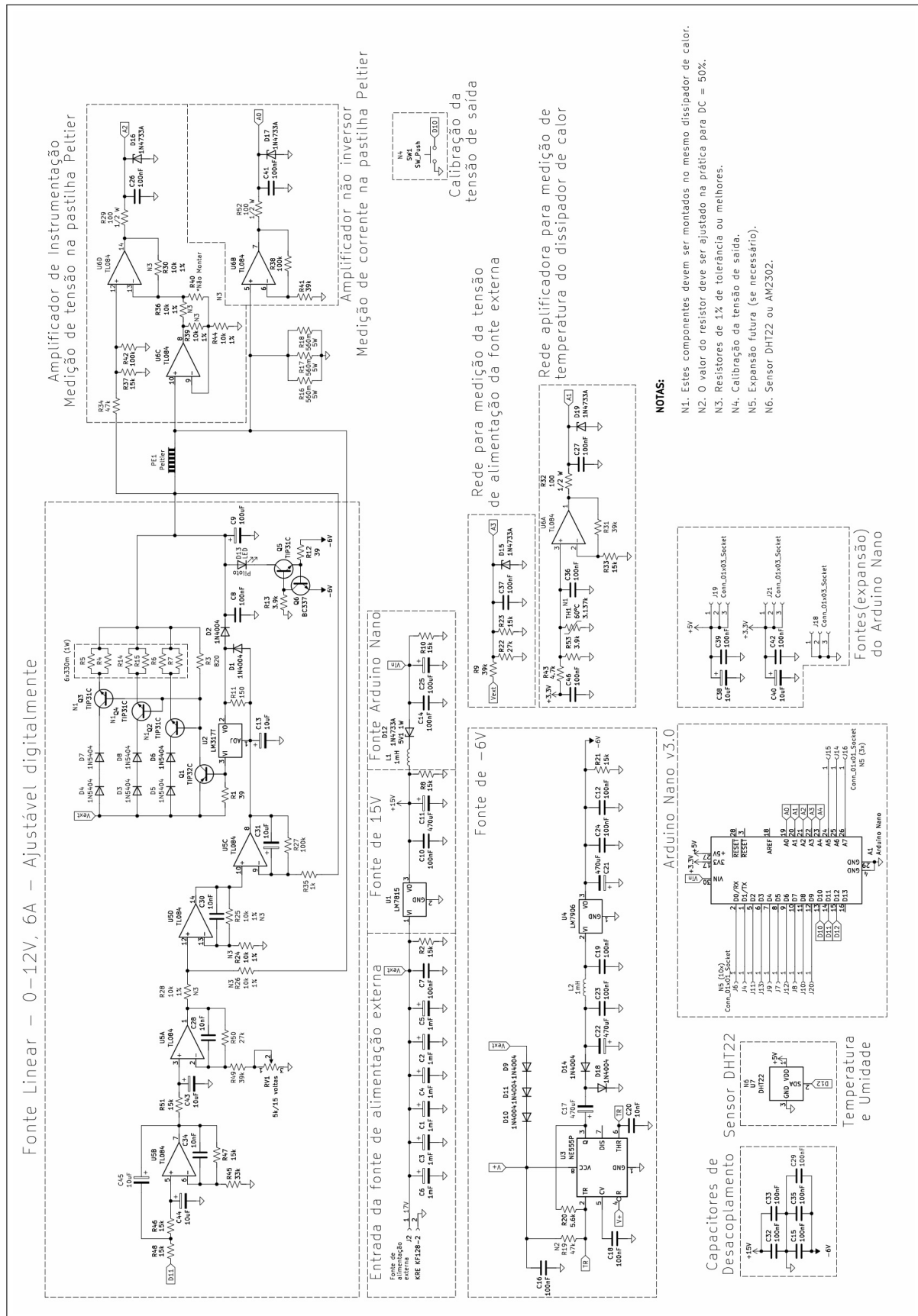
Tornou-se então necessário rotear uma PCI para um protótipo de sistema de controle automático (Castrucci et al., 2018; Dorf & Bishop, 2018; Nise, 2017) da umidade relativa do ar do protótipo de microcâmara climática mostrado na Figura 13. A concepção do circuito eletrônico e da PCI foram tais que o mesmo protótipo deve servir para controlar uma pastilha Peltier em Malha Aberta (MA) inicialmente e, posteriormente, permitir controlá-la em Malha Fechada (MF). Outros recursos, bem como ajustes necessários, poderão vir a ser incorporados posteriormente no circuito, e conseqüentemente na PCI, na medida em que o projeto do referido sistema de controle avance. A pastilha Peltier (Callister, Jr. & Rethwisch, 2020; Lineykin & Ben-Yaakov, 2005) é o elemento atuador responsável pelo resfriamento do ar encerrado na microcâmara.

3.2 Diagrama esquemático do circuito eletrônico

O diagrama esquemático do circuito eletrônico e o roteamento da PCI foram elaborados pelo autor utilizando o programa gratuito KiCad *Electronics Design Automation* (EDA) (KiCad Development Team, 2024; Dalmaris, 2021). O autor, porém, não foi responsável por projetar o circuito eletrônico. Mais detalhes sobre a PCI são fornecidos a seguir.

O diagrama esquemático da versão inicialmente proposta do circuito eletrônico é mostrado na Figura 14. Como mencionado anteriormente, à medida que o projeto avança, é possível que o circuito vá sofrendo algumas alterações e ajustes. Isso depende de todos os testes e ensaios que ainda serão realizados tanto na UFJF quanto na UNIFESP.

Figura 14 – Diagrama esquemático da versão inicial do circuito eletrônico.



Fonte: O Autor.

3.3 Breve descrição do circuito eletrônico

A principal função do circuito eletrônico é atuar como uma fonte linear ajustável com tensão de saída entre 0 e 12 V e potência máxima de 72 W. O ajuste é digital, realizado através da saída digital D11 de uma placa Arduino Nano v3.0, utilizando modulação por largura de pulso (*Pulse-Width Modulation* (PWM), em inglês). Com uma resolução de 8 *bits*, são possíveis 256 valores distintos entre 0 e 12 V. A tensão de saída é controlada pelo CI regulador de tensão LM317T. Os transistores de potência TIP31C e TIP32C (presentes no bloco da fonte linear, logo acima do regulador LM317T, na [Figura 14](#)), conectados basicamente como um par Sziklai¹, implementam um super transistor de potência operando na configuração de coletor comum ([Boylestad & Nashelsky, 2013](#); [Sedra & Smith, 2007](#)), ampliando assim a capacidade de fornecimento de corrente da fonte para 6 A. Como se trata de um protótipo, caso em que outros aspectos funcionais ainda estão sendo pesquisados e definidos, uma fonte linear foi considerada fundamental para alimentar a carga — pastilha Peltier responsável pelo resfriamento do ar no interior da microcâmara climática — com alta precisão e baixa ondulação tanto na tensão quanto na corrente. Vale mencionar que tanto o projeto do circuito eletrônico quanto da PCI seriam ambos mais desafiadores se uma fonte chaveada — conversor abaixador (*buck converter*, em inglês) — fosse utilizada no lugar da fonte linear escolhida ([Hart, 2011](#); [Rashid, 2015](#); [Marks & Caterina, 2000](#); [Khandpur, 2006](#)).

Outra função muito importante do circuito eletrônico é possibilitar medir simultaneamente e com precisão a tensão e a corrente na pastilha Peltier, pois tais medições, junto com outras ainda, são necessárias para modelar matematicamente o comportamento dinâmico da microcâmara climática. Posteriormente, o modelo matemático será utilizado para implementar o sistema de controle em MF desejado.

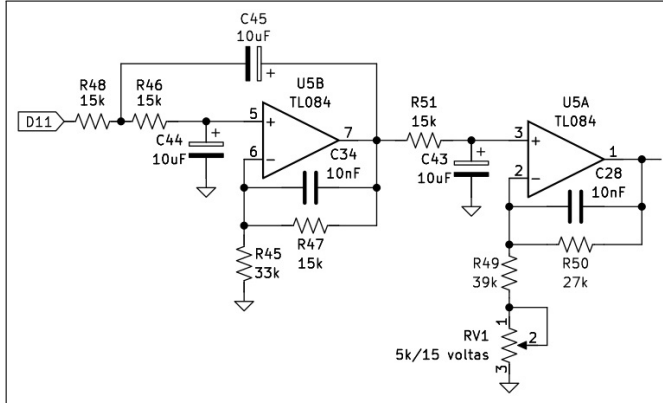
Os principais blocos funcionais do circuito exibido na [Figura 14](#) são comentados sucintamente a seguir. Imagens ampliadas dos blocos funcionais também são mostradas.

O circuito composto pelo Amp Op U5B, os resistores R45 a R48, e os capacitores C34, C44 e C45, exibido na [Figura 15](#), é um Filtro Passa-Baixas (FPB) ativo de 2ª ordem de topologia Sallen-Key ([Karki, 1999](#); [Sedra & Smith, 2007](#)). Seu ganho CC nominal é $G_{FPB} = 1,45$. Ele precede outro FPB, agora passivo e de 1ª ordem, composto pelo resistor R51 e pelo capacitor C43. Ambos os filtros, trabalhando em cascata, formam um FPB de 3ª ordem que é responsável por transformar o sinal PWM proveniente da saída D11 do Arduino em uma tensão contínua. Adiante, ainda na [Figura 15](#), o conjunto de 4 componentes eletrônicos associados ao Amp Op U5A, forma um amplificador não inversor de ganho CC nominal $G \approx 1,65$, entretanto ajustável, para permitir a calibração da tensão

¹ Essa configuração apresenta elevado ganho de corrente e ganho de tensão menor que 1, sendo composta por um transistor NPN e um transistor PNP. Ela difere do par Darlington, que é formado por dois transistores de mesma configuração, ou seja, ambos NPN ou ambos PNP.

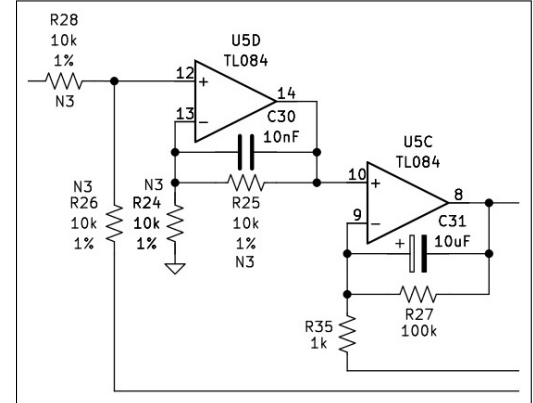
de saída, tal que ela seja igual a 12 V quando a razão cíclica² do sinal PWM for de 100 %.

Figura 15 – FPB de 3ª ordem e amplificador não inversor.



Fonte: O autor.

Figura 16 – Somador não inversor e controlador PI.



Fonte: O autor.

Em seguida, na [Figura 16](#), vê-se um somador não inversor formado pelos resistores R24 a R26, e R28, todos de 10 kΩ e tolerância de 1 %, cujo núcleo é o Amp Op U5D. O somador possui ganho CC unitário nominalmente. Sua tensão de saída é igual à soma da tensão de saída do Amp Op U5A com a queda de tensão sobre a resistência *shunt* — utilizada para medir a corrente drenada pela pastilha Peltier —, formada pela associação em paralelo dos resistores R16 a R18, todos de 0,56 Ω e potência de 5 W. Ainda na [Figura 16](#), o conjunto formado por R27, R35, C31 e o Amp Op U5C implementa um controlador Proporcional-Integral (PI). O controlador é responsável por ajustar a tensão de referência aplicada ao terminal de ajuste do CI LM317T — núcleo da fonte de tensão linear ajustável —, de modo que a tensão de alimentação da pastilha Peltier seja exatamente igual à tensão de saída do Amp Op U5A.

Os Amp Ops U6C e U6D constituem o núcleo de um Amplificador de Instrumentação (AI) ([Semig, 2018](#); [Sedra & Smith, 2007](#)) através do qual a entrada analógica A2 do Arduino recebe uma amostra da tensão de alimentação da pastilha Peltier. O AI, destacado na [Figura 17](#), é constituído também pelos resistores R30, R36, R39 e R44, todos de 10 kΩ e tolerância de 1 %, e ainda por R40, que não é montado na PCI, mas pode vir a ser futuramente. Seu ganho CC nominal é $G_{AI} = 2$. A entrada “+” do AI é alimentada pela tensão V^+ [V], proveniente da rede divisora de tensão formada pelos resistores R34, R37 e R42, cuja atenuação nominal é

$$A_{rede} = V_s/V_e \approx 0,2172$$

onde V_s [V] é a tensão de saída da rede, logo $V^+ = V_s$, enquanto V_e [V] é a tensão de entrada da rede, a mesma queda de tensão sobre o capacitor eletrolítico de saída C9, logo $V_e = V_{C9}$. A entrada “−” do AI recebe a queda de tensão sobre a resistência *shunt*, que é

² *Duty Cycle* (DC), em inglês.

dada por

$$V^- = V_{shunt} = R_{shunt} I_{Peltier}$$

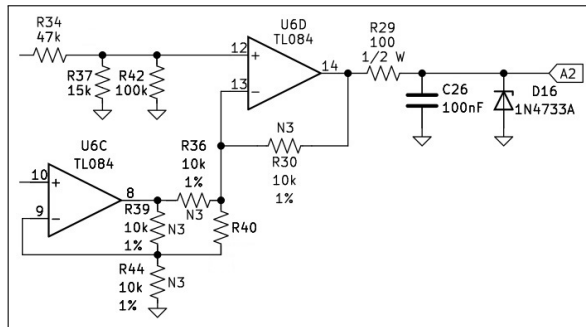
onde $R_{shunt} = 0,56/3 = 0,18\bar{6} \Omega$ é o valor nominal da resistência *shunt* e $I_{Peltier}$ [A] é a corrente drenada pela pastilha Peltier. Finalmente, a tensão de saída do AI é dada por

$$V_{AI} = G_{AI} (V^+ - V^-) = G_{AI} (A_{rede} V_{C9} - V_{shunt}) \approx 0,4345 V_{C9} - 0,37\bar{3} I_{Peltier}$$

e vale observar que a tensão V_{C9} é ajustada pelo circuito mostrado na Figura 16 em função da tensão V_{shunt} .

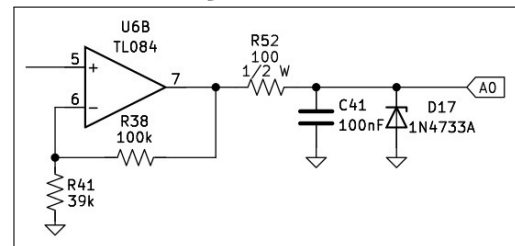
A saída do AI alimenta a entrada A2 do Arduino através de uma rede que, ao mesmo tempo, atua como um FPB passivo de 1ª ordem e um ceifador que protege essa entrada contra eventuais sobretensões. A medição da tensão de alimentação da pastilha Peltier deve ser calibrada antes de se coletar os dados que serão utilizados no processo de modelagem mencionado acima. A calibração é feita diretamente no código do Arduino.

Figura 17 – Amplificador de instrumentação para medição de tensão.



Fonte: O autor.

Figura 18 – Amplificador não inversor para medição de corrente.



Fonte: O autor.

A Figura 18 mostra um amplificador não inversor de ganho CC nominal $G = 3,56410\bar{2}$, cujo núcleo é U6B, também formado por R38 e R41. Ele amplifica a queda de tensão sobre a resistência *shunt*, que é utilizada pelo Arduino para calcular indiretamente a corrente drenada pela pastilha.

A saída do amplificador alimenta a entrada A0 do Arduino através de uma rede que, ao mesmo tempo, atua como um FPB passivo de 1ª ordem e um ceifador que protege essa entrada contra eventuais sobretensões. A medição dessa tensão, que posteriormente é convertida em um valor de corrente, deve ser calibrada antes de se coletar os dados que serão utilizados no processo de modelagem mencionado acima. A calibração é feita diretamente no código do Arduino.

O restante do circuito apresentado na Figura 14 não será detalhado no presente trabalho. A saber, trata-se basicamente das fontes de alimentação reguladas necessárias ao funcionamento do circuito, a placa Arduino Nano v3.0 e dois sensores, um termistor *Negative Temperature Coefficient* (NTC) de 10 kΩ 25 °C e um sensor de temperatura e umidade relativa do ar (DHT22 ou AM2302).

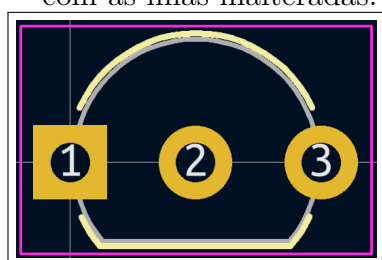
3.4 Placa de circuito impresso

Nesta seção, serão comentados alguns aspectos que foram levados em conta durante o processo de roteamento da PCI. Ela possui 185 cm^2 de área (18,5 cm de largura e 10 cm de altura), 155 componentes no total, todos de tecnologia THT, totalizando 377 ilhas, e 27 vias. Utilizou-se o programa KiCad EDA para realizar o roteamento. Trata-se de um *software* gratuito que oferece inúmeros recursos para facilitar o processo de roteamento de PCIs.

Uma das primeiras etapas para o roteamento da PCI foi delimitar o comprimento máximo e a largura máxima que ela poderia ter. Isto foi necessário porque o circuito eletrônico é razoavelmente grande e a confecção da PCI foi planejada para ser executada no Laboratório de Eletrônica (LABEL) da Faculdade de Engenharia da UFJF, onde se dispõe de máquinas LPKF cujos limites de tamanho para fabricação são conhecidos. Os limites não são muito superiores às dimensões da PCI mencionados no parágrafo anterior. Além disso, devido à área razoável da PCI, foram adicionados cinco furos de fixação para fixar apoios, visando dar maior estabilidade mecânica à PCI montada.

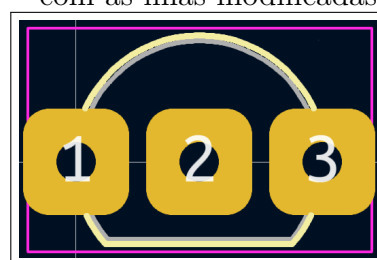
A PCI foi projetada utilizando-se apenas componentes para montagem através de furos para facilitar a montagem do protótipo, pois há um número grande de componentes e existe uma dificuldade maior na soldagem manual, sem o auxílio de processos automatizados, de componentes para montagem em superfície. Além disso, as ilhas de todos os componentes foram modificadas — exemplos são mostrados na [Figura 19](#) e na [Figura 20](#) — para facilitar sua soldagem, garantindo uma montagem mais eficiente e confiável.

Figura 19 – Exemplo do *footprint* TO-92 com as ilhas inalteradas.



Fonte: O autor.

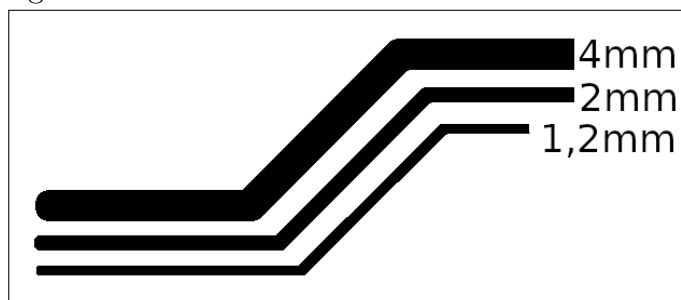
Figura 20 – Exemplo do *footprint* TO-92 com as ilhas modificadas.



Fonte: O autor.

Normalmente, as larguras das trilhas são definidas de acordo com as correntes que elas conduzirão. No entanto, seguindo uma recomendação encontrada em [Khandpur \(2006\)](#), definiu-se algumas larguras padrões no roteamento do circuito, e elas devem possuir a maior largura possível ([De Lima & Villaça, 2012](#)). Foram definidas as larguras de i) 1,2 mm para as trilhas de sinais, ii) 2,0 mm para as trilhas de alimentação elétrica dos CIs e iii) 4,0 mm para o circuito de potência. Além disso, conforme recomendação de [De Lima & Villaça \(2012\)](#), criou-se um polígono de cobre interligando os capacitores C1 a C6, localizados na área de potência (ver [Figura 14](#)). A [Figura 21](#) mostra as trilhas que foram definidas.

Figura 21 – Trilhas utilizadas no roteamento da PCI.



Fonte: O autor.

Optou-se por utilizar majoritariamente um dos lados da PCI, deixando o outro lado o mais livre possível para obter um plano de referência sólido, para uma melhor integridade de sinal e menos IEM. Além disso, foram adicionadas vias, interligadas ao plano de referência, para conectar a esse plano pequenas áreas de cobre isoladas.

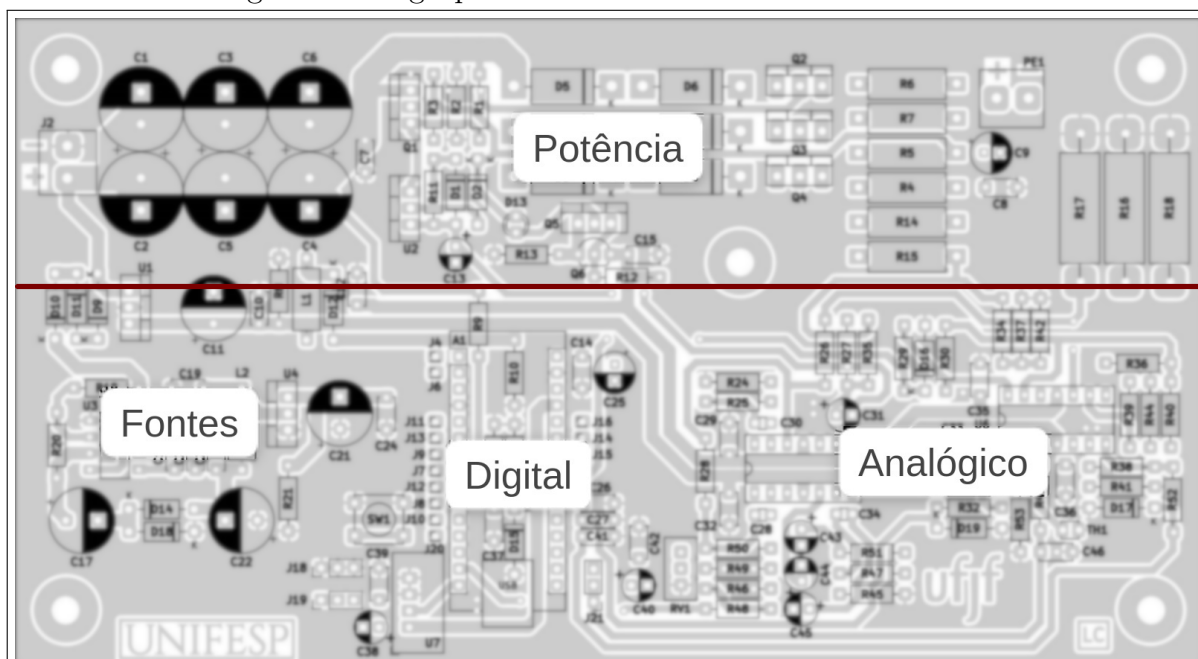
Outra característica que se observa na PCI, tal como recomendado, é o agrupamento funcional dos circuitos, indicado na [Figura 22](#). Na parte superior, rotulada como potência, fica o circuito de potência. Observa-se também nessa parte, mais à direita, uma área de alta temperatura. Na parte inferior esquerda, como o rótulo sugere, têm-se as fontes de alimentação (ver [Figura 14](#)). Na parte inferior direita, rotulada como Analógico, encontram-se os componentes analógicos, responsáveis pelo controle e condicionamento dos sinais. Ali ficam os CIs U5 e U6 (Amp Ops). Por fim, na parte central inferior, encontra-se a placa Arduino Nano, que constitui a parte digital do circuito. Uma observação a esse respeito é que o Arduino não é fixado diretamente na placa, mas sim utilizando-se um soquete. Sua utilização tem como vantagens a facilidade de conectar e remover o Arduino, quando necessário, e a possibilidade da inserção de componentes dentro do volume do soquete.

Como última observação, prevendo que possa ser necessário expandir as funcionalidades da PCI futuramente, foram acrescentados i) 10 conectores de expansão interligados aos pinos 1, 2 e 5-12 do Arduino, e ii) 3 conectores com 3 pinos cada um, que disponibilizam as fontes de alimentação de +3,3 V e 5 V já com os devidos capacitores de filtragem e desacoplamento, além da referência de 0 V (GND).

3.4.1 Camadas da PCI

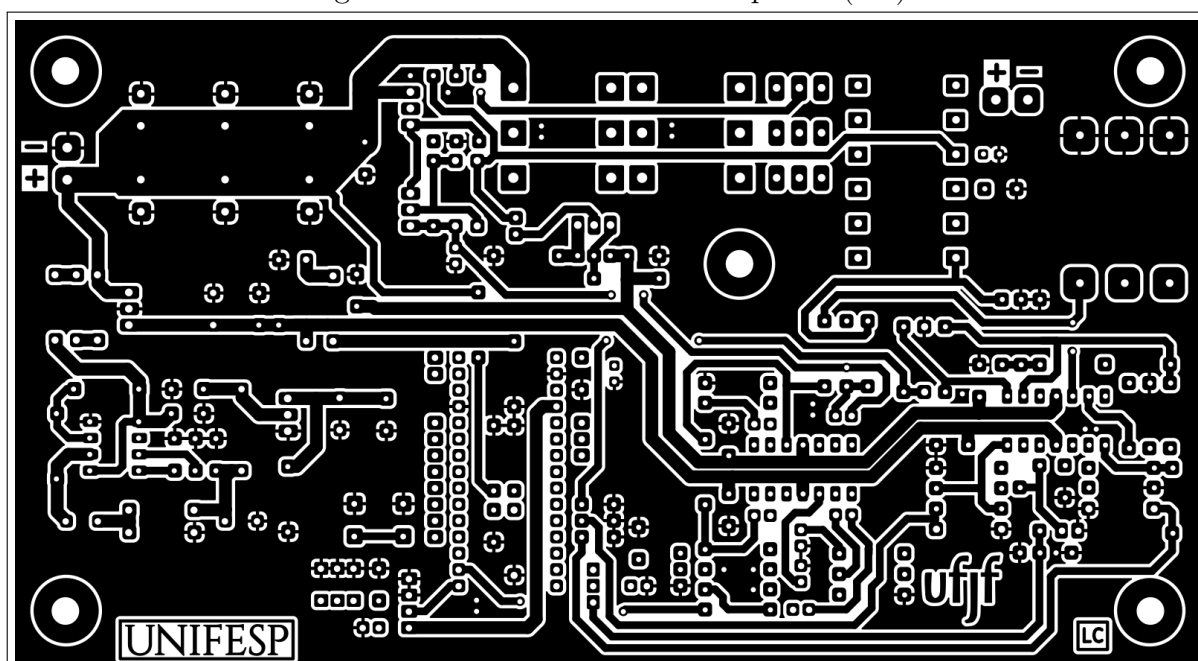
A última etapa do projeto da PCI é a geração de arquivos em formato *Gerber*, que são utilizados para fabricação. Na [Figura 23](#) e na [Figura 24](#), são exibidas as combinações de alguns desses arquivos para a visualização das camadas (*layers*, em inglês) de cobre tanto superior (LC) quanto inferior (LS), respectivamente. Além delas, a [Figura 25](#) mostra a serigrafia (*silk-screen*, em inglês) da parte superior da PCI.

Figura 22 – Agrupamento funcional dos circuitos na PCI.



Fonte: O autor.

Figura 23 – Camada de cobre superior (LC).

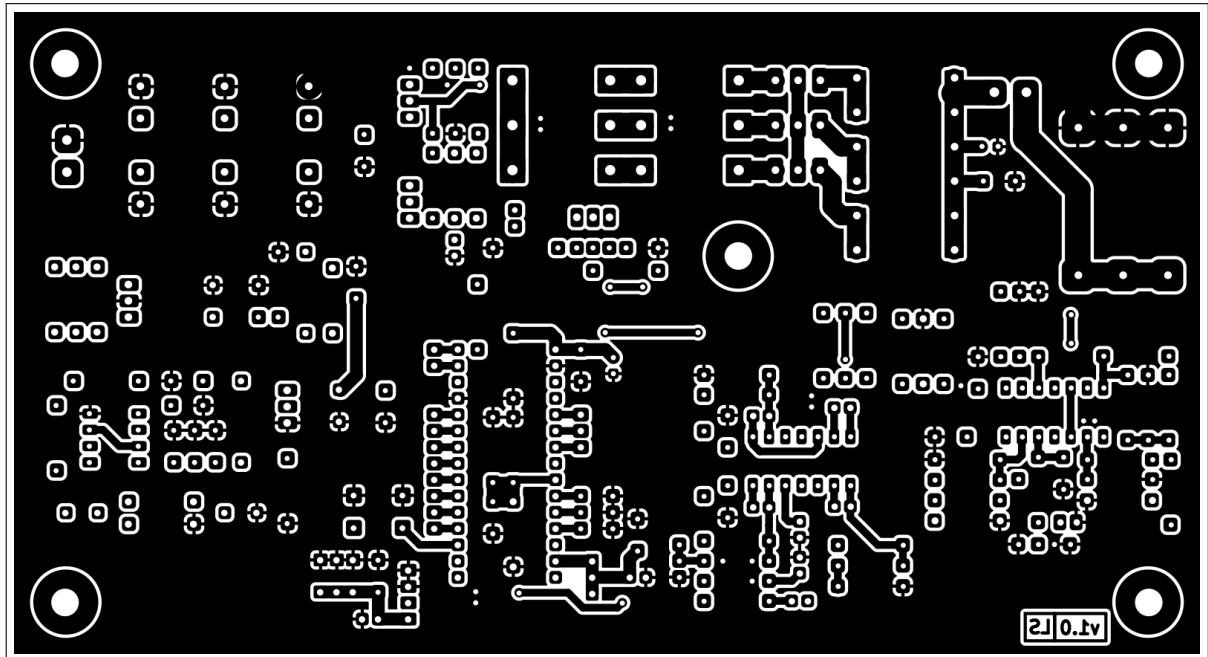


Fonte: O autor.

3.4.2 Modelos 3D da PCI

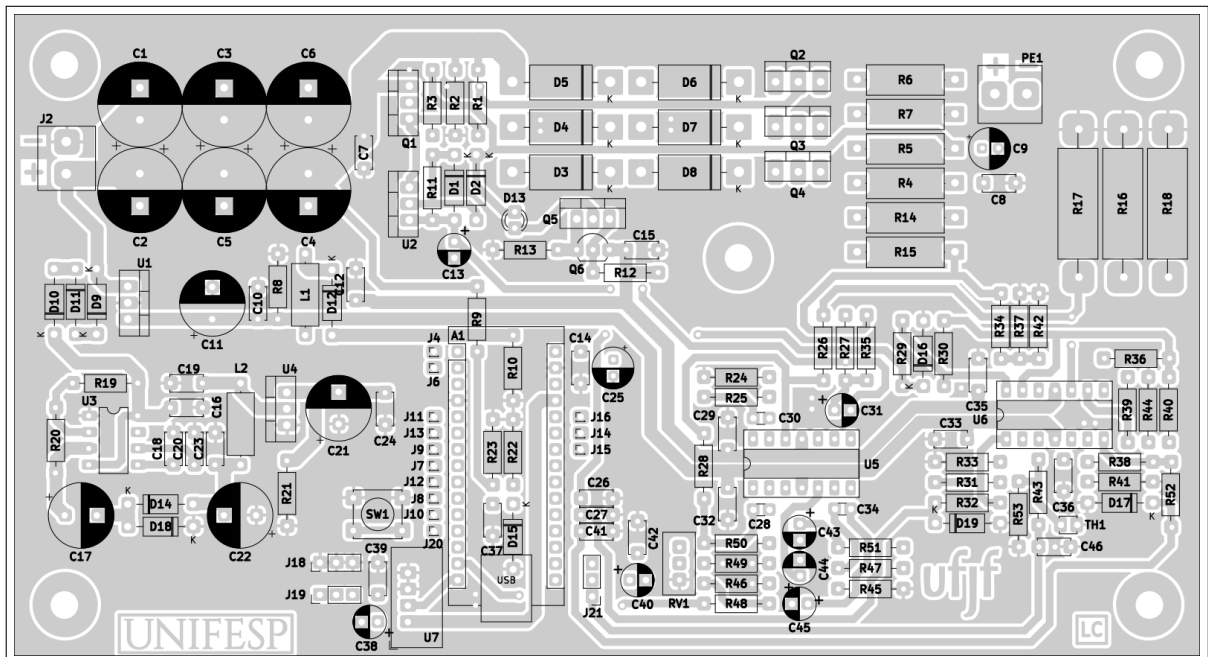
A [Figura 26](#) e a [Figura 27](#) exibem representações tridimensionais das vistas superior e inferior, respectivamente, da PCI, geradas automaticamente pelo programa KiCad EDA.

Figura 24 – Camada de cobre inferior (LS).



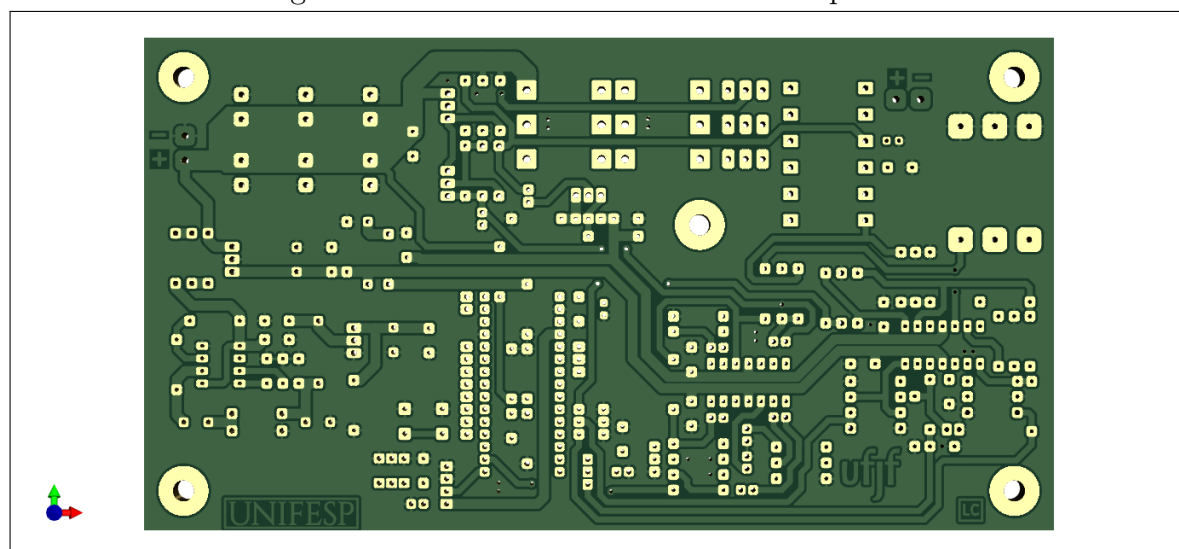
Fonte: O autor.

Figura 25 – Serigrafia da PCI.



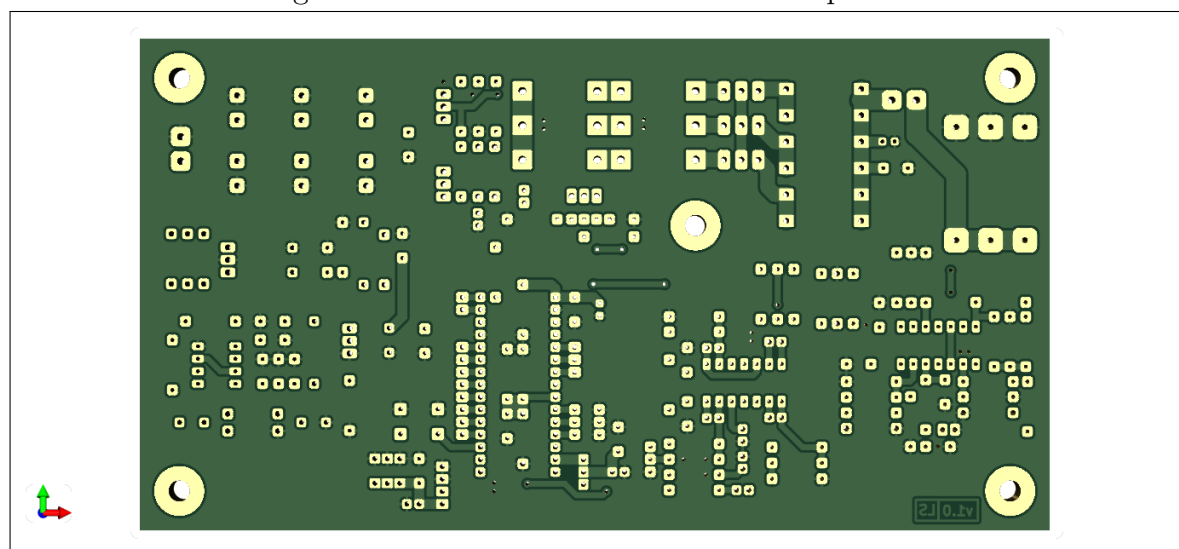
Fonte: O autor.

Figura 26 – Modelo 3D do LC da PCI dupla face.



Fonte: O autor.

Figura 27 – Modelo 3D do LS (Lower Circuit) da PCI dupla face.



Fonte: O autor.

4 Conclusão

4.1 Conclusões

Projetar uma PCI é um processo desafiador. Como alguns autores afirmam, não se trata apenas de posicionar componentes e realizar conexões entre eles, mas sim da criação de uma arte. Contudo, é uma arte que precisa seguir inúmeras regras e recomendações para que se obtenha um bom resultado final: i) circuito funcional, ii) com tamanho otimizado, iii) livre de IEM e iv) compatível eletromagneticamente com o ambiente.

Em relação à PCI desenvolvida neste trabalho, atesta-se que seu desenvolvimento foi realizado seguindo os requisitos e objetivos do projeto. A PCI foi particionada em quatro áreas: i) potência, ii) digital, onde se encontra uma placa Arduino Nano, iii) analógica, em que se encontram circuitos baseados em Amp Ops, responsáveis por controle e condicionamento de sinais e iv) fontes de alimentação. Destaca-se como um ponto forte do leiaute da PCI, grandes áreas de cobre em ambas as faces, apesar do grande número de componentes, especialmente no Lado da Solda, em que há poucas trilhas, tornando essa face quase um plano de referência perfeito. Isso tudo contribui para uma maior integridade dos sinal.

Foram roteadas pelo autor deste trabalho outras quatro PCIs, antes da que foi o objetivo deste trabalho, todas montadas, testadas e validadas. As experiências obtidas na realização de tais projetos contribuíram para a realização bem-sucedida deste também. Um ponto que deve ser mencionado é que, como o projeto não será comercializado nem, em princípio, distribuído a terceiros, alguns pontos não críticos do projeto foram mais relaxados, como, por exemplo, o posicionamento dos designadores de referência dos componentes, que foram dispostos de uma maneira menos rigorosa, já que a PCI confeccionada não teria a camada de serigrafia, tornando o processo de posicionamento, que é trabalhoso, pouco proveitoso. Um outro exemplo é em relação ao tamanho da PCI, onde buscou-se uma redução de tamanho, contudo, não a máxima possível, que poderia ser alcançada pela utilização de componentes SMT mas, nesse caso, seria interessante poder utilizar um método de montagem mais automatizado, pois é necessária boa experiência para soldar manualmente componentes de dimensões reduzidas.

Destaca-se como desafio encontrado durante o processo de roteamento da PCI, a busca pela melhor disposição dos componentes para que se pudesse encurtar ao máximo os comprimentos das trilhas, mas mantendo os agrupamentos funcionais. Outro ponto crucial e desafiador foi com relação à alimentação dos CIs, pois, como as fontes e a parte analógica ficaram em lados opostos, tornou-se necessário utilizar trilhas longas e de maior espessura, por ser de alimentação, cruzando uma grande parte da PCI.

Em relação à escrita deste trabalho, alguns desafios encontrados foram a falta de

termos técnicos consolidados na área em língua portuguesa e, especialmente, algumas divergências de significados de termos ou tópicos entre alguns dos autores consultados.

4.2 Trabalhos futuros

Uma melhoria possível para a PCI seria a substituição de pelo menos parte dos componentes por suas versões SMD, ação que resultaria em uma diminuição de sua área, além de possibilitar otimizar a utilização dos espaços e comprimento de trilhas. Acerca de possíveis trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de realizar um estudo da integridade de sinal na PCI desenvolvida. Outro trabalho possível seria a substituição da fonte linear por uma fonte chaveada, processo que exigiria um novo roteamento com desafios adicionais.

REFERÊNCIAS

- B. R. Archambeault & J. Drewniak. *PCB Design for Real-World EMI Control*. The Springer International Series in Engineering and Computer Science. Springer US, 2013. ISBN 9781475736410. URL <https://books.google.com.br/books?id=3nz-sgEACAAJ>.
- E. Bogatin. *Signal and Power Integrity - Simplified*. Prentice Hall modern semiconductor design series. Prentice Hall, 2018. ISBN 9780134513416. URL <https://books.google.com.br/books?id=fywRvgAACAAJ>.
- E. Bogatin. *Bogatin's practical guide to prototype breadboard and PCB design*. Artech House, 2021. ISBN 9781630818487.
- R. L. Boylestad & L. Nashelsky. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos*. Pearson Education do Brasil Ltda., São Paulo, 11a ed., 2013.
- J. L. S. Braga. Estudo das propriedades do molibdato de estrôncio (SrMoO_4) dopado com gadolínio e de seu uso como sensor. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da UNIFESP, Diadema, fevereiro, 2022. URL <https://repositorio.unifesp.br/items/19222002-3954-4a7b-a247-cbbcffa45ca4>.
- D. Brooks. *Signal Integrity Issues and Printed Circuit Board Design*. Prentice Hall modern semiconductor design series. Prentice Hall PTR, 2003. ISBN 9780131418844. URL <https://books.google.com.br/books?id=qeWWXvuAXXoC>.
- W. D. Callister, Jr. & D. G. Rethwisch. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro, 10a ed., outubro, 2020. ISBN 978-85-216-3728-8.
- P. B. L. Castrucci, A. Bittar, & R. M. Sales. *Controle automático*. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro, 2a ed., 2018. ISBN 978-85-216-3562-8.
- P. Dalmaris. *KiCad like a pro*. Tech Explorations Publishing, 3a ed., 2021.
- C. B. De Lima & M. V. M. Villça. *Avr E Arduino: Técnicas De Projeto*. Clube de Autores, 2012. ISBN 9788591140015. URL <https://books.google.com.br/books?id=ehJKEAAAQBAJ>.
- J. DiBene. *Fundamentals of Power Integrity for Computer Platforms and Systems*. Wiley, 2014. ISBN 9781118826348. URL https://books.google.com.br/books?id=_dmYAwAAQBAJ.
- R. C. Dorf & R. H. Bishop. *Sistemas de controle modernos*. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro, 13a ed., 2018. ISBN 978-85-216-3514-7.
- T. Dwyer. Module 7: applying the psychrometric relationships. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) Journal, agosto, 2009. Disponível em: <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2009-08/>. Acesso em: 30/09/2024.
- T. Floyd. *Sistemas Digitais: Fundamentos e Aplicações*. Bookman, 2007. ISBN 9788560031931. URL <https://books.google.com.br/books?id=ftnEkkS79ZoC>.

L. E. Frenzel. *Electronics explained: fundamentals for engineers, technicians, and makers*. Elsevier Science, Nova York, 2017. ISBN 9780128118795.

S. Gibilisco. *Beginner's guide to reading schematics*. McGraw Hill LLC, Nova Iorque, EUA, 3a ed., 2013. ISBN 9780071827799.

D. W. Hart. *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. Grupo A, Porto Alegre, 2011. ISBN 978-85-8055-047-4.

J. Karki. Analysis of the Sallen-Key architecture. Relatório de aplicação SLOA024B, Texas Instruments Inc., julho, 1999. Revisado em setembro de 2002. Disponível em: <http://www.vyssotski.ch/BasicsOfInstrumentation/AnalysisOfTheSallen-KeyArchitecture.pdf>. Acesso em: 30/09/2024.

R. S. Khandpur. *Printed circuit boards: design, fabrication, and assembly*. Electronic Engineering. McGraw-Hill, Inc., Nova Iorque, EUA, 2006.

KiCad Development Team. About KiCad, 2024. Disponível em: <https://www.kicad.org/about/kicad/>. Acesso em: 30/09/2024.

S. Lineykin & S. Ben-Yaakov. Modeling and analysis of thermoelectric modules. In: *Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.*, vol. 3, pp. 2019–2023 Vol. 3, 2005. doi: 10.1109/APEC.2005.1453336.

L. Marks & J. A. Caterina. *Printed circuit assembly design*. McGraw Hill Professional Engineering. McGraw Hill LLC, Nova Iorque, EUA, 2000. ISBN 9780071500142.

K. Mitzner, B. Doe, A. Akulin, A. Suponin, & D. Müller. *Complete PCB design using OrCAD capture and PCB editor*. Elsevier Science, 2a ed., 2019. ISBN 9780128176856.

S. Monk. *Make your own PCBs with EAGLE: from schematic designs to finished boards*. McGraw Hill LLC, 2014. ISBN 9780071819268.

M. Montrose. *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance: A Handbook for Designers*. IEEE Press Series on Electronics Technology. Wiley, 2000. ISBN 9780780353763. URL <https://books.google.com.br/books?id=sxRtQgAACAAJ>.

A. L. N. Nascimento & S. Basso. Câmara climática: desenvolvimento de uma câmara automatizada para controle de temperatura e umidade. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT), Curitiba, outubro, 2019. URL https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27825/1/CT_COEAU_2019_2_08.pdf.

N. S. Nise. *Engenharia de sistemas de controle*. LTC Editora Ltda., Rio de Janeiro, 7a ed., 2017. ISBN 978-85-216-3437-9.

M. O'Hara. *EMC at Component and PCB Level*. Newnes, 1998. ISBN 9780080530826. URL https://books.google.com.br/books?id=__z0zV7Kd-MC.

H. Ott. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Wiley, 2011. ISBN 9781118210659. URL <https://books.google.com.br/books?id=2-4WJKxzzigC>.

C. Paul. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. Wiley, 2006. ISBN 9780471758143. URL <https://books.google.com.br/books?id=6P2Wyram310C>.

A. F. V. D. Pires. Estudo de modelos de controlo de uma câmara climática. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra (UC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Coimbra, Portugal, dezembro, 2020. URL <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/94045/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Ant%C3%B3nio%20Pires%20FINAL.pdf>.

M. H. Rashid. *Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações*. Pearson Education do Brasil Ltda., São Paulo, 4a ed., 2015. ISBN 978-85-430-0594-2.

M. Scarpino. *Designing circuit boards with EAGLE: make high-quality PCBs at low cost*. Pearson Education, Nova Iorque, EUA, 2014. ISBN 9780133820010.

A. Sedra, K. Smith, W. Van Noije, S. dos Santos Filho, M. Netto, J. Martino, A. Seabra, & M. Bellodi. *Microeletrônica*. Grupo GEN, 2023. ISBN 9788521638391.

A. S. Sedra & K. C. Smith. *Microeletrônica*. Pearson Makron Books, São Paulo, 5a ed., 2007.

P. Semig. Two op amp instrumentation amplifier circuit. Relatório técnico SBOA281A, Texas Instruments Inc., dezembro, 2018. Revisado em setembro de 2024. Disponível em: https://www.ti.com/lit/an/sboa281a/sboa281a.pdf?ts=1727733667523&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. Acesso em: 30/09/2024.

J. R. Simões-Moreira & A. H. Neto. *Fundamentos e aplicações da psicrometria*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2a ed., 2019. ISBN 978-85-212-1839-5.

A. C. G. Sousa. Estudo de aplicabilidade da câmara climática de duas-pressões em calibrações de instrumentos de medição de humidade relativa. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa (UNL), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Lisboa, Portugal, março, 2018. URL https://run.unl.pt/bitstream/10362/45940/1/Sousa_2018.pdf.

TEC-CI. Circuito impresso: qual laminado utilizar para minha placa, 2023. Disponível em: <https://www.tec-ci.com.br/blog/circuito-impresso/circuito-impresso-qual-laminado-utilizar-para-minha-placa/>. Acesso em 30/09/2024.

J. Varteresian. *Fabricating printed circuit boards*. Demystifying technology series. Elsevier Science, Nova Iorque, EUA, 2002. ISBN 9781878707505.

G. M. Vieira. Caracterização e otimização de um sistema de climatização de uma câmara climática. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra (UC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Coimbra, Portugal, abril, 2021. URL https://estudogeral.sib.uc.pt/bitstream/10316/95355/1/GabrielVieira_Disserta%C3%A7%C3%A3oFinal_30Abril.pdf.