

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA – PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

GUILHERME OLIVEIRA LEMOS

PROJETO DE UMA PLACA DE DESENVOLVIMENTO PARA MINI *DRONE*

PATOS DE MINAS - MG

2022

GUILHERME OLIVEIRA LEMOS

PROJETO DE UMA PLACA DE DESENVOLVIMENTO PARA MINI *DRONE*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito de obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, pela Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Costa Ramos

PATOS DE MINAS - MG

2022

GUILHERME OLIVEIRA LEMOS

PROJETO DE UMA PLACA DE DESENVOLVIMENTO PARA MINI *DRONE*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora como requisito de obtenção de título de Bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, pela Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Patos de Minas.

Patos de Minas, 19 de dezembro de 2022

Banca Examinadora

Prof. Dr. Daniel Costa Ramos – FEELT/UFU (Orientador)

Prof. Dra. Elise Saraiva – FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos – FEELT/UFU (Membro 2)

RESUMO

Drone é um apelido popular para veículos aéreos não tripulados e micro veículos aéreos. Seu uso tem recebido importância principalmente pelos seus recursos de navegação autônoma bem requintados, onde tem ganhado cada vez mais espaço e tem se mostrado útil em diversas aplicações e áreas, como na agricultura por exemplo. Diante deste contexto, nota-se a grande importância do desenvolvimento deste campo de pesquisa em nosso país, que deve acompanhar as principais tendências tecnológicas, bem como fazer a sua contribuição para a revolução que pretende transformar o mundo que se conhece hoje. Faz-se, portanto, necessária a graduação de profissionais habilitados para atuar nesta área em constante crescimento, e mais do que isto, é de grande relevância que se possa desmitificar a robótica visando o incentivo a formação de pessoas capacitadas para trabalhar nesta área. Além disso, também se faz necessário oferecer laboratórios muito bem equipados e que possibilitem o pleno desenvolvimento de pesquisas, onde ferramentas tais como as placas de desenvolvimento são fundamentais, pois facilitam a realização de projetos e incentivam o aprendizado de uma determinada tecnologia. Atualmente, existem centenas de placas de desenvolvimento e cada uma com um determinado foco, porém a maioria não está relacionada ao desenvolvimento de tecnologia exclusiva para os *drones*, o que torna a tarefa de encontrar uma placa de desenvolvimento para os *drones* uma tarefa com complexidade elevada, principalmente quando o seu uso é para criação de projetos e em pesquisas. Visando preencher esta lacuna, o presente trabalho apresenta o projeto de uma placa de circuito impresso dotada de todo *hardware* necessário para um *drone* da categoria mini poder voar e ser controlado remotamente. Tem como foco o baixo custo, a segurança e todas as características necessárias para ser considerada como uma placa de desenvolvimento, e para ser utilizada como ferramenta educacional e de pesquisa. O trabalho descreve todo o embasamento teórico e técnico necessário para o seu desenvolvimento, além de relatar as experiências adquiridas com o desenvolvimento do primeiro protótipo de mini *drone* e o processo de fabricação no país. Como resultado do projeto, os arquivos de fabricação da placa de circuito impresso, bem como a lista de componentes gerados no decorrer do desenvolvimento do projeto, foram validados e estão prontos para serem fabricados pela empresa JLCPCB.

Palavras-chave: Controladora de voo; Mini *Drone*; Placa de Circuito Impresso; Placa de Desenvolvimento; Pesquisa.

ABSTRACT

Drone is a popular nickname for unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles. Its use has received importance mainly due to its very refined autonomous navigation resources, where it has gained more and more space and has proven to be useful in various applications and areas, such as agriculture for example. Given this context, the great importance of the development of this field of research in our country is noted, which must follow the main technological trends, as well as make its contribution to the revolution that intends to transform the world as we know it today. It is therefore necessary to graduate qualified professionals to work in this constantly growing area, and more than that, it is of great importance that robotics can be demystified in order to encourage the training of people qualified to work in this area. In addition, it is also necessary to offer very well equipped laboratories that allow the full development of research, where tools such as development boards are essential, as they facilitate the execution of projects and encourage the learning of a certain technology. Currently, there are hundreds of development boards and each one with a certain focus, but most are not related to the development of exclusive technology for drones, which makes the task of finding a development board for drones a task with high complexity, mainly when its use is for project creation and research. Aiming to fill this gap, the present work presents the design of a printed circuit board equipped with all the necessary hardware for a little drone to be able to fly and be remotely controlled. It focuses on low cost, security and all the necessary features to be considered as a development board, and to be used as an educational and research tool. The work describes all the theoretical and technical basis necessary for its development, in addition to reporting the experiences acquired with the development of the first little drone prototype and the manufacturing process in the country. As a result of the project, the printed circuit board manufacturing files, as well as the list of components generated during the development of the project, were validated and are ready to be manufactured by the company JLCPCB.

Keywords: Flight controller; Mini Drone; Printed circuit board; Development Board; Search.

LISTA DE SIGLAS

VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
RMA	Robôs Móveis Autônomos
SMD	<i>Surface Mounted Device</i> (Dispositivo Montado na Superfície)
ESC	<i>Electronic Speed Control</i> (Controle Eletrônico de Velocidade)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
PID	Proporcional Integral e Derivativo
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidade de Medição Inercial)
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical Systems</i> (Sistemas Micro Eletromecânicos)
TX	Transmissor
FM	<i>Frequency Modulation</i> (Modulação em Frequência)
AM	<i>Amplitude Modulation</i> (Modulação em Amplitude)
RPM	Rotações por Minuto
SoC	<i>System on Chip</i> (Sistema no Chip)
RTOS	<i>Real Time Operation System</i> (Sistema Operacional de Tempo Real)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i> (Memória Estática de Acesso Randômico)
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i> (Entrada/Saída de Uso Geral)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor Analógico Digital)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Periférica Serial)
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter Integrado)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (Receptor/Transmissor Assíncrono Universal)
CAN	<i>Controller Area Network</i> (Rede de Área do Controlador)
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória Somente Leitura Programável Apagável Eletricamente)
SIP	<i>System in Package</i> (Sistema em Pacote)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de Circuito Impresso)
PTH	<i>Pin Throught Hole</i> (Pino Através do Orifício)

DIL	<i>Dual In Line</i> (Linha Dupla)
BGA	<i>Ball Grid Array</i> (Matriz de Grade de Bola)
SOIC	<i>Small-Outline Integrated Circuit</i> (Circuito Integrado de Contorno Pequeno)
CAD	<i>Computer-aided design</i> (Desenho Assistido por Computador)
EDA	<i>Electronic Design Automation</i> (Automação de Projeto Eletrônico)
CERN	<i>Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire</i> (Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear)
ERC	<i>Electrical Rules Check</i> (Verificação de Regras Elétricas)
DRC	<i>Design Rules Check</i> (Verificação das Regras de Projeto)
BOM	<i>Bill Of Materials</i> (Lista de Materiais)
CSV	<i>Comma-separated values</i> (Valores Separados por Vírgula)
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i> (Descarga Eletrostática)
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i> (Compatibilidade Eletromagnética)
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
DFM	<i>Design For Manufacturing</i> (Projeto para Fabricação)
VCC	<i>Voltage Common Collector</i> (Tensão Coletor Comum)
GND	<i>Ground</i> (Terra)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
RTC	<i>Real-Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i> (Conversor Digital para Analógico)
ROM	<i>Read-Only Memory</i> (Memória Somente Leitura)
6DOF	<i>Six Degrees of Freedom</i> (Seis Graus de Liberdade)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de orientação dos motores.	17
Figura 2: Exemplo de <i>drone</i> da <i>Ascending Technologies</i> , o <i>Hummingbird</i>	17
Figura 3: Exemplos de RMAs: a) <i>Roomba</i> , utilizado para limpeza domiciliar, b) <i>Asimo</i> , robô humanoide da <i>Honda</i> , c) <i>BigDog</i> robô militar e d) <i>Drone</i> equilibrista.	18
Figura 4: Exemplo de um mini <i>drone</i> educacional, <i>Crazyflie 2.1</i>	19
Figura 5: <i>Ryze Tello drone EDU</i>	22
Figura 6: <i>ESPcopter</i>	23
Figura 7: Multirotor construído por Oemichen.	24
Figura 8: <i>Convertawings Model A Quadcopter</i>	25
Figura 9: Classificação dos multirotores.	25
Figura 10: Eixos de rotação (a) e sentido de rotação dos rotores (b).	26
Figura 11: Exemplo de um giroscópio clássico mecânico.	29
Figura 12: Módulo IMU MPU6050.	30
Figura 13: Módulo micro GPS Beitian.	31
Figura 14: <i>Frame racer</i> (a) e <i>frame freestyle</i> (b).	32
Figura 15: Rádio controle Taranis QX7.	33
Figura 16: Motores <i>Brushed</i> RacerStar Coreless 8520 (vermelho) e <i>Coreless</i> 615.	35
Figura 17: Motor <i>Brushless</i> AmaxIno 1103 - 7500 kv.	35
Figura 18: Hélice 55 mm.	36
Figura 19: Bateria CNHL de 7.4 V, 2S, 450 mAh e 70 C.	37
Figura 20: Exemplo de placa Arduino, Arduino UNO.	38
Figura 21: Placa de desenvolvimento Arduino Pro Mini.	39
Figura 22: Placa de desenvolvimento Digispark.	40
Figura 23: Placa de desenvolvimento NodeMCU ESP32S.	40
Figura 24: Placa de desenvolvimento <i>Crazyflie 2.1</i>	41
Figura 25: Placa de desenvolvimento <i>ESPcopter</i>	42
Figura 26: <i>Crazyflie 2.1</i>	44
Figura 27: <i>Pinout</i> do mini <i>drone Crazyflie 2.1</i>	45
Figura 28: Módulo de inteligência artificial para o <i>Crazyflie 2.1</i>	45
Figura 29: Estrutura mecânica do <i>Crazyflie 2.1</i>	46
Figura 30: Conjunto de motor e hélice do <i>Crazyflie 2.1</i>	46
Figura 31: Microcontrolador do <i>Crazyflie 2.1</i>	47

Figura 32: Pinout do <i>ESPcopter</i> .	48
Figura 33: Módulo de fluxo óptico do <i>ESPcopter</i> .	48
Figura 34: Estrutura mecânica do <i>ESPcopter</i> .	49
Figura 35: Motores e hélices do <i>ESPcopter</i> .	49
Figura 36: <i>Pinout</i> do módulo SIP ESP8266-12S.	50
Figura 37: Material base de uma PCI.	52
Figura 38: Modelo 3d de uma PCI com uma camada de cobre.	52
Figura 39: PCI com máscara de solda aplicada.	52
Figura 40: PCI com serigrafia.	53
Figura 41: Resistores com as pernas passando pelos buracos na PCI.	53
Figura 42: LEDs SMDs montados numa PCI.	54
Figura 43: Anel anular.	54
Figura 44: Exemplos de PADs numa PCI.	55
Figura 45: À direita, um furo PTH com alívio térmico e a esquerda um sem alívio térmico.	55
Figura 46: Pequena trilha conectando um dos pinos do conector J1 aos dois resistores R1 e R2.	55
Figura 47: Exemplo de PCI com plano de terra.	56
Figura 48: Frente e parte de trás do mesmo PCI.	56
Figura 49: Pasta de solda aplicada sobre a PCI antes dos componentes serem posicionados.	57
Figura 50: Exemplo de estêncil metálico.	57
Figura 51: Exemplo de painel com várias PCIs.	58
Figura 52: Encapsulamento para capacitores eletrolíticos e cerâmicos.	60
Figura 53: Encapsulamento para resistores PTH.	60
Figura 54: Encapsulamento para diodos PTH.	60
Figura 55: Encapsulamento para componentes eletrônicos de 3 terminais.	61
Figura 56: Circuitos integrados com encapsulamento duplo em linha.	61
Figura 57: Encapsulamento para barra de pinos.	61
Figura 58: Encapsulamentos SMD: componentes passivos 0402 - 2512, SOT23 para transistor e DSM para diodo.	61
Figura 59: Exemplos de encapsulamentos de circuitos integrados SMD.	62
Figura 60: Principais etapas de projeto de uma PCI.	63
Figura 61: Exemplo de esquemático.	65
Figura 62: Exemplo de design de layout de uma PCB.	65
Figura 63: Gerenciador de projeto do KiCad.	67

Figura 64: Exemplo de conexão ao plano de correta. A esquerda o não recomendado e a direito o recomendado.	70
Figura 65: Exemplo de separação em seções numa PCI.	70
Figura 66: Exemplo onde cada seção de um circuito tem seu próprio plano de terra.	71
Figura 67: Exemplo recomendado de separação das camadas para uma PCI de 4 camadas. ..	71
Figura 68: Trilhas de alta velocidade irradiam EMI.....	72
Figura 69: Melhores práticas para traçar trilhas.	72
Figura 70: Posicionamento recomendado dos capacitores de desacoplamento na PCI, sempre próximo a cada ponto de entrada de alimentação.....	73
Figura 71: Problemas de <i>crosstalk</i> entre as trilhas.	74
Figura 72: PCI com parte do circuito blindada.	74
Figura 73: Exemplo de calculadora para o dimensionamento elétrico do <i>software</i> KiCad.	75
Figura 74: Frame utilizado no primeiro protótipo.	78
Figura 75: Primeiro protótipo do mini <i>drone</i>	78
Figura 76: Circuito de entrada de energia da bateria.....	88
Figura 77: Esquema elétrico do circuito de regulação de tensão.	89
Figura 78: Esquema do circuito de leitura da tensão da bateria.	89
Figura 79: Esquema elétrico da interface USB.	91
Figura 80: Esquema elétrico do CI conversor USB para UART.....	92
Figura 81: Esquema elétrico do módulo ESP32 WROOM.	94
Figura 82: Esquema elétrico do circuito de RESET e BOOT.	94
Figura 83: Esquema elétrico dos resistores de PULL UP do barramento I2C_0.	95
Figura 84: Esquema elétrico do CI MPU6050.	96
Figura 85: Esquema elétrico do CI QMC5883L.	96
Figura 86: Esquema elétrico do CI DPS310.....	97
Figura 87: Esquema elétrico dos motores frontais: esquerdo e direito.....	98
Figura 88: Esquema elétrico dos motores traseiros: esquerdo e direito.	99
Figura 89: Esquema elétrico dos <i>pin headers</i>	100
Figura 90: Esquema elétrico dos LEDs indicadores.....	100
Figura 91: Erros detectados pelo ERC.	101
Figura 92: Apontamentos do ERC.	102
Figura 93: Circuito com as PWR_FLAG.	102
Figura 94: Janela final do ERC.	103
Figura 95: Janela de configuração da PCI no KiCad.....	104

Figura 96: Inserção dos requisitos de DFM.	105
Figura 97: Predefinição do tamanho de trilhas e vias.....	105
Figura 98: Delimitação da PCI.	106
Figura 99: Posicionamento dos componentes e furos passantes.	106
Figura 100: <i>Layout</i> da primeira camada da PCI.	107
Figura 101: <i>Layout</i> da segunda camada da PCI.	108
Figura 102: <i>Layout</i> da terceira camada da PCI.	108
Figura 103: <i>Layout</i> da quarta camada da PCI.....	109
Figura 104: Vista de todas as trilhas e vias roteadas, sem os componentes e com os componentes.	109
Figura 105: Serigrafia da PCI.....	110
Figura 106: Janela de checagem de DRC do KiCad.	110
Figura 107: Renderização 3D da PCI em suas vistas superiores e frontais.....	111
Figura 108: Renderização 3D da vista frontal da PCI, sem e com os pin headers.	111
Figura 109: Janela de configuração dos arquivos gerbers.	112
Figura 110: Janela de configuração dos arquivos de perfuração.....	113
Figura 111: Primeira checagem do projeto no JLCPCB.	115
Figura 112: Configuração da ordem das camadas de cobre da PCI.	116
Figura 113: Demais configurações da PCI.	116
Figura 114: Cotação para a fabricação de 5 PCIs.....	117
Figura 115: Configuração do processo de montagem da PCI.	118
Figura 116: Configuração para a aquisição de componentes.	118
Figura 117: Etapa de <i>upload</i> dos arquivos BOM e centroide.	119
Figura 118: Tela de checagem de <i>part numbers</i>	119
Figura 119: Tela de checagem de rotação e posicionamento dos componentes.	120
Figura 120: Tela do carrinho de compras.	120
Figura 121: Tela com o valor final de fabricação, montagem e frete.....	121
Figura 122: Cotação de fabricação e montagem da PCI do projeto incluindo o frete.....	121
Figura 123: Diagrama de conexão típica da USB no CI CP2102N.	125
Figura 124: Placa de desenvolvimento ESP32 <i>Flight Controller</i> v2.0.	126
Figura 125: Diagrama <i>pinout</i>	128
Figura 126: Custo de aquisição do <i>Crazyflie</i> 2.1.....	132
Figura 127: Custo de aquisição do <i>ESPcopter</i>	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre unidade imperial e métrica.....	59
Tabela 2: Descrição dos componentes do KiCad.	67
Tabela 3: Capacidade de fabricação da PCI.	81
Tabela 4: Capacidade do tamanho da broca/furo.	82
Tabela 5: Capacidade para o tamanho do anel anular.	83
Tabela 6: Capacidade para folgas.	83
Tabela 7: Capacidade para a largura de trilha e espaçamento.	84
Tabela 8: Modos de montagem.	84
Tabela 9: Cotação realiza com a empresa que seria responsável pela fabricação da PCI.	124
Tabela 10: Especificações da <i>ESP32 Flight Controller</i> v2.0.	129
Tabela 11: Comparativo entre as placas de desenvolvimento.	130
Tabela 12: Custo estimado do projeto ao final.	132
Tabela 13: Cálculo de tributação de importação.	133
Tabela 14: Comparativo do custo de aquisição para dois mini drones.	134
Tabela 15: Comparação do custo de aquisição para 5 mini drones.....	135

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	TEMA DO PROJETO	17
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	18
1.2	HIPÓTESE.....	20
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivos Gerais	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	JUSTIFICATIVAS	21
1.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
2.1	HISTÓRIA DOS MULTIROTORES	24
2.2	QUADCÓPTEROS	26
2.2.1	Constituição de um Quadróptero.....	26
2.2.2	Princípio de Funcionamento de um Quadróptero.....	27
2.2.3	Controladoras	28
2.2.4	Sensores	28
2.2.5	Frame.....	31
2.2.6	Comunicação.....	32
2.2.7	Motores	33
2.2.8	Hélices	36
2.2.9	Bateria	36
2.3	PLACAS DE DESENVOLVIMENTO	37
2.3.1	Arduino UNO R3.....	38
2.3.2	Arduino Pro Mini	39
2.3.3	<i>Digispark</i>	39
2.3.4	NodeMCU ESP32S	40
2.3.5	Placa de desenvolvimento do <i>Crazyflie 2.1</i>	41
2.3.6	Placa de Desenvolvimento do <i>ESPcopter</i>	42
2.3.7	Placa de Desenvolvimento para Ferramenta Educacional	43
2.4	VISÃO GERAL DO <i>HARDWARE</i>	44
2.4.1	Visão geral do <i>hardware</i> do <i>Crazyflie 2.1</i>	44
2.4.2	Visão geral do <i>hardware</i> do <i>ESPcopter</i>	47
2.5	PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSO	51
2.5.1	Padrões	51
2.5.2	Placa de Circuito Impresso.....	51
2.5.3	Terminologia	53
2.5.4	Unidades Imperial e Métrica	58
2.5.5	Encapsulamentos	59
2.5.6	Principais Etapas de Projeto de uma PCI.....	62
2.6	SOFTWARE DE DESIGN E LAYOUT	64

2.6.1	KiCad.....	64
2.7	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PCI	67
2.8	BOAS PRÁTICAS DE DESENVOLVIMENTO DE PCBS	69
2.8.1	Regras de DFM	69
2.8.2	Planos de Terra de uma PCI	69
2.8.3	Agrupamento e Posicionamento na PCI.....	70
2.8.4	Camadas da PCI.....	71
2.8.5	Circuitos Digitais	71
2.8.6	Casamento de Impedância.....	72
2.8.7	Circuitos Analógicos.....	72
2.8.8	Capacitor de Desacoplamento	73
2.8.9	<i>Crosstalk</i>	73
2.8.10	Blindagem.....	74
2.8.11	Espessura da Camada de Cobre	75
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	76
3.1	METODOLOGIA	76
3.2	TRABALHO ANTERIOR	77
3.3	MATERIAL E CUSTOS	79
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
4	DESENVOLVIMENTO	80
1.6	REQUISITOS DE DFM	80
4.1.1	DFM para Fabricação da PCI.....	80
4.1.2	DFM para a Montagem.....	84
4.2	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS.....	85
4.2.1	Requisitos Obrigatórios	85
4.2.2	Requisitos Opcionais	86
4.3	PROJETO ELÉTRICO	87
4.3.1	Circuito de Alimentação	88
4.3.2	Circuito da Interface USB	90
4.3.3	Circuito do Microcontrolador	92
4.3.4	Circuito dos Sensores	94
4.3.5	Circuito dos Motores	97
4.3.6	Circuitos dos <i>Pin Headers</i>	99
4.3.7	Circuito dos LEDs	100
4.3.8	Checagem de Erros ERC	101
4.4	LAYOUT DA PCI.....	103
4.4.1	Configurando o PCI	104
4.4.2	Delimitação da PCI e Posicionamento dos Componentes.....	105
4.4.3	Roteamento	107
4.4.4	Checagem de Erros DRC	110
4.4.5	Layout Final.....	111

4.5	GERAÇÃO DE ARQUIVOS DE FABRICAÇÃO	112
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
5	RESULTADOS.....	115
5.1	TESTES E AVALIAÇÃO	115
5.2	EXPERIÊNCIAS ADQUIRIDAS	121
5.2.1	Preço dos Componentes	122
5.2.2	Posicionamento Bilateral dos Componentes	122
5.2.3	Dificuldades de Fabricação e Montagem no Brasil	123
5.2.4	Compra de Componentes Avulsos	124
5.2.5	Manuais de Referência	125
5.3	CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	126
5.3.1	Resumo das Características da Placa	128
5.4	COMPARAÇÃO COM OS CONCORRENTES	129
5.4.1	Previsão de Custo e Comparação.....	131
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
6	CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	136
	REFERÊNCIAS	137
	APÊNDICE A	141
	APÊNDICE B.....	142
	APÊNDICE C	143

1 INTRODUÇÃO

A robótica móvel é um tema bastante relevante e atual, de forma que esta área de estudo, pesquisa e desenvolvimento, proporcionou um grande avanço e impacto na sociedade nas últimas duas décadas.

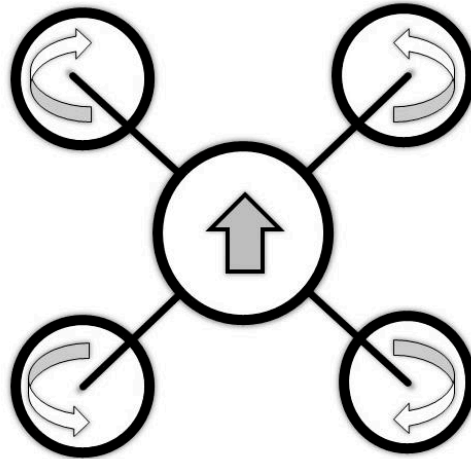
Aplicações práticas de robôs móveis estão nas mais distintas atividades da sociedade, incluindo o uso doméstico (aspiradores de pó e cortadores de grama robóticos), industrial (transporte automatizado e veículos de carga autônomos), urbano (transporte público, cadeiras de rodas robotizadas), militar (veículos aéreos não tripulados – VANTs), transporte de suprimentos e de armamento em zonas de guerra (sistemas táticos e de combate) e em segurança e defesa (controle e patrulhamento de ambientes, resgate e exploração em ambientes hostis). Essas aplicações demonstram a ampla gama de aplicações atuais dos robôs móveis e os interesses econômicos envolvidos em relação ao seu desenvolvimento e aplicação [1].

Na categoria de robôs móveis, há uma subdivisão em robôs móveis aéreos, que podem incluir o uso de aeromodelos, balões, veículos com hélices, bio-inspirados, dentre outros. Nesta classificação de robôs móveis aéreos, estão inclusos os *drones*, apelido popular para uma subcategoria dos VANTs de pás rotativas. Os *drones* constituem de uma das mais complexas máquinas voadoras, devido à sua habilidade de decolar e aterrissar verticalmente, realizar um voo pairado, mover-se para frente e para o lado, enquanto se mantém na mesma altura, além da possibilidade de poder mudar completamente sua direção de voo e de poder conter seu movimento abruptamente [2-4].

Os *drones* ou quadrimotores, tratam-se de uma classe de helicóptero na qual a propulsão é gerada por quatro motores dispostos em forma de cruz, cujas dimensões e potências são iguais. Nessa configuração, os dois motores na diagonal giram no sentido anti-horário, enquanto os outros dois giram no sentido horário, de forma que o torque de reação produzido por cada motor é anulado, conforme a Figura 1. A combinação da variação das velocidades de giro de cada motor permite que o quadrimotor se movimente em qualquer direção no espaço, bem como, possibilita girar em torno do seu próprio eixo sem ter que se deslocar para isso, caracterizando sua grande manobrabilidade [5].

Na última década, houve um avanço enorme desses dispositivos devido a miniaturização e redução de custos de componentes eletrônicos, como microprocessadores, sensores, baterias e nos módulos de comunicação sem fio. Esse avanço possibilitou o desenvolvimento de equipamentos autônomos cada vez menores, alguns com peso inferior a 1 kg [4]. Desta forma, os *drones* se tornaram uma plataforma aérea popular nos laboratórios de pesquisa em robótica.

Figura 1: Esquema de orientação dos motores.



Fonte: Autor.

Um exemplo é o *drone Hummingbird* mostrado na Figura 2, vendido pela *Ascending Technologies*. Com uma envergadura de 55 cm, altura de 8 cm e massa de cerca de 500 g, incluindo uma bateria de polímero de lítio, possui um desempenho bastante satisfatório, como mostrado em Mellinger, et al. [6] e Lupashin, et al. [7].

Figura 2: Exemplo de *drone* da *Ascending Technologies*, o *Hummingbird*.



Fonte: [8].

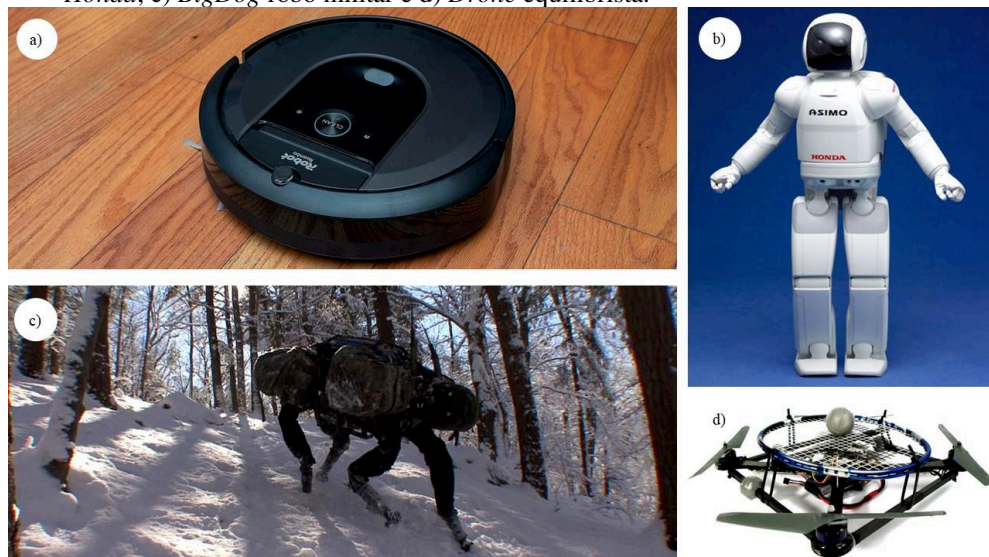
1.1 TEMA DO PROJETO

Este trabalho tem como tema o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso seguindo as boas práticas no desenvolvimento do esquema elétrico e de *design de layout* de placas, cujo resultado final é um projeto confeccionável industrialmente de uma placa de desenvolvimento para um *drone* de proporções reduzidas. Sua elaboração ainda retrata a teoria por trás de um *drone*, bem como, a põe em prática com o projeto de uma placa de desenvolvimento que poderá ser confeccionada e utilizada como ferramenta educacional tanto em escolas quanto em universidades.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Atualmente os robôs são amplamente empregados na sociedade, pode-se mencionar aqui alguns modelos famosos de Robôs Móveis Autônomos – RMAs, Figura 3. Frutos de pesquisa e desenvolvimento que vem acontecendo nesta área, os RMAs domésticos utilizados em limpeza domiciliar como o *Roomba* da *iRobot*, Figura 3 (a); RMAs capazes de caminhar como o humanoide *Asimo* da *Honda*, Figura 3 (b) ou como um cão, *BigDog* da *Boston Dynamics*, Figura 3 (c); e veículos aéreos não tripulados – VANTs, *drones* que fazem equilíbrios com bolas, Figura 3 (d). Ambos evidenciam claramente os avanços e resultados da pesquisa e desenvolvimento em robótica móvel desta última década [1].

Figura 3: Exemplos de RMAs: a) *Roomba*, utilizado para limpeza domiciliar, b) *Asimo*, robô humanoide da *Honda*, c) *BigDog* robô militar e d) *Drone* equilibrista.



Fonte: [9-12].

Diante deste contexto, nota-se a grande importância do desenvolvimento deste campo de pesquisa em nosso país [1], o incluindo nesta revolução que pretende transformar o mundo como se conhece hoje. Faz-se, portanto, necessário a graduação de profissionais habilitados para atuar nesta área em constante crescimento, e mais do que isto, é de grande relevância que se possa desmitificar a robótica visando o incentivo à formação de pessoas capacitadas para trabalhar nesta área.

O uso de *drones* nas mais diversas áreas é tão grande que tem sido abordado até como uma “epidemia” em Clarke and Review [13], dada a quantidade e diversidade de *drones*. Entretanto, encontrar *drones* para serem utilizados como ferramenta educacional não é algo trivial e pode se tornar uma tarefa extremamente difícil. Um *drone* para ser utilizado com este propósito, deve ter como características principais, a facilidade de operar em ambientes *indoor*

e prezar pela segurança, oferecendo o menor risco possível as pessoas, tendo em vista a quantidade de ensaios que serão realizados. Tais características somente são possíveis com a miniaturização ou um *drone* de escala menor, assim, reduzindo drasticamente uma das partes que mais oferece risco, as hélices, pois são proporcionais ao tamanho do *drone*.

A miniaturização dos *drones* possui algumas vantagens, uma delas é a capacidade de operar em ambientes extremamente fechados, que devido ao seu tamanho reduzido pode contornar facilmente os obstáculos e ao chocar em algo não irá causar muito dano. Além disso, os mini *drones* são mais baratos de fabricar do que os modelos maiores e suas peças são facilmente encontradas. Contudo, seu pequeno tamanho faz com que a capacidade de carga útil seja reduzida, limitando o transporte de uma bateria maior e influenciando diretamente no seu tempo de voo.

Além do uso *indoor*, a redução da plataforma é indispensável quando o assunto é economia financeira e em algumas aplicações, destacam-se dispositivos que possuem menor tamanho, pois tornam possível inúmeras aplicações como a polinização de plantas dentro de estufas [14], em centros urbanos para caracterização e busca automatizada de fontes perigosas de substâncias gasosas [15], na educação com o estudo da robótica simulando comportamentos de enxame [16], entre outros.

Na Internet é possível encontrar alguns modelos de *drones* miniaturizados, entretanto, possuem um custo elevado, como por exemplo, o *Crazyflie 2.1* da *Bitcraze*, Figura 4, ou dependem de modificações para serem utilizados para este propósito. E os que não são miniaturizados requerem um cuidado especial, visto que o tamanho das hélices se assemelha a navalhas, podendo facilmente deixar uma pessoa ferida. Usar *drones* de escalas reduzidas traz uma maior segurança para o caso de acidentes e uma maior facilidade de operar em ambientes fechados. Portanto, desenvolver um dispositivo que atenda às necessidades aqui descritas torna-se de extrema importância para auxiliar no aprendizado como ferramenta educacional.

Figura 4: Exemplo de um mini *drone* educacional, *Crazyflie 2.1*.



Fonte: [17].

1.2 HIPÓTESE

É levantada a hipótese sobre a possibilidade de elaborar uma placa de desenvolvimento para mini *drones* de baixo custo e com recursos iguais ou melhores em comparação aos disponíveis comercialmente no mercado. Desta forma, em caso positivo, espera-se que o projeto possa ser aplicado em atividades educacionais e de pesquisa. Auxiliando como ferramenta para novas implementações e testes, seja com novos algoritmos de controle de voo ou mesmo com testes na adição de módulos de sensoriamento e afins.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo deste trabalho é o projeto de uma placa de desenvolvimento para mini *drone*, capaz de ser facilmente configurada tanto em *firmware* quanto em *hardware*, provendo o suporte a entradas e saídas digitais e analógicas e instalação de módulos adicionais.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para a realização deste projeto, espera-se atingir os seguintes objetivos específicos:

1) **Estudar e Determinar os Requisitos para o Mini Drone**

Entender de forma exata o problema a ser resolvido e levantar uma solução e os meios possíveis, estando dentro das possibilidades científicas e tecnológicas disponíveis.

2) **Desenvolver e Projetar uma Placa Controladora para Mini Drones**

Realizar o projeto elétrico e de *design* de *layout* da placa de circuito impresso para a solução levantada.

3) **Relatar a Experiência do Projeto da PCB**

Relatar as observações durante toda as fases do desenvolvimento, executar a análise da solução para o problema proposto, mitigar sua viabilidade em termos de aplicação prática como relação custo/benefício, problemas de industrialização, usabilidade, aceitação e etc.

Com a conclusão de cada objetivo específico, espera-se ter como resultado, um projeto completo da placa de circuito impresso pronta para fabricação e montagem, respondendo assim, a hipótese do trabalho.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Os *drones* são dispositivos que estão constantemente em evolução e, portanto, possuem uma elevada complexidade tecnológica. Tal tecnologia embarcada, juntamente com suas características de operar em ambientes fechados, o torna uma plataforma ideal para inúmeras aplicações e estudos. Entretanto, é importante ressaltar o perigo de quando se está trabalhando com um *drone* de proporções maiores, pois, além de oferecer risco a quem está manuseando, pode ser facilmente danificado, como destacado em Santos, et al. [18]. Neste trabalho há o relato de que em um dos testes houve uma falha que levaram a um acidente inesperado, que gerou um motor com eixo danificado e uma hélice partida ao meio. Esse problema é digno de atenção, pois dependendo do projeto pode ser que não haja recursos suficientes para a compra de peças sobressalentes.

Ter um dispositivo de tamanho reduzido, além de ter um preço mais acessível, torna possível sua operação em ambientes *indoor*, superando uma das dificuldades que muitas pessoas se deparam, como mostrado em Conceição [19]. Onde a maior dificuldade foi o desenvolvimento prático, pois os testes precisavam ser realizados em ambientes externos e espaçosos, além de serem impossibilitados em dias de chuvas abundantes. Além desse problema, o autor relatou que, por não possuir experiências prévias no manuseio de *drones*, acabou danificando inúmeras vezes seu equipamento, tendo que substituir 4 hélices e uma das pernas do trem de pouso.

Drones de tamanhos reduzidos com preço acessível e que ofereçam recursos para modificações para fins educacionais são quase inexistentes no mercado. Como consequência, muitos pesquisadores desistem da área ou acabam por terem que desenvolver um protótipo por si mesmo. Como é o caso abordado em Kushleyev, et al. [20], que para desenvolver a pesquisa teve que construir um *drone* de escala reduzida com as configurações para o seu trabalho, devido ao fato de não ter opções compatíveis disponível no mercado.

Atualmente no mercado podem ser encontrados alguns mini *drones* com fins educacionais, do qual destaca-se o *Crazyflie 2.1* como já apresentado anteriormente na Figura 4. Este mini *drone* faz parte de um *kit*, na qual foi desenvolvido exclusivamente para ser uma plataforma de desenvolvimento de código aberto. Sua principal característica é a facilidade de troca de módulos, podendo adicionar mais sensores. Em contrapartida, seu preço elevado não contribui para a realidade brasileira, onde as universidades têm sofrido com vários cortes em seu orçamento, o que faz do *Crazyflie 2.1* uma escolha pouco acessível.

Além deste, é possível encontrar o *Ryze Tello drone* EDU [21], Figura 5, que se trata de uma versão voltada para educação do mini *drone* *Ryze Tello* da fabricante chinesa DJI, este também é muito famoso, não devido a sua aplicação, mas pelo nome de sua fabricante que é muito renomada no setor de *drones*. Sua versão EDU é uma adaptação da versão *stock* para ser utilizado no desenvolvimento lógico das crianças, visto que é mais um brinquedo do que uma ferramenta de pesquisa que possa ser levada para o laboratório de uma universidade. O dispositivo possui um ambiente de desenvolvimento bastante intuitivo, porém um tanto quanto limitada, se comparada ao anterior, pois este é destinado a pessoas iniciantes, permitindo o desenvolvimento apenas de algoritmos de automação, sem a possibilidade de alteração no *firmware* original ou serem adicionados mais módulos ou funcionalidades.

Figura 5: *Ryze Tello drone* EDU.



Fonte: [21].

Ainda existe o *ESPcopter*, Figura 6, baseado no módulo ESP8266 comumente usados em projetos devido ao fato de possuir comunicação *Wi-Fi*. O *ESPcopter* foi desenvolvido para ser um *drone* interativo e programável [22]. De tamanho reduzido o *ESPcopter* chamou atenção numa plataforma de financiamento o *crowdfunding*, onde teve êxito em seu financiamento e encontra-se disponível para compra por meio de 4 kits que contam com apenas o *ESPcopter* ao *ESPcopter* e alguns módulos e peças de sobreposição. Devido ao grande número de amantes do ESP8266 é bem capaz de se tornar um forte concorrente para o *Crazyflie 2.1*. Contudo, seu valor apesar de ser mais barato quando em comparação ao *Crazyflie 2.1*, ainda é uma ferramenta com custo elevado para a realidade brasileira. O que colabora para o desenvolvimento de um projeto com custo mais acessível e tão bom quanto para cobrir esta lacuna.

Figura 6: *ESPcopter*.

Fonte: [22].

Os principais problemas encontrados atualmente no uso de *drones* são a falta de protótipos de tamanho reduzidos, de baixo custo e que satisfaçam os requisitos de modularidade de *hardware* e *firmware*, esses exigidos para atuar como ferramenta educacional. Faz-se, portanto, necessário o desenvolvimento de um projeto de um *drone* que satisfaça os pontos levantados. Porém, o projeto de um *drone* é bastante complexo e envolve várias etapas de desenvolvimento. Desta forma, o escopo deste trabalho será o processo de desenvolvimento de uma placa de circuito para o uso em mini *drones*, podendo esta ser utilizada como ferramenta educacional, contornando todas as dificuldades reportadas.

Espera-se que com este projeto, possa ajudar a cobrir a lacuna imposta pela falta de *drones* focados e aptos para desempenhar o papel como ferramenta educacional, sendo de baixo custo. E ainda mitigar parte do projeto de um *drone*, podendo este servir como referência para novos projetos, facilitando o estudo, pesquisa e desenvolvimento de novas soluções e produtos. Além disso, o trabalho será desenvolvido e compartilhado para que outras pessoas possam usufruir e contribuir com o projeto, visando sua disseminação não apenas no mundo acadêmico, mas também no *maker* que tem ganhado bastante força nos últimos anos.

1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o problema e apontado as razões e motivações pelas quais se fez necessária sua solução. Onde espera-se que com o desenvolvimento deste trabalho possa contribuir para que surjam novos *drones* focados para o setor de estudo e pesquisa. No próximo capítulo será abordado a parte teórica que será utilizada para o desenvolvimento do projeto, ressaltando para as características e diversos mecanismos que serão utilizados. No capítulo 3, é discutido os materiais e métodos, seguido pelo desenvolvimento no capítulo 4, resultados no capítulo 5 e ao final por meio do capítulo 6, é abordado as considerações finais como um todo.

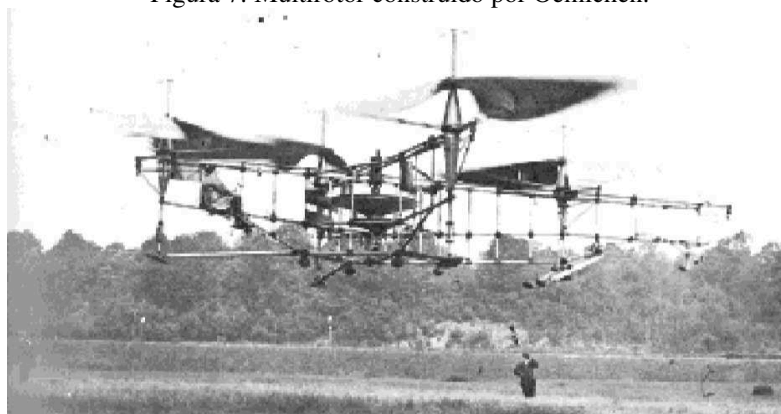
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são discutidos a fundamentação teórica necessária para um melhor entendimento do trabalho, servindo de embasamento teórico, apresentando desde a história dos multirotores, aprofundando em *drones*, abordando todo o seu *hardware* para o desenvolvimento do trabalho proposto.

2.1 HISTÓRIA DOS MULTIROTORES

Os multirotores ou multicópteros possuem uma história muito rica e sua evolução começou durante o início do século XIX. O primeiro helicóptero de quatro rotores foi construído em 1907 por Louis Breguet. O segundo multirotor foi desenvolvido por um engenheiro francês Etienne Oemichen, que contava com um quadro construído utilizando tubos de aço, 4 rotores, e oito hélices, conforme a Figura 7 [23].

Figura 7: Multirotor construído por Oemichen.



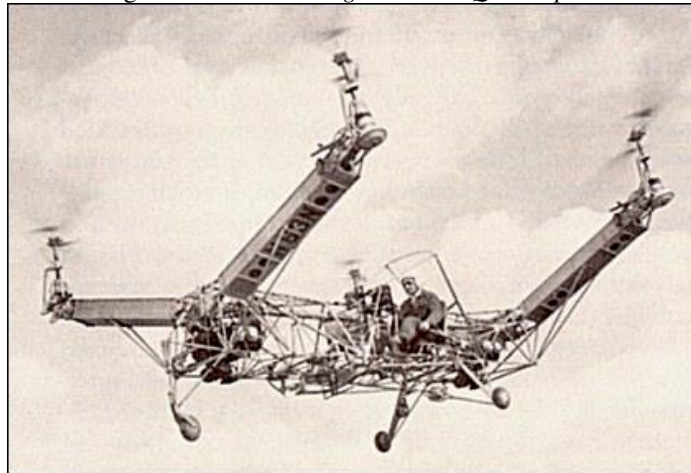
Fonte: [23].

Em 1950, o *Convertawings* reviveu o conceito de Oemichen, sendo projetado para ser o protótipo de linhas de helicópteros militares e civis. O projeto apresentava dois motores que acionavam através de um sistema de correias em V quatro rotores, conforme a Figura 8. Tal configuração possibilitou que operasse sem a necessidade de um rotor de cauda e para seu controle bastava modificar a pressão entre os motores. Seu primeiro protótipo foi construído em 1955, tendo seu primeiro voo em *Long Island* em março de 1956 e comprovou seu *design* [24].

Devido as várias restrições técnicas, tais como autonomia, segurança, durabilidade, resistência entre outros, os multirotores não ganharam devida importância, sendo abandonados e substituídos pelos helicópteros. Nas últimas décadas os avanços de mecanismos de controle, dispositivos micro elétricos e micro mecânicos tornou possível reviver os multirotores, onde

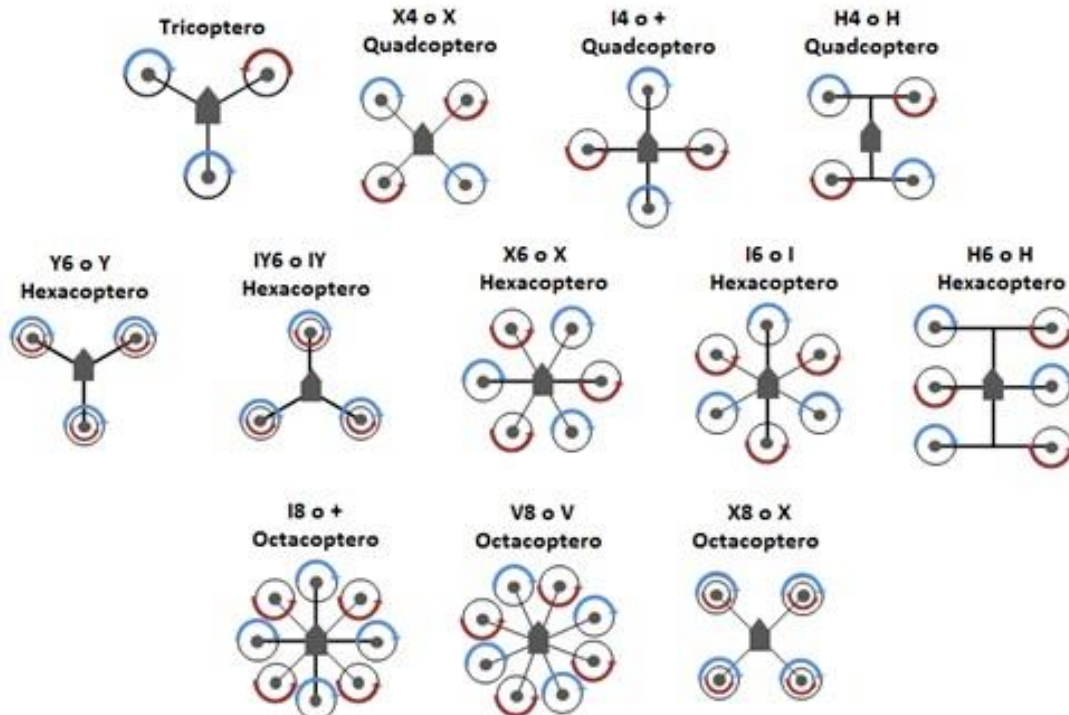
atualmente são indispensáveis em várias aplicações. Que além de contornar alguns problemas da sociedade moderna criou a necessidade de aeronaves com uma maior capacidade de manobra e de carga. Os multicópteros podem ser classificados de acordo com a sua estrutura e quantidade de rotores, ou seja: tricóptero (três), quadcóptero (quatro), hexacóptero (seis) e assim sucessivamente conforme indicado na Figura 9. Sendo a configuração de 4 rotores ou quadcóptero a que se popularizou, devido a sua simplicidade, capacidade de manobra e alta confiabilidade.

Figura 8: *Convertawings Model A Quadcopter*.



Fonte: [24].

Figura 9: Classificação dos multirotores.

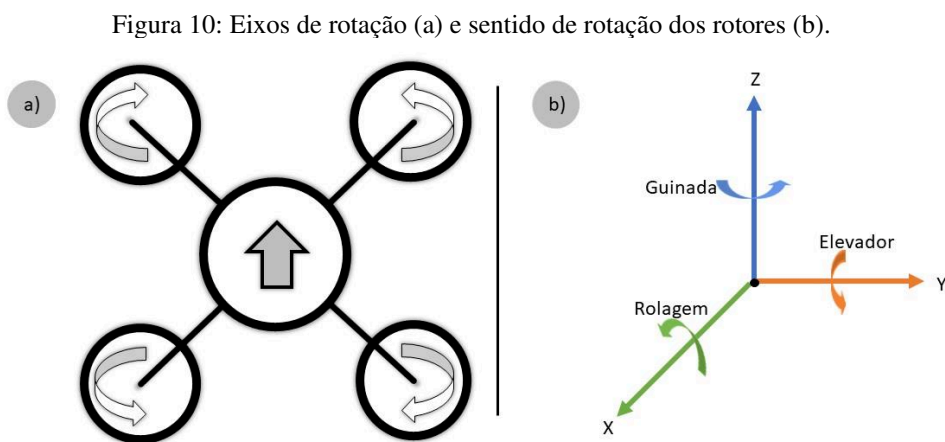


Fonte: [25].

2.2 QUADCÓPTEROS

Os quadcópteros ou mais popularmente conhecidos como *drones*, fazem parte de uma subcategoria dos VANTs de pás rotativas, na qual a propulsão é gerada por quatro motores dispostos em forma de cruz, cujas dimensões e potências são iguais. Um *drone*, essencialmente é um robô capaz voar de forma autônoma através de planos de voo ou pode ser controlado remotamente. Basicamente, sua estrutura é composta por quatro rotores, sendo dois pares de conjunto motor e hélice, cada par girando em um sentido, horário e anti-horário de forma que o torque de reação produzido por cada rotor é anulado, conforme Figura 10 (a). Suas rotações quando combinadas geram um torque, que faz com que as hélices criem uma tração vertical de elevação para cima, elevando o *drone* no ar ou fazendo mover-se [5].

Os movimentos de um *drone*, Figura 10 (b), são semelhantes com os da aviação, sendo o movimento de elevação, referente a quanto a aeronave está inclinada para frente ou para trás; rolagem, representa o quanto a aeronave está inclinada para esquerda ou direita; guinada, representa o giro da aeronave em torno de seu próprio eixo; por último e somente no caso de *drones* a aceleração, que é responsável pelo movimento vertical da aeronave.



Fonte: Autor.

2.2.1 Constituição de um Quadcóptero

De acordo com Juniper [26], um quadcóptero é constituído por:

- **Frame:** Estrutura e suporte para os componentes do *drone*.
- **Motores:** Conversores de energia elétrica em energia mecânica.
- **ESCs:** Controladores de velocidade dos motores.
- **Hélices:** Fazem parte do conjunto de propulsão que quando acoplados aos motores geram uma força mecânica de tração.

- **Comunicação:** Sistema responsável por receber e enviar informações de telemetrias e processar os comandos do piloto.
- **Controlador:** Placa com diversos circuitos eletrônicos, maioria constituída por:
 - Microcontrolador;
 - Acelerômetro;
 - Giroscópio;
 - Barômetro (opcional);
 - Magnetômetro (opcional);
 - GPS (opcional).
- **Bateria:** Fonte principal de fornecimento de energia.

Cada tópico será abordado neste capítulo dando ênfase ao básico necessário para o desenvolvimento deste projeto.

2.2.2 Princípio de Funcionamento de um Quadróptero

Seu voo depende da força de tração gerada pelos motores, onde o somatório de cada força deve ser maior que a força peso, portanto para o quadróptero se mover no eixo z, deve ser gerada uma força de mesma intensidade por cada motor evitando alterar o ângulo nas coordenadas x e y. Logo numa situação ideal, para desenvolver a mesma quantidade de tração todos os motores tem que girar com velocidades iguais. Na prática situações ideais não existem e fazem necessário o uso de um dispositivo inteligente capaz responder a variados estímulos [26]. Portanto, para o perfeito funcionamento de um quadróptero é indispensável o uso de um microcontrolador, sendo este responsável por coletar os dados dos sensores, processar e tomar uma ação. Tal componente é a peça fundamental e cérebro do quadróptero, tendo todas as operações gerenciadas por ele, incluindo o controle de velocidade individual de cada motor, que torna possível a compensação de variações inesperadas de forças externas.

Um *drone* somente consegue pairar devido a compensação de velocidade dos motores que é resultado de cálculos complexos utilizando os dados provenientes dos sensores. O resultado é obtido por meio de um controle Proporcional Integrativo e Derivativo ou mais conhecido como PID [26]. O PID é capaz de prever movimentos do dispositivo atuando de forma a compensar determinados estímulos, tais como uma perturbação devido a velocidade do vento que atinge o quadróptero, centro de gravidade mal distribuído que faz com que o dispositivo possua um peso maior em um dos lados dos motores, entre outros.

Os sensores indispensáveis para seu voo são o acelerômetro e giroscópio, ambos servem para coletar dados de posicionamento, tais como os ângulos referentes aos três eixos x, y, e z, bem como a sua aceleração em cada eixo. Os dados obtidos são enviados ao microcontrolador e utilizados nos cálculos de compensação PID, responsável por mantê-lo pairado ou em movimento.

2.2.3 Controladoras

A controladora é o nome designado a placa eletrônica principal de qualquer *drone*. Em outras palavras, a controladora é semelhante a uma placa mãe de um computador, sendo ela a peça principal, embarcando grande parte do *hardware*. Atualmente no mercado é possível encontrar diversos tipos de controladoras, onde são diferenciadas pelo poder de processamento, quantidade de recursos embarcados ou por aplicação. Uma controladora geralmente dispõe de um microcontrolador, sensores e conversores de tensão, além da eletrônica para unificar todos os periféricos [27].

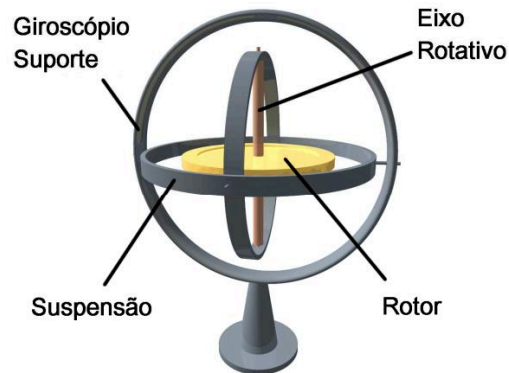
2.2.4 Sensores

Na navegação de um sistema autônomo é necessário que seja definido o sistema de coordenadas global sobre o qual será computada a posição do veículo, a posição do alvo e sua trajetória, também sobre este sistema são definidas a velocidade e a orientação [28]. Diante deste contexto, um sensor é um dispositivo que responde a um determinado estímulo, seja ele de natureza física ou química, convertendo-o em outra grandeza física que pode ser utilizada para medição ou monitoramento. Abaixo é mostrado alguns tipos de sensores que quando juntos formam a *Inertial Measurement Unit* – IMU ou unidade medição inercial que é fundamental para a navegabilidade do *drone*.

2.2.4.1 Giroscópio

Inventado por Léon Foucault em 1852, o giroscópio é um dispositivo que se baseia nos princípios físicos newtonianos, sendo amplamente empregado na aviação e navegação marítima. Basicamente, o giroscópio mecânico clássico, possui um suporte que contém dois círculos articulados com um rotor girando em torno do próprio eixo, conforme mostra a Figura 11 [29].

Figura 11: Exemplo de um giroscópio clássico mecânico.



Fonte: [29].

Seu funcionamento se deve a estabilização do eixo do rotor que quando acionado por um motor ganha rotação e pelo princípio da inércia mantém sua direção fixa em relação ao espaço, enquanto os outros círculos giram livremente. A inércia vinda da rotação impede o dispositivo rotativo de alterar sua inclinação quando se tem uma velocidade considerável, tal resistência se deve ao princípio da inércia [30]. Devido a essa característica o giroscópio é utilizado para ter referência do horizonte, podendo através dele monitorar a inclinação de um corpo. Entretanto, o seu uso era limitado, por conta do atrito mecânico envolvido, como consequência o dispositivo foi abandonado. Com a chegada dos semicondutores, possibilitou o desenvolvimento de um dispositivo de sensoriamento preciso e de baixo custo, os *Micro Electro Mechanical Systems* – MEMS [29].

2.2.4.2 Acelerômetro

O acelerômetro é um MEMS desenvolvido para captar e calcular a média da aceleração de uma partícula ou objeto, quando esta é submetido a uma força externa. A variação desta força resulta em acelerações dinâmicas que como consequência altera a velocidade do objeto, sendo possível captar até vibrações ou colisões. O acelerômetro pode também trabalhar com aceleração estática, como é o caso da decomposição da aceleração gravitacional em mais de um eixo quando há uma inclinação. Basicamente, o acelerômetro converte a aceleração de um objeto em um sinal elétrico, podendo este ser lido e interpretado por um microcontrolador [31]. Devido a sua grande importância para auxiliar na detecção de movimento de uma partícula o acelerômetro é utilizado nas mais diversas aplicações e áreas, como por exemplo na navegação, marítima, aviação, monitoramento de vibrações, reconhecimento de padrões de movimentos em *smart watches* e *smartphones*.

2.2.4.3 Magnetômetro

O magnetômetro é um sensor empregado na medição do campo magnético da Terra, sendo ele utilizado para apontar o sentido e medir a intensidade de campos magnéticos. Existem dois tipos de magnetômetro, o escalar e o vetorial. O escalar é capaz de medir a magnitude do campo magnético, já o vetorial mede a magnitude e o sentido do campo magnético na direção em que está alinhado. O magnetômetro é bastante utilizado, principalmente em navegação de precisão, onde o controle se baseia em instrumentos, como por exemplo na navegação marítima, aviação, dispositivos autônomos entre outros [32].

2.2.4.4 Barômetro

O barômetro é um dispositivo capaz de fornecer a leitura de pressões atmosféricas, onde na meteorologia é utilizado para detectar padrões de variações climáticas conforme a variação da pressão. Já na robótica, especificamente nos *drones*, pode ser utilizado como altímetro, sendo este responsável por mantê-lo estável a uma determinada altura, uma vez que a pressão varia de acordo com a altitude [33].

2.2.4.5 Inertial Measurement Unit – IMU

Uma *Inertial Measurement Unit* – IMU, Figura 12, constitui de um circuito integrado, no qual possui acelerômetro e giroscópio no geral, entretanto, há variações em que pode vir também com magnetômetro e barômetro [27]. A IMU é fundamental em dispositivos, cujo funcionamento se dá por meio de instrumentos, sendo ela usada para determinar a taxa de aceleração e mudanças na posição, tais como um movimento de rotação, inclinação e guinada.

Figura 12: Módulo IMU MPU6050.



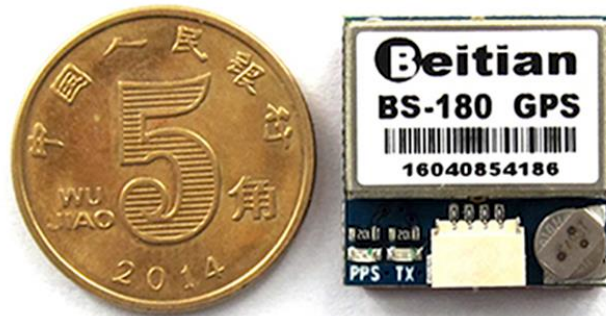
Fonte: Autor.

2.2.4.6 Global Positioning System – GPS

O *global positioning system* ou popularmente mais conhecido pelas suas siglas GPS é um sistema de navegação que envolve satélites e computadores para determinar a latitude, longitude e altitude de um receptor no ar, espaço solo, e mar. O GPS permite que qualquer usuário possua a seu dispor, no mínimo três satélites para serem rastreados, independentemente de sua localização na superfície terrestre. Seu funcionamento parte do princípio de que as posições dos satélites são conhecidas, então é possível determinar as coordenadas do usuário por meio do fenômeno físico, efeito Doppler. Em termos geométricos, seriam necessários apenas três satélites para determinar as coordenadas, entretanto, um quarto satélite se faz necessário, em razão da não sincronia entre os relógios dos satélites e do utilizador [34].

Tal dispositivo é fundamental, quando o assunto é automação, sendo este amplamente utilizado em diversas aplicações, tais como *tracking*, robôs autônomos, navegação por instrumentos, entre outros. Existem diversos tipos e tamanhos do GPS e o mais comum de serem encontrado para VANTs são em módulos conforme mostra a Figura 13.

Figura 13: Módulo micro GPS Beitian.



Fonte: [35].

2.2.5 Frame

O *frame*, se refere a estrutura do *drone*, que é constituída geralmente de um material rígido e leve, composto por uma parte central, onde é encaixada a controladora e demais *hardwares*. Partindo do centro, surgem ramificações ou braços, dos quais são acoplados os motores. Existindo diversos tipos de *frames*, com configurações de 3, 4, ou 6 braços, além disso existem *frames* específicos para algumas aplicações, sendo indicados de acordo com seu material e geometria [36].

A configuração do frame indica a categoria do *drone*, podendo este ser dividido em 3 categorias:

- **Racer:** são *frames* relativamente leves e de alta resistência, geralmente feitos em fibra de carbono em formato de X no qual a distância entre os motores da frente

e os de trás é maior do que a distância dos motores laterais, de forma a permitir um maior controle no ângulo de ataque ou *elevator*. Facilitando o controle quando o dispositivo é utilizado para se locomover em alta velocidade e desviar de obstáculos. Devido essa característica, este tipo de *frame* é bastante utilizado por praticantes de corridas de *drone*, Figura 14 (a);

- **Freestyle ou H:** este tipo de *frame* é parecido com o de um *Racer*, porém se difere por ter uma distância entre os motores laterais maior. Tal ajuste faz com que seja possível ter mais estabilidade em manobras que envolvem o movimento de rolagem, muito utilizado por praticantes do estilo de voo *freestyle*, Figura 14 (b);
- **Frames personalizados:** estes são frames que não obedecem a um determinado padrão, podem ser tanto como simétricos quanto assimétricos, com relação à quantidade e alongamento dos braços.

Figura 14: *Frame racer* (a) e *frame freestyle* (b).



Fonte: [36, 37].

2.2.6 Comunicação

A comunicação é um fator muito importante e necessário em qualquer VANT. É por meio dela que é realizado a troca de informação entre um operador e o VANT, no qual está sendo controlado remotamente. Tornando possível enviar comandos, por exemplo, para o dispositivo se locomover em uma determinada direção e até mesmo receber informações de telemetria ou estatísticas de seu voo. Para a comunicação, o dispositivo deve ser equipado com um receptor compatível com o tipo de comunicação utilizado, este é responsável por receber o sinal e envia-lo ao microcontrolador que irá processá-lo e tomar uma ação.

Existem diversas formas de fazer a comunicação entre o operador e o dispositivo, onde a mais comum é feita por radiofrequência. A comunicação por radiofrequência pode ser realizada através do uso de transceptores, tais como o *Wi-Fi*, podendo este ser controlado por

qualquer dispositivo capaz de se conectar à rede *Wi-Fi*. Também pode ser feita por *Bluetooth* ou o mais utilizado o rádio controle TX que dispõe de uma estrutura física totalmente adaptada para o controle do dispositivo [38].

2.2.6.1 Rádio controle

O rádio controle parte do mesmo princípio de emissores de rádio, onde cada rádio comercial possui uma frequência própria de operação. Já o rádio controle a maioria geralmente opera na frequência de 2.4 GHz, dispondo de vários canais de comunicação que podem variar de 2 a 10 canais, podendo ter essa capacidade alterada em dispositivos mais complexos. Os canais podem ser modulados em FM (*Frequency Modulation*) ou AM (*Amplitude Modulation*) [39].

Os rádios atuais tal como o Taranis QX7, Figura 15, mais tecnológicos dispõe de processadores dos quais são capazes de codificar o sinal, melhorando a precisão do rádio e reduzindo a interferência. As codificações além de tornar a comunicação melhor, permite diversas funções adicionais tal como a curva de atuação dos *sticks*, tornando mais responsivo ou menos responsivo com uma simples configuração no rádio.

Figura 15: Rádio controle Taranis QX7.



Fonte: [40].

2.2.7 Motores

Os motores de uma forma mais geral são dispositivos que convertem alguma forma de energia em energia mecânica, sendo eles responsáveis por transmitir a energia mecânica gerada para as hélices girarem, que por sua vez produzem a tração necessária para o *drone* sair do chão. Os motores comumente utilizados nos *drones* são de natureza elétrica, convertem a energia

vinda de uma bateria em energia mecânica gerando assim a sustentação para manter o *drone* no ar [26].

Quando se trata de motores elétricos é de costume considerá-los como uma caixinha fechada, não importando suas configurações ou características. Entretanto, saber suas configurações e olhar dentro da caixinha é crucial, pois um sistema bem otimizado pode ter uma vida útil maior, desempenho melhor e render minutos a mais de voo. Logo, saber e entender os tipos de motores e suas configurações se faz importante para o desenvolvimento de um *drone*. Os motores elétricos podem ser classificados de acordo com a sua construção em dois tipos, escovados ou *brushed* e sem escova ou *brushless*. Ambos possuem sutis diferenças, apesar de trabalharem da mesma forma, as quais serão abordadas nos próximos tópicos.

Além disso, é necessário entender a medida de rotação dos motores que é comumente encontrada por um número seguido da sigla kv. A quantidade de rotações por minuto ou RPM é uma forma de mensurar o quão rápido um motor é, no caso dos motores dos *drones* essa medida é uma relação entre a tensão em que o motor será alimentado e a constante de velocidade kv. A constante de velocidade é encontrada facilmente nas especificações do motor, e por meio dela pode ser determinado o RPM, para isso basta multiplicar a tensão em que o motor será alimentado pela constante de velocidade, o resultado é a quantidade de rotações por minuto [41].

2.2.7.1 *Brushed*

Os motores *brushed*, Figura 16, são caracterizados quanto a sua construção, na qual é utilizado escovas para fornecer corrente aos enrolamentos por meio do contato físico com os comutadores. Por conta deste contato físico e devido ao fato de as bobinas estarem fixas no eixo do motor, as escovas têm sua vida útil reduzida pelo atrito, implicando diretamente no tempo de vida útil do motor [42]. Além disso, sua característica colabora para uma eletrônica mais simplificada e de baixo custo, abaixo é abordado as suas vantagens e desvantagens.

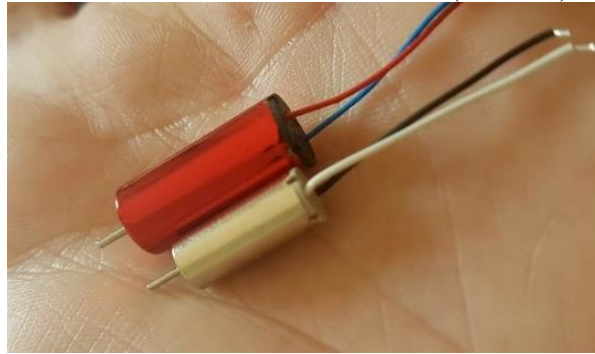
Os motores *brushed* possuem as seguintes vantagens:

- Baixo custo;
- Controle simples;
- Não precisa de um controlador dedicado de velocidade.

E as seguintes desvantagens:

- Menor eficiência;
- Tempo de vida útil muito pequeno, cerca de 8 h.

Figura 16: Motores *Brushed* RacerStar Coreless 8520 (vermelho) e *Coreless* 615.



Fonte: Autor.

2.2.7.2 *Brushless*

Os motores *brushless*, Figura 17, ou sem escova são parecidos com o *brushed*, diferenciando pelo fato de posicionar os enrolamentos na parte estacionária do motor, eliminando o uso das escovas. Entretanto, tal alteração não permite a comutação por meio do giro do motor como é o caso dos motores *brushed*, sendo necessário um circuito eletrônico para realizar a comutação e controle de velocidade. Tal circuito eletrônico é denominado de *electronic speed control* – ESC.

Os motores *brushless* possui as seguintes vantagens:

- Alta eficiência;
- Tempo de vida ligeiramente maior podendo durar anos;
- Alta confiabilidade;
- Baixa inércia e alta resposta dinâmica;

E as seguintes desvantagens:

- Necessita de um circuito controlador de velocidade ESC;
- Custo elevado;

Figura 17: Motor *Brushless* AmaxIno 1103 - 7500 kv.



Fonte: Autor.

2.2.8 Hélices

A hélice, Figura 18, é responsável por tornar a potência gerada pelo motor em potência útil em forma de tração, empurrando o *drone* para cima. As hélices podem ser de 2 ou mais pás em um perfil aerodinâmico próximo ao das asas de um avião [26]. Por estarem sujeitas a inúmeras variações de força de arrasto aerodinâmico as hélices precisam ser feitas de materiais leves e altamente resistentes, capazes de suportar todo o estresse aerodinâmico, além de ter um custo relativamente baixo, devido ao fato de serem as áreas mais expostas no *drone* e sempre acabam danificadas em acidentes [43].

Quanto ao seu perfil, as hélices de quadcópteros possuem o passo fixo, diferenciando de helicópteros que possuem o passo variável e alguns modelos de aviões tais como os turbohélices que também possuem o passo variável. A quantidade de pás, tamanho e passo variam de acordo com o tipo do motor utilizado, podendo esta ter um perfil mais agressivo, feita para um motor que tenha mais torque do que potência ou menos agressivo para trabalhar com um motor que seja mais potente e alcance RPMs elevados.

Figura 18: Hélice 55 mm.



Fonte: Autor.

2.2.9 Bateria

A bateria, Figura 19, é a fonte de energia que alimenta todos os circuitos eletrônicos e motores dando vida ao *drone*. As baterias podem ser de íons de lítio (Li-Ion) ou de polímero de lítio (Li-Po), sendo a mais utilizada nos *drones* a de Li-Po. Uma vez que é capaz de armazenar mais energia num menor espaço, ser mais leve e capaz de fornecer uma alta taxa de descarga [44]. Assim garante uma boa entrega de potência, visto que os *drones* são dispositivos que demandam uma grande quantidade de energia para alimentar todos os seus recursos, sendo os motores os principais responsáveis pela drenagem da bateria.

Figura 19: Bateria CNHL de 7.4 V, 2S, 450 mAh e 70 C.



Fonte: Autor.

A escolha de uma bateria para uma determinada aplicação é baseada nas características informadas em seu *datasheet*. Sendo as principais informações levadas em consideração, a quantidade de células, taxa de descarga e a capacidade de carga [26].

- **Quantidade de células:** se refere ao número de células de 3.7 V ligadas em série, esse arranjo permite ter uma tensão maior, uma vez que a tensão resultante é o somatório da tensão de todas as células em série. Este parâmetro é utilizado para saber a tensão final nominal da bateria e é representado pela letra S;
- **Capacidade da bateria:** é dada por um valor seguido da unidade mAh (mili ampère hora) e representa a quantidade de energia armazenada na bateria, como por exemplo, uma bateria de 2000 mAh pode fornecer uma corrente de 2000 mA por 1 hora;
- **Taxa de descarga:** é a quantidade de corrente que a bateria consegue suprir sem ter suas características alteradas. A taxa de descarga é dada pelo valor informado na bateria e é representado pela letra C. Para saber a corrente máxima suportada pela bateria basta multiplicar a taxa de descarga pela capacidade de armazenamento, assim uma bateria de 2000 mAh com taxa de descarga de 10C consegue alimentar uma carga que consome no máximo 20 A.

2.3 PLACAS DE DESENVOLVIMENTO

As placas de desenvolvimento são placas de circuito impresso que contam um SoC (*System-on-Chip*) que possuem diversas entradas e saídas, seja em forma de pinos, ou por conexão USB [45]. Os pinos são necessariamente para interação microeletrônica, com a utilização de módulos, interfaces de comunicação e sensores. Devido a facilidade ao acesso a

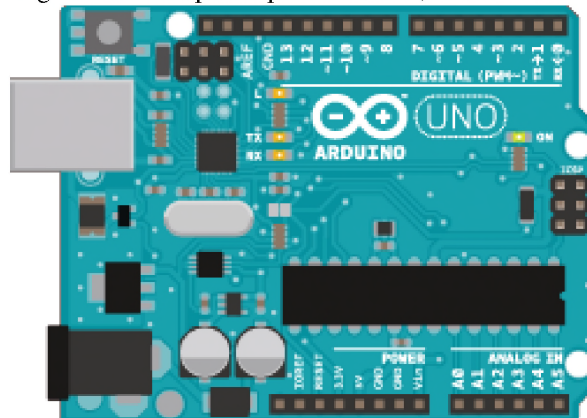
esses pinos, inserção de módulos, as placas de desenvolvimento são bastante modulares e acabam se tornando ótimas ferramentas para o desenvolvimento de projetos e protótipos.

Atualmente existem inúmeras placas de desenvolvimento, que englobam SoCs desde os mais simples aos mais poderosos, podendo alguns modelos serem capazes de executar sistemas de tempo real - RTOS. Abaixo é abordado um breve *review* de algumas placas de desenvolvimento, incluindo duas placas de desenvolvimento concorrentes do mesmo nicho do projeto a ser desenvolvido neste trabalho.

2.3.1 Arduino UNO R3

A placa de desenvolvimento Arduino UNO R3, Figura 20, é uma placa de prototipagem de *hardware* livre bastante conhecida e utilizada por muitos desenvolvedores e entusiastas devido ao seu ecossistema. Pois permite trabalhar tanto com o *hardware*, quanto com o software, acelerando o estudo e desenvolvimento de protótipos robóticos devido a sua grande versatilidade e configuração. Uma vez que a plataforma permite a criação de algoritmos de controle através da linguagem de programação C/C++ por meio de sua *Integrated Development Environment* – IDE [46].

Figura 20: Exemplo de placa Arduino, Arduino UNO.



Fonte: [47].

A plataforma Arduino serviu de inspiração para o desenvolvimento de controladoras como as que serão abordadas no próximo tópico. Em contrapartida, a sua grande versatilidade e facilidade de encontrar módulos, torna possível a utilização como controladora, prova disso é o trabalho de Santos, et al. [18].

Especificações técnicas:

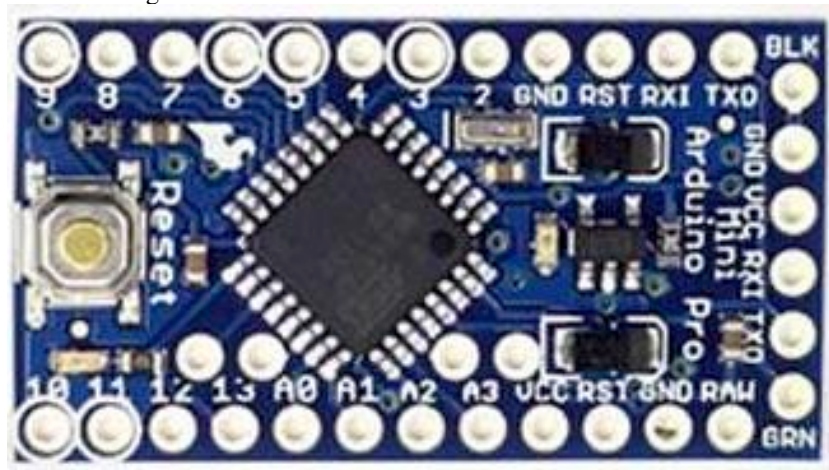
- Microcontrolador: ATmega328P de 8 bits
- Tensão operacional: 5 ~ 12 V
- Pinos GPIOs: 14

- Memória *flash*: 32 kB
- SRAM: 2 kB
- *Clock*: 16 MHz

2.3.2 Arduino Pro Mini

Baseado no mesmo microcontrolador do Arduino UNO R3, porém em sua versão SMD, o Arduino Pro Mini, Figura 21, é uma placa de desenvolvimento para aplicações e instalações onde o espaço é reduzido. O Arduino Pro Mini destina-se à instalação semipermanente em objetos ou exposições. A placa vem sem os *pin headers* pré-montados, permitindo o uso de vários tipos de conectores ou solda direta de fios.

Figura 21: Placa de desenvolvimento Arduino Pro Mini.



Fonte: [48].

Há duas versões do Arduino Pro Mini, uma rodando a 3,3V e *clock* de 8 MHz, e o outro a 5V e *clock* 16 MHz. Além destes dois modelos, as suas especificações técnicas não diferem do Arduino UNO, contando apenas com o adicional de mais dois pinos de entradas analógicas que no microcontrolador no socket do Arduino UNO não possui.

2.3.3 Digispark

A placa de desenvolvimento ATTiny85 Digispark, Figura 22, é uma placa que possui o microcontrolador ATTiny85. E sua proposta é ser uma das menores placas de desenvolvimento, facilitando sua implementação em projetos que tenham pouco espaço disponível. Além disso, a *Digispark*, conta com interface USB e permite ser programada diretamente na USB do computador pela IDE do Arduino [49].

Figura 22: Placa de desenvolvimento Digispark.



Fonte: [49].

Especificações técnicas:

- Microcontrolador: ATTiny85 de 8 bits
- Tensão operacional: 5 ~ 35 V
- Pinos GPIOs: 6
- Memória *flash*: 8 kB
- SRAM: 512 kB
- *Clock*: 16 MHz

2.3.4 NodeMCU ESP32S

A NodeMCU ESP32S, Figura 23, é uma placa de desenvolvimento de alta performance para aplicações que englobam comunicações tais como *Wi-Fi*. Sua placa é uma evolução da já conhecida NodeMCU baseada no SoC ESP8266, com maior poder de processamento e o adicional de comunicação *Bluetooth* BLE versão 4.2. Além destas características, esta placa se destaca pelo suporte ao sistema operacional de tempo real, o *freeRTOS*, além de prover suporte para atualizações via OTA [50].

Figura 23: Placa de desenvolvimento NodeMCU ESP32S.



Fonte: [50].

Especificações técnicas:

- Microcontrolador: Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6
- Tensão operacional: 5 ~ 9 V
- Pinos GPIOs: 11
- Memória *flash*: 4 MB
- ROM: 448 kB
- SRAM: 520 kB
- *Clock*: 240 MHz

2.3.5 Placa de desenvolvimento do *Crazyflie 2.1*

O *Crazyflie 2.1*, Figura 24, é uma plataforma de desenvolvimento de voo de código aberto versátil que pesa apenas 27g. É equipado com sensores: acelerômetro, giroscópio, barômetro e rádio de baixa latência/longo alcance, bem como *Bluetooth* LE. Sua proposta é facilitar o desenvolvimento de novos projetos de educação e pesquisa para a plataforma dos *drones*, destacando-se por possuir um extenso ecossistema de expansões de software e decks [17].

Figura 24: Placa de desenvolvimento *Crazyflie 2.1*



Fonte: [17].

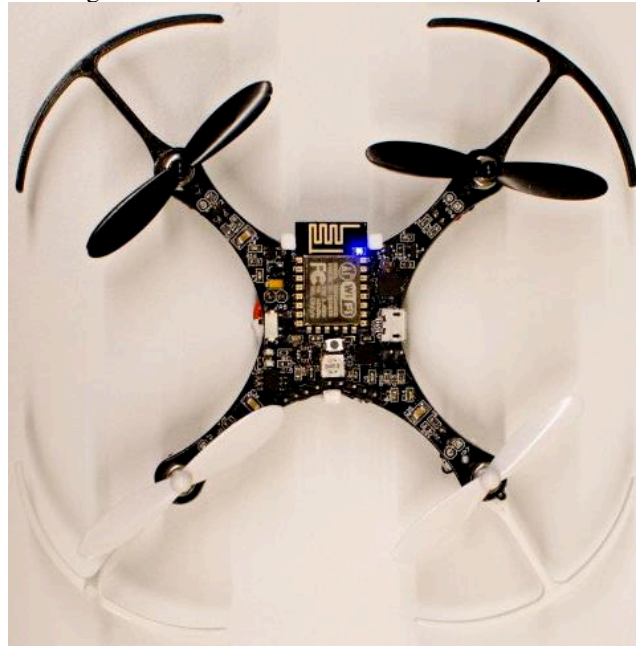
Especificações técnicas:

- Microcontrolador: STM32F405 de 32 bits
- Tensão operacional: 3 ~ 5.5 V
- Pinos GPIOs: 4
- Memória *flash*: 1 MB
- EEPROM: 8 kB
- SRAM: 192 kB
- *Clock*: 168 MHz

2.3.6 Placa de Desenvolvimento do *ESPcopter*

O *ESPcopter*, Figura 25, é uma plataforma de desenvolvimento interativa e programável. Desenvolvido com o intuito de ensinar programação, bem como a programação dos *drones* e seus algoritmos de voo. Sua criação surgiu com a proposta de ser utilizado como ferramenta educacional para pessoas que possuam pouco ou nenhum conhecimento de linguagem de programação [22]. Usando para isso diversas formas de programação, que incluem desde o C básico a linguagem de programação visual (arrastando blocos). Assim como o *Crazyflie 2.1*, o *ESPcopter* possui módulos para expansão que acrescentam ao *ESPcopter* novos periféricos para as mais diversas aplicações. O *ESPcopter* possui um peso de 35 g e conta com sensores de aceleração, giroscópio e magnetômetro, além de comunicação via *Wi-Fi*.

Figura 25: Placa de desenvolvimento *ESPcopter*.



Fonte: [22].

Especificações técnicas:

- Microcontrolador: ESP8266 - 12S de 32 bits
- Tensão operacional: 3 ~ 5.5 V
- Pinos GPIOs: 5
- Memória *flash*: 4 MB
- SRAM: 80 kB
- *Clock*: 160 MHz

2.3.7 Placa de Desenvolvimento para Ferramenta Educacional

Uma placa de desenvolvimento para ser utilizada como ferramenta educacional deve prover modularidade. Esta que por sua vez, deve ser modular tanto no quesito *hardware* quanto *firmware*. A característica de modularidade é fundamental, pois garante que a placa de desenvolvimento possa ser facilmente adaptada para uma determinada aplicação. Suportando de forma rápida e fácil a integração com sensores, atuadores, interfaces de comunicação, bem como, permitir a gravação e *debug* de *firmwares*.

No quesito *hardware*, destaca-se a placa de desenvolvimento que possuir a maior variedade de recursos, tais como: um maior número de interrupções, *timers*, pinos de GPIOs, pinos com suporte a PWM e ADC, interfaces de comunicação SPI, I2C, UART e CAN. Destacando também a placa de desenvolvimento que possuir o fácil acesso aos seus pinos, permitindo realizar as conexões de forma simples e fácil, além de prover pinos de alimentação prontos para serem utilizados por circuitos externos estando de preferência próximo aos demais pinos.

Um pouco relacionado ao *hardware*, mas mais importante para o *firmware*, destaca-se a placa que contiver um microcontrolador com bom poder de processamento e com suporte a *debug* ou depuração. É considerado um *plus* o suporte a instruções específicas para o processamento de ponto flutuante. Além de ter um maior espaço de memória, tanto para armazenamento de programa quanto para a SRAM e memória EEPROM. Estes que irão garantir uma boa capacidade de armazenamento e um melhor desempenho na execução e processamento dos diversos algoritmos que poderão ser implementados.

Outro ponto relevante e também relacionado tanto com o *hardware* quanto com o *firmware*, é a parte de documentação, esta que é fundamental para o processo de desenvolvimento como um todo. Destacando-se aquele que possuir um maior nível de detalhe e quantidade de informações sobre a descrição de seu *hardware*, funcionamento e configuração de forma a guiar o usuário, seja na forma correta de montagem do componente ou mesmo na sua correta configuração e implementação de seu *driver* em *firmware*. Também colabora para o destaque de uma placa de desenvolvimento, a quantidade de usuários, fóruns e artigos publicados para um determinado SOC, SIP ou microcontrolador.

Relacionado especificamente com o *firmware*, também se destaca a placa de desenvolvimento que é capaz de suportar mais de uma linguagem de programação. Onde atualmente existe uma grande infinidade de linguagens, porém em se tratando de sistemas embarcados e placas de desenvolvimento o suporte a linguagem C/C++ é a mandatória.

Considerando um *plus* a placa de desenvolvimento cujo SOC possuir suporte a sistemas operacionais de tempo real ou RTOS, a interpretação da linguagem *python* e outras. Fechando o bloco de *firmware*, onde também merece destaque a placa de desenvolvimento que possibilite a sua programação em vários ambientes de desenvolvimento, podendo o usuário escolher o de melhor agrado.

2.4 VISÃO GERAL DO *HARDWARE*

Neste tópico será abordado uma análise mais aprofundada dos principais concorrentes do nicho, os mini *drones* *Crazyflie 2.1* e o *ESPcopter*, ambos voltados para o uso como ferramenta educacional e já apresentados nas seções 2.3.5 e 2.3.6.

2.4.1 Visão geral do *hardware* do *Crazyflie 2.1*

O *Crazyflie 2.1*, Figura 26, é uma plataforma de sucesso e que está em sua terceira evolução, logo fez muito sentido sua escolha para o estudo.

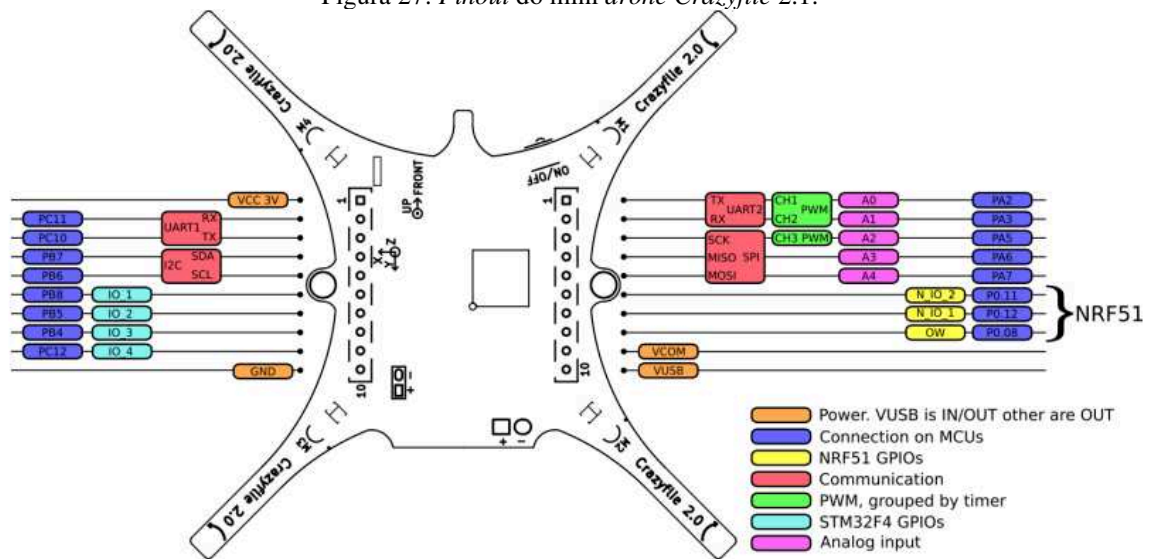
Figura 26: *Crazyflie 2.1*.



Fonte: [17].

Em termos de *hardware* seu projeto encontra-se bastante evoluído, englobando uma grande variedade de periféricos que além dos sensores básicos acelerômetro e giroscópio, possui em sua placa o adicional de: sensor barométrico, módulo de carregamento de bateria, módulo de comunicação de baixa latência e longo alcance e *Bluetooth*. Seu *deck* de expansão, Figura 27, conta com 20 pinos onde estão distribuídos 4 pinos de GPIOs, pinos de alimentação, interfaces de comunicação I2C, SPI, UARTs e pinos de ADC e PWM. Permitindo flexibilidade para que o usuário possa adicionar novos módulos a sua plataforma e personalizar de acordo com a sua aplicação.

Figura 27: Pinout do mini drone Crazyflie 2.1.



Fonte: [51].

Atualmente existem mais de 10 módulos a venda que incluem desde aplicações mais simples, como módulos de LEDs e *Buzzer* a módulos mais avançados como por exemplo para o tratamento de imagens em tempo real por meio de inteligência artificial, Figura 28. Tendo isso em vista, seu sucesso é notório devido essas características e nível de evolução.

Figura 28: Módulo de inteligência artificial para o Crazyflie 2.1.



Fonte: [52].

Seu projeto conta com uma placa de circuito impresso que dispõe de todos os circuitos eletrônicos sensores e periféricos, sendo também parte de sua estrutura ou *frame*, Figura 29. O que dá uma boa economia em seu peso, porém cria um enorme ponto de falha visto que com uma pequena queda, pode haver um dano em sua placa. Podendo este causar trincas em soldas e até mesmo a ruptura de componentes da placa, tornando-a em alguns casos até irreparável.

Figura 29: Estrutura mecânica do *Crazyflie 2.1*

Fonte: [17].

O *Crazyflie 2.1* é equipado com uma bateria de tecnologia de Li-Po, possuindo uma célula com tensão de 3.7 V e capacidade de 250 mAh. Que proporciona um tempo de voo pairado máximo de aproximadamente 7 minutos sem incluir nenhum módulo de expansão. Seu tempo de voo pode variar para menor com a inserção de um módulo, podendo este variar de acordo com o gasto energético de cada módulo. Já a sua carga útil, que é o peso máximo que consegue levantar voo e ainda sim ter um desempenho satisfatório é de aproximadamente 15 g.

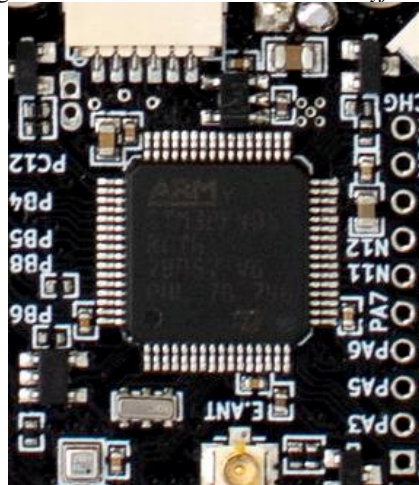
O sistema de motores utilizado são os motores com escova, que como abordado anteriormente possuem uma eletrônica mais simplificada. No entanto, perde-se na vida útil dos motores que duram cerca de 8h de funcionamento, necessitando de uma substituição do mesmo. Os motores possuem um tamanho de 7 x 16 mm e uma potência de trabalho de aproximadamente 4 W, Figura 30. Esse motor em conjunto com a hélice de 45 mm dão uma tração de aproximadamente 20 g. Resultando numa tração total de 80g, o suficiente para comportar todo o seu peso de 27g com bateria e sem um módulo acoplado.

Figura 30: Conjunto de motor e hélice do *Crazyflie 2.1*.

Fonte: [17].

O microcontrolador usado no projeto é um STM32F405 Cortex-M4 de 32 bits, Figura 31, com um núcleo rodando a uma frequência de 168 MHz, com 192 kB de memória SRAM e 1 MB de memória *flash*. Esse microcontrolador é bastante robusto possuindo o suporte a várias interfaces de comunicação e recursos tais como *timers* e interrupções. Além disso, possui instruções dedicadas para trabalhar com operações de números ponto flutuantes, característica da linha Cortex-M4. Resumindo num potente microcontrolador que é mais do que o suficiente para a aplicação de controladora de voo de um *drone*, dando a liberdade para novas implementações. Que podem ser até um pouco mais exigentes tanto a nível de processamento quanto a uso de memória.

Figura 31: Microcontrolador do *Crazyfly* 2.1.

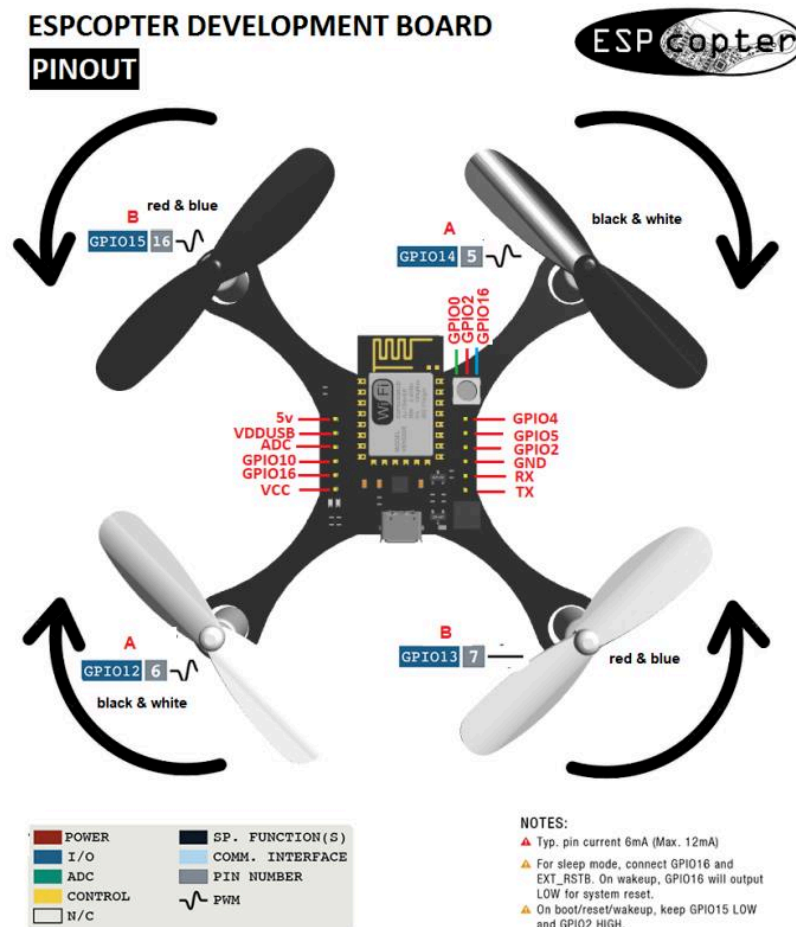


Fonte: [17].

2.4.2 Visão geral do *hardware* do *ESPcopter*

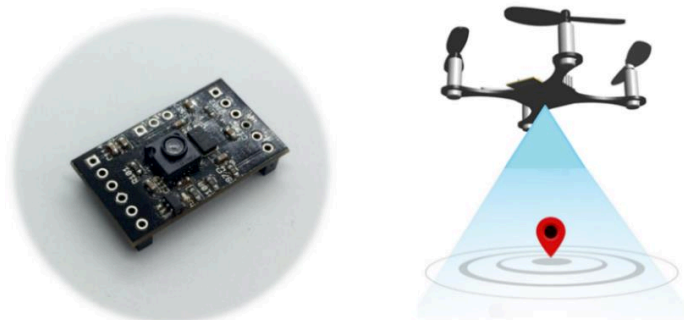
O *ESPcopter* é uma plataforma de desenvolvimento que foi financiada com sucesso em plataforma de financiamento online, o *Crowdfunding*. Como sua proposta é em ser uma ferramenta para desenvolvimento, também fez sentido sua escolha para este estudo. Onde em termos de *hardware*, seu projeto encontra-se um pouco defasado visto que o SOC embarcado o ESP8266 já está ficando obsoleto, tendo novos modelos com maiores recursos, periféricos e interfaces de comunicação disponíveis atualmente. Sua plataforma conta com os seguintes periféricos embarcados: acelerômetro, giroscópio, magnetômetro, módulo de carregamento de bateria integrado e interface de comunicação *Wi-Fi*.

Seu *deck* de expansão, Figura 32, conta com 12 pinos onde estão distribuídos 5 pinos de GPIOs, pinos de alimentação, interface de comunicação UART e um pino com ADC. Permitindo também flexibilidade para que o usuário possa adicionar novos módulos a sua plataforma e personalizar de acordo com a sua aplicação.

Figura 32: Pinout do *ESPcopter*.

Fonte: [22].

Atualmente existem 5 módulos disponíveis para compra que incluem, módulos de LEDs e *Buzzer*, módulos mais básicos e mais avançados como o módulo de fluxo óptico, Figura 33, que pode ser utilizado para travar o *drone* em uma posição no espaço e o módulo de multi-distância que pode ser utilizado para evitar colisões.

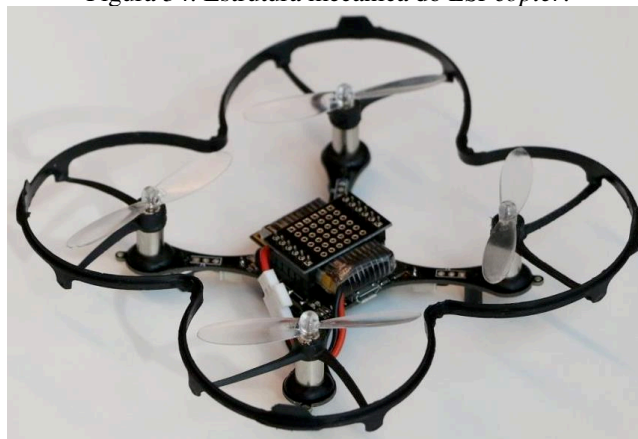
Figura 33: Módulo de fluxo óptico do *ESPcopter*.

Fonte: [22].

Assim como no projeto do *Crazyfly* 2.1, o *ESPcopter* também conta com uma placa de circuito impresso com todos os seus circuitos eletrônicos e periféricos o qual também faz parte

de sua estrutura, Figura 34. Que como visto anteriormente este tipo de construção traz uma boa economia no peso, mas em contra partida adiciona um enorme ponto de falha no projeto. Esta que pode acabar por deixar sua placa irreparável dependendo da intensidade de uma colisão.

Figura 34: Estrutura mecânica do *ESPcopter*.

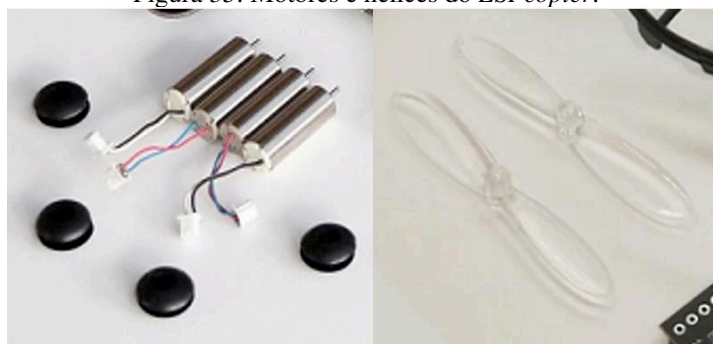


Fonte: [22].

O *ESPcopter* é equipado com uma bateria de tecnologia de Li-Po, possuindo uma célula com tensão de 3.7 V e capacidade de 240 mAh. Que proporciona um tempo de voo pairado máximo de aproximadamente 5 minutos sem incluir nenhum módulo de expansão. Este que pode variar para menor de acordo com o consumo energético de cada módulo de expansão. Já a sua carga útil estimada é de aproximadamente 10 g, e é estimada devido ao fato desta informação não estar presente nas informações técnicas do mini *drone*.

Além disso, seu sistema de motores também não é abordado, mas estimasse que seja motores de tamanho e potência similares ao do *Crazyfly* 2.1, que são capazes de gerar uma tração de aproximadamente 20 g com uma hélice de 45 mm de diâmetro, Figura 35. Que na suposição espera-se uma tração máximo de 80 g, que é mais do que o suficiente para comportar todo o seu peso que é de 35 g com bateria e sem a inclusão de módulos. Dando uma liberdade de serem adicionados ainda até 10 g de peso extra.

Figura 35: Motores e hélices do *ESPcopter*.



Fonte: [22].

controladora de voo de um *drone*, porém limitado em termos memória SRAM, pinos de PWM e ADC, bem como nas interfaces de comunicação, que dentre todas, apenas está disponível uma UART para o usuário no *deck* de expansão.

2.5 PLACAS DE CIRCUITOS IMPRESSO

Como visto anteriormente todas as placas de desenvolvimento abordadas fazem o uso de uma placa de circuito impresso, esta que é uma grande mudança em relação ao tempo anterior. Em que as conexões físicas entre os circuitos integrados tinham que ser feitas com fios de forma flutuante, isso ocupava muito espaço e o circuito era mais vulnerável. Com a substituição pelas PCIs, os circuitos integrados são soldados no substrato, tornando-os mais seguros, protegidos e dirigindo as trilhas condutoras para os periféricos corretos ou a outros circuitos integrados. Devido este método ser o mais utilizado e considerado parte integrante do processo de fabricação de eletrônicos, neste tópico será abordado o básico de uma placa de circuito impresso, bem como as principais etapas de seu desenvolvimento.

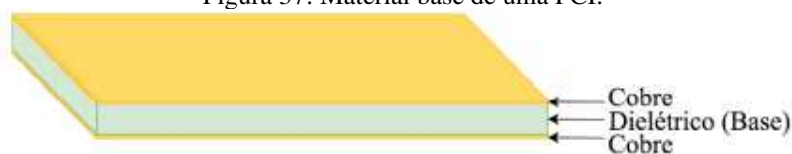
2.5.1 Padrões

Existem padrões da indústria para quase todos os aspectos do design de PCI. Esses padrões são controlados pelo antigo *Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*, que agora é conhecido simplesmente como IPC. Para cada aspecto do projeto existe um padrão IPC, seja de fabricação, teste ou qualquer outra coisa de PCI que precisar. Onde o principal documento que abrange o design de PCI é o IPC-2221, “*Generic Standard on Printed Board Design*”, que pode ser adquirido por qualquer pessoa no site (www.ipc.org).

2.5.2 Placa de Circuito Impresso

Uma Placa de Circuito Impresso – PCI ou do inglês *Printed Circuit Board* – PCB, é uma parte integrante da fabricação de produtos eletrônicos, Figura 37. As PCIs são utilizadas para interligar componentes eletrônicos mecanicamente usando traços de sinal condutivos gravados em folhas de cobre sobre um substrato não condutor [54]. Em geral poderá ter muitas PCIs de espessuras diferentes, no entanto a espessura mais comum é a de 1,6 mm e substrato de FR4.

Figura 37: Material base de uma PCI.

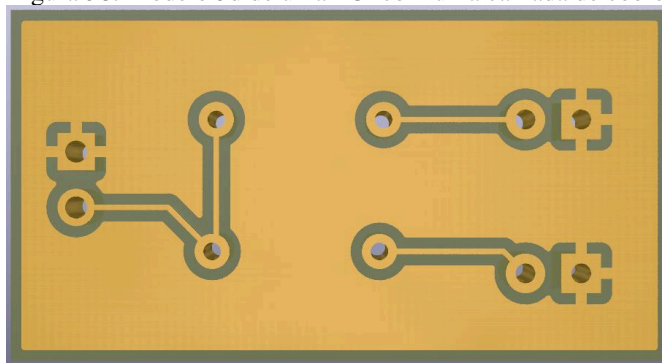


Fonte: [54].

2.5.2.1 Cobre

O cobre numa PCI se refere a uma fina folha de cobre que é aplicada com calor e adesivo. Em PCIs comuns, Figura 38 e de dupla face, o cobre é aplicado em ambos os lados do substrato como mostrado na Figura 37. Quando se refere a uma placa de uma ou duas camadas, refere-se ao número de camadas de cobre, este que pode variar de uma camada ou até 16 camadas ou mais.

Figura 38: Modelo 3d de uma PCI com uma camada de cobre.

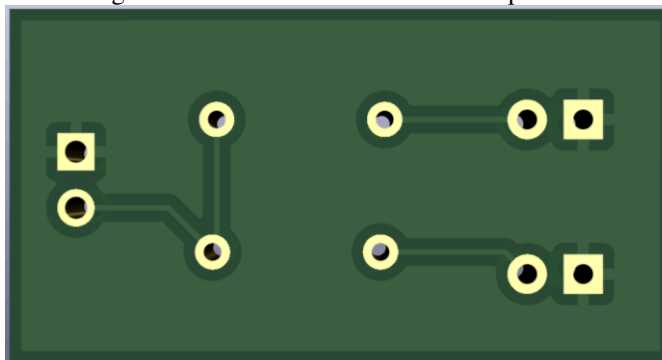


Fonte: Autor.

2.5.2.2 Máscara de solda

A camada acima da folha de cobre é chamada de camada de máscara de solda, Figura 39. Esta camada dá ao PCI sua cor que na grande maioria das PCIs são verdes, mas podem ser de qualquer outra cor. É sobreposta à camada de cobre para isolar os traços de cobre do contato acidental com outros pedaços metálicos, soldas ou condutores. Esta camada ajuda o usuário a soldar nos lugares corretos, evitar *jumpers* de solda e proteger o cobre contra corrosão.

Figura 39: PCI com máscara de solda aplicada.

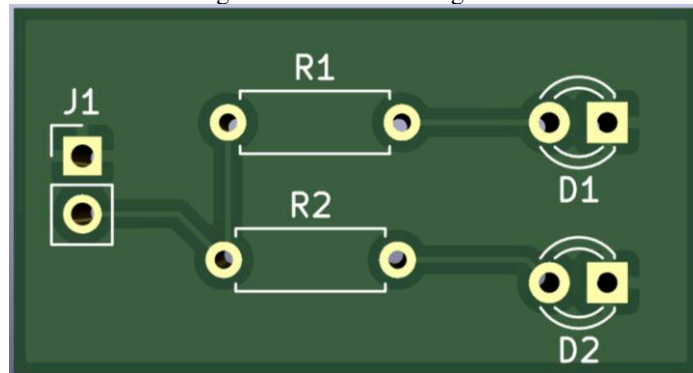


Fonte: Autor.

2.5.2.3 Serigrafia

A camada de serigrafia é aplicada em cima da camada de máscara de solda. A serigrafia adiciona letras, números e símbolos ao PCI que permitem uma montagem mais fácil e indicadores para um melhor entendimento da placa, Figura 40. Normalmente a serigrafia é da cor branca, mas qualquer cor pode ser utilizada.

Figura 40: PCI com serigrafia.



Fonte: Autor.

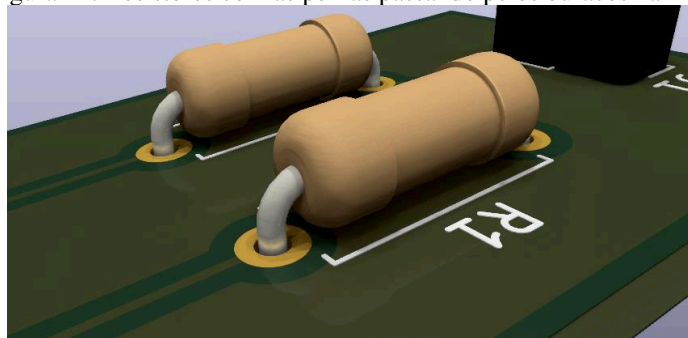
2.5.3 Terminologia

Após uma ideia geral do que é uma PCI e sua composição, faz-se necessário definir alguns termos que também estão relacionados a PCI e que poderão ser mencionados mais adiante no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

2.5.3.1 PTH

Pad with a Through-Hole – PTH se refere a uma perfuração na placa que tem um anel anular e que é banhado todos o caminho através da placa. Pode ser um ponto de conexão para um componente através do orifício, uma via para passar um sinal para outro lado da placa ou um orifício de montagem, Figura 41.

Figura 41: Resistores com as pernas passando pelos buracos na PCI.

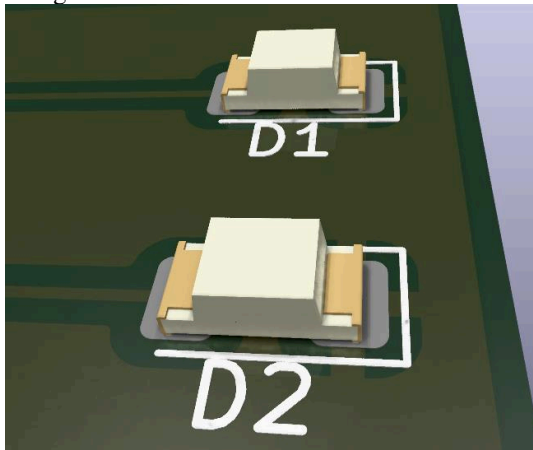


Fonte: Autor.

2.5.3.2 SMD

Surface Mount Device – SMD, Figura 42, é um método de construção que permite que os componentes sejam colocados em uma superfície da placa, não exigindo que os contatos passem por furos na placa. Este é o método dominante de montagem em uso hoje e permite que as placas sejam preenchidas de forma rápida e fácil.

Figura 42: LEDs SMDs montados numa PCI.

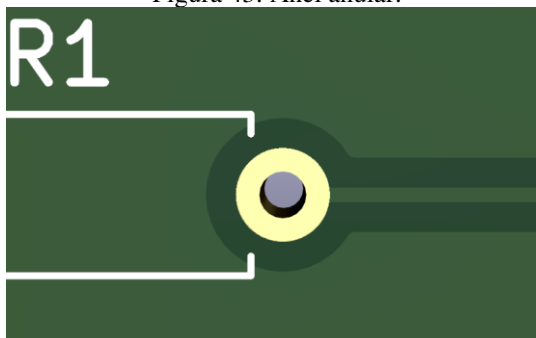


Fonte: Autor.

2.5.3.3 Anel anular

Uma via é criada perfurando um buraco através de um PAD de cobre gravada em cada camada de um PCB. Um Anel Anular é a área entre a borda da broca e um PAD de cobre associada a esse orifício, Figura 43. Quanto maior for a largura de um anel anular, maior será a conexão de cobre ao redor da via perfurada.

Figura 43: Anel anular.

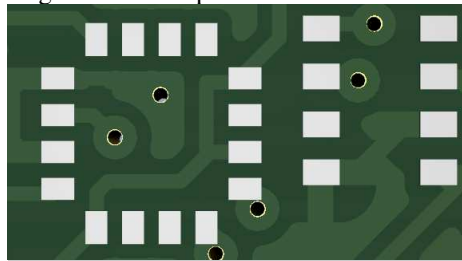


Fonte: Autor.

2.5.3.4 PAD

Os PADs ou do português almofadas são uma porção de metal exposto na superfície de uma placa para a qual um componente é soldado, Figura 44.

Figura 44: Exemplos de PADs numa PCI.

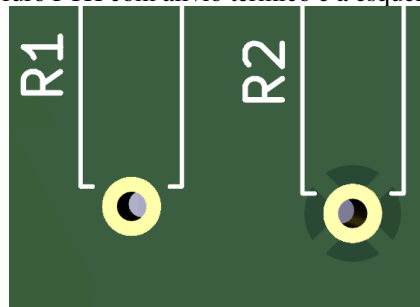


Fonte: Autor.

2.5.3.5 Alívio térmico

É uma técnica de conexão entre um plano e um PAD ou furo PTH, Figura 45. A técnica constitui de fazer a ligação por pequenos traços, ao invés de preencher com todo o plano. Desta forma, torna-se mais fácil a elevação da temperatura para criar uma boa junta de solda e menor tempo para concluir a solda.

Figura 45: À direita, um furo PTH com alívio térmico e a esquerda um sem alívio térmico.

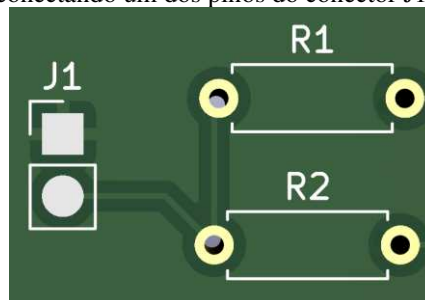


Fonte: Autor.

2.5.3.6 Trilha

A trilha é um traçado de cobre sobre uma superfície da placa de circuito impresso, onde por ela circula as correntes elétricas do circuito, Figura 46. Em termos construtivos, quanto menor o seu comprimento, menor será a resistência, capacitância e indutância intrínseca. Porém, mais difícil e caro é seu processo de fabricação. Em contra partida, uma trilha maior e mais espessa, maior é a sua resistência mecânica e elétrica.

Figura 46: Pequena trilha conectando um dos pinos do conector J1 aos dois resistores R1 e R2.

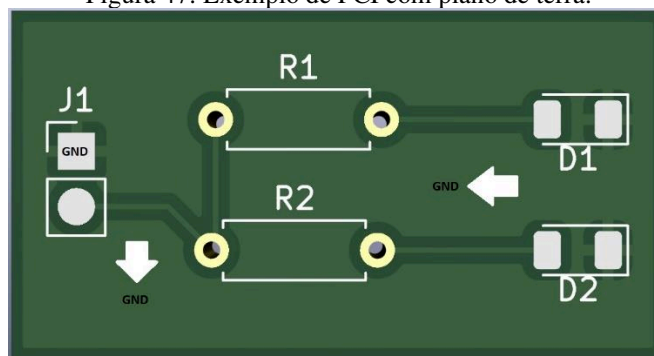


Fonte: Autor.

2.5.3.7 Plano

O plano é um bloco contínuo de cobre em uma placa de circuito, definido por fronteiras e não por um caminho, Figura 47. Na grande maioria dos circuitos esse plano geralmente é conectado ao terminal terra da alimentação.

Figura 47: Exemplo de PCI com plano de terra.

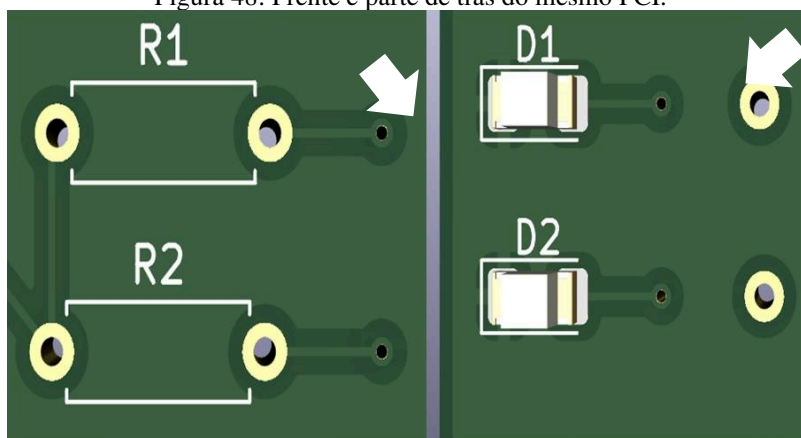


Fonte: Autor.

2.5.3.8 Via

Uma via é uma perfuração em uma placa usado para passar um sinal de uma camada para outra, Figura 48. As vias são cobertas por máscaras de solda para protegê-las de serem soldadas. Vias onde os conectores e componentes devem ser anexados são muitas vezes descobertas para que possam ser facilmente soldadas.

Figura 48: Frente e parte de trás do mesmo PCI.



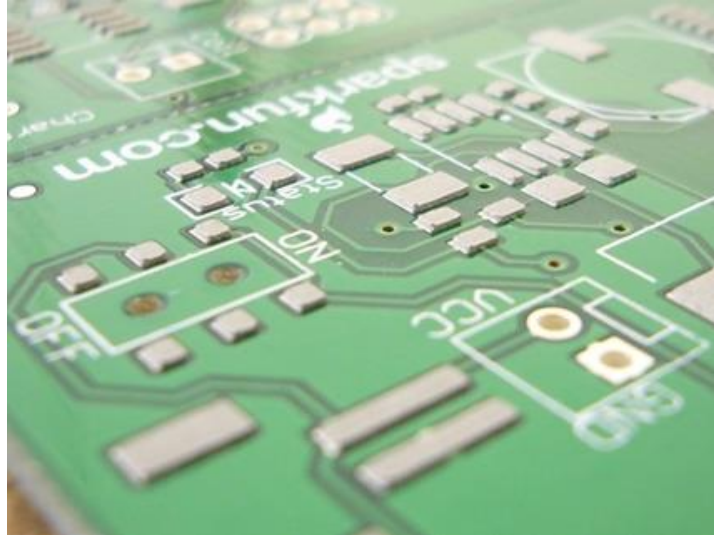
Fonte: Autor.

Na Figura 48 as vias são utilizadas para conectar os resistores limitadores de corrente aos LEDs na parte de trás da placa. No entanto, vias também podem interconectar planos sem mesmo ter seu furo vasado dos dois lados da placa, neste caso a via é chamada de via cega. Normalmente utilizada para interconexões em PCIs com 4 ou mais camadas, onde necessita-se de interconexões apenas nos planos internos.

2.5.3.9 Pasta de solda

É um gel composto de micro bolinhas de solda que, com o auxílio de um estêncil, são aplicadas nos PADS em uma PCI antes que os componentes sejam colocados, Figura 49. Durante o aumento de temperatura da placa em um forno especial, as micro bolinhas de solda se derretem criando juntas elétricas e mecânicas entre os PADS e componentes.

Figura 49: Pasta de solda aplicada sobre a PCI antes dos componentes serem posicionados.

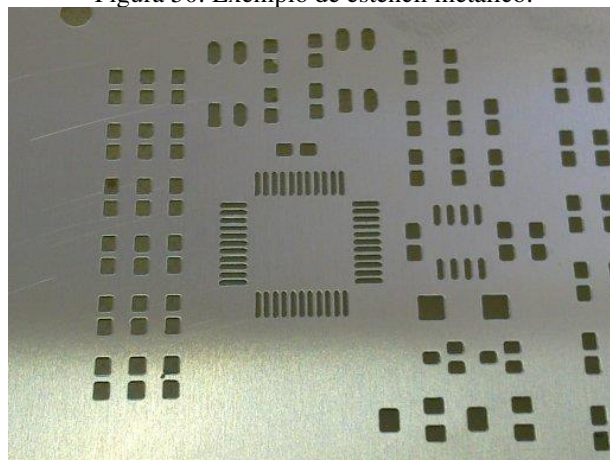


Fonte: [55].

2.5.3.10 Estêncil

O estêncil é uma folha metálica ou plástica de mesma dimensão da PCI que é posicionada sobre a placa, permitindo que a pasta de solda seja depositada em áreas específicas durante a montagem, Figura 50.

Figura 50: Exemplo de estêncil metálico.

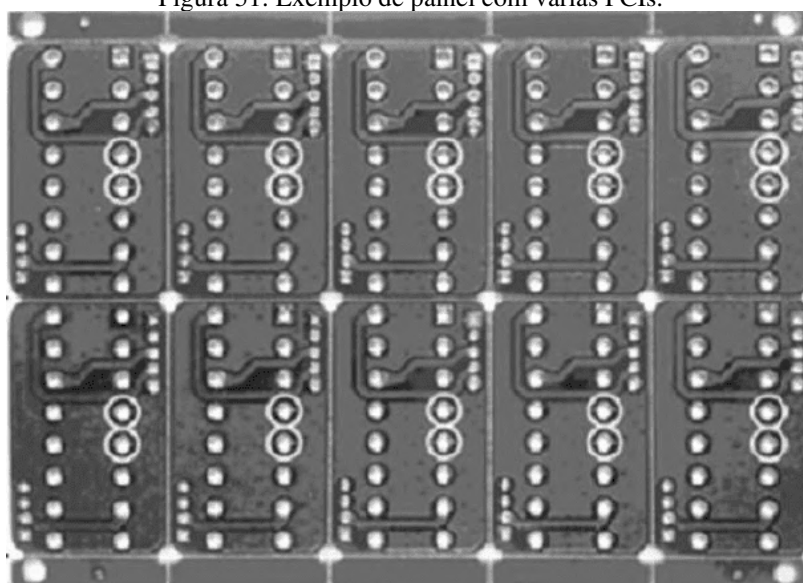


Fonte: [56].

2.5.3.11 Painel e Panelização

Um painel, Figura 51, é placa de circuito maior composta de muitas placas menores que serão destacadas antes do uso, e recebe o nome de panelização o processo de alocar mais de uma PCI no painel. Equipamentos automatizados de manuseio de placas de circuito frequentemente têm problemas com placas menores, e ao agregar várias placas ao mesmo tempo, o processo pode ser acelerado significativamente, visto que ao passar o painel pela inserção de pasta de solda e componentes o processo pode ser feito em mais de uma placa por vez.

Figura 51: Exemplo de painel com várias PCIs.



Fonte: [57].

A especificação de aba muitas das vezes vem acompanhada junto às especificações do painel, cuja aba informa o tamanho das margens úteis do painel. Esta que por sua vez, está diretamente relacionada com a capacidade dos maquinários de inserção no processo de montagem. Ao ter mais de uma placa no painel é necessário que a finalização das bordas de cada placa possua vinco, que nada mais é do que a criação de várias rachaduras, possibilitando desta forma uma maior facilidade ao ser destacada do painel.

Tendo visto o básico para o entendimento de uma placa de circuito impresso, o próximo passo é entender quais são as principais etapas de projeto de uma PCI.

2.5.4 Unidades Imperial e Métrica

Uma das unidades mais empregadas nos projetos de PCI é a polegada, tendo a maioria dos componentes eletrônicos possuindo suas dimensões nesta unidade, assim como, trilhas e vias nos *softwares* de *design* [58]. A unidade de medida polegada é denominada de unidade

imperial, enquanto a unidade milímetro é a unidade métrica. A Tabela 1 mostra a relação entre essas unidades e seus nomes usuais.

Tabela 1: Relação entre unidade imperial e métrica.

Imperial (polegada)	Métrica (mm)	Nome usual
1	25,4	1 inch
0,2	5,08	200 mils ou 200 th (thou)
0,1	2,54	100 mils ou 100 th (thou)
0,05	1,27	50 mils ou 50 th (thou)
0,01	0,25	10 mils ou 10 th (thou)

Fonte: Autor.

Sendo 100 mils, o valor de referência para desenho dos encapsulamentos dos componentes (distância entre pinos), acompanhado de suas frações, como 50, 75 e 200 mils. Em desenhos a regra geral é sempre usar a unidade imperial.

2.5.5 Encapsulamentos

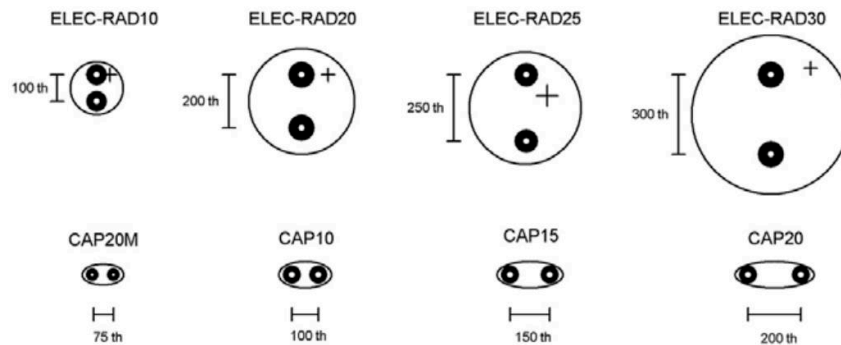
Os encapsulamentos ou invólucros dos componentes eletrônicos estão disponíveis em bibliotecas fornecidas em *softwares* de *design* [58]. Entretanto, todo projetista acaba criando seus próprios componentes, uma vez, que muitos são inexistentes nas bibliotecas ou necessitam de alteração para se adequar às necessidades do projeto. Os encapsulamentos são esboçados de acordo com o espaçamento entre os pinos do componente, onde são representados por PADs. Em componentes do tipo PTH, os PADs indicam o cobre em torno do pino do componente e o diâmetro do furo, onde o pino será introduzido. Enquanto para componentes SMD, os PADs são áreas de cobre que ficarão na superfície da placa para o processo de soldagem dos terminais do componente.

Um encapsulamento também apresenta o desenho que será impresso sobre a placa de circuito impresso, tornando possível a identificação do tipo de componente eletrônico, além de fornecer referência para a sua solda e orientação [58].

2.5.5.1 Componentes PTH

Na Figura 52 abaixo são representados alguns exemplos de encapsulamento para capacitores do tipo eletrolíticos e cerâmicos, bem como seus respectivos nomes.

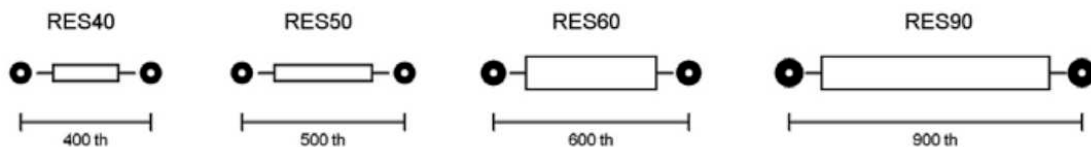
Figura 52: Encapsulamento para capacitores eletrolíticos e cerâmicos.



Fonte: [58].

O tamanho do encapsulamento para resistores geralmente é associado com a potência que será dissipada pelo mesmo. Na Figura 53 estão ilustrados alguns exemplos de encapsulamento e seus respectivos nomes, para resistores PTH.

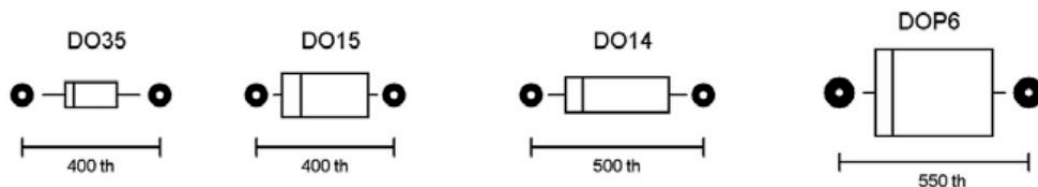
Figura 53: Encapsulamento para resistores PTH.



Fonte: [58].

Assim como os encapsulamentos para resistores PTH, os encapsulamentos para diodos também têm o seu tamanho relacionado com a capacidade de dissipação de potência e no caso dos diodos, também com a capacidade de condução de corrente. A Figura 54 mostra alguns exemplos de encapsulamentos para diodos PTH, sendo o retângulo menor no desenho do encapsulamento a indicação do catodo do diodo.

Figura 54: Encapsulamento para diodos PTH.



Fonte: [58].

A Figura 55 abaixo ilustra alguns encapsulamentos para componentes eletrônicos cujo número de terminais são 3, tais como: transistores, *triacs*, tiristores, reguladores e sensores. Nesses encapsulamentos a sequência dos pinos é indicada pelo desenho do encapsulamento.

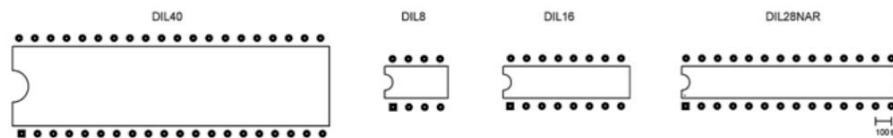
Figura 55: Encapsulamento para componentes eletrônicos de 3 terminais.



Fonte: [58].

Dentre os circuitos integrados PTH, uma enorme parcela conta com mais de 3 pinos e empregam o encapsulamento duplo em linha (DIL – *Dual In Line*), como mostrado na Figura 56 abaixo.

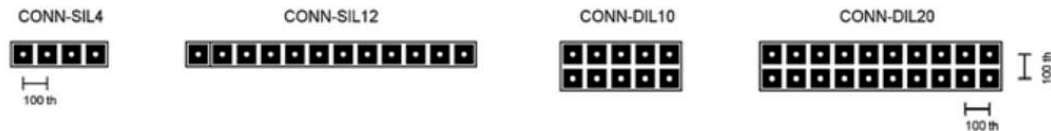
Figura 56: Circuitos integrados com encapsulamento duplo em linha.



Fonte: [58].

Encerrando os exemplos de encapsulamentos PTH, na Figura 57 abaixo são apresentados alguns exemplos de barras de pinos em linha simples e dupla.

Figura 57: Encapsulamento para barra de pinos.



Fonte: [58].

2.5.5.2 Componentes SMD

Na Figura 58 abaixo são ilustrados alguns exemplos mais comuns de encapsulamentos SMD para componentes passivos, sendo a maioria capacitores e resistores (0402 → 1512), um transistor (SOT23) e um diodo (DSM). Para esses componentes o tamanho tem relação com a potência que o mesmo pode dissipar, sendo assim, um componente menor possui uma capacidade de dissipação inferior e também é mais difícil seu processo de soldagem manual.

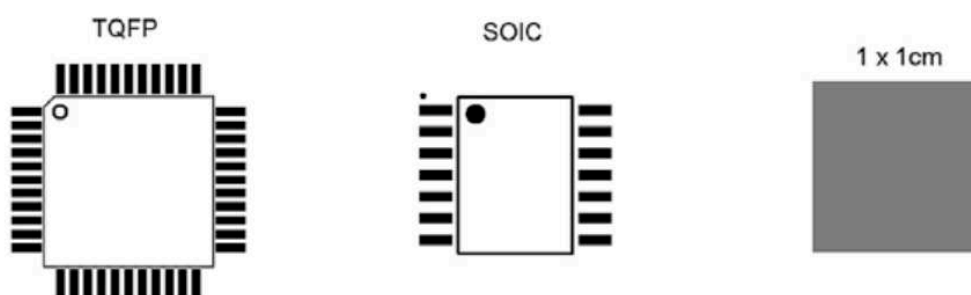
Figura 58: Encapsulamentos SMD: componentes passivos 0402 - 2512, SOT23 para transistor e DSM para diodo.



Fonte: [58].

Em circuitos integrados, existem uma infinidade de encapsulamentos, incluindo componentes que possuem pinos na parte de baixo, formando uma matriz de pontos denominados de (BGA – *Ball Grid Array*). Componentes do tipo BGA, são soldados somente com máquina. A Figura 59 mostra dois tipos comuns de encapsulamentos para circuitos integrados: o TQFP (*Thin Quad Flat Pack*), empregado em diversos microcontroladores e o encapsulamento SOIC (*Small-Outline Integrated Circuit*) que é empregado numa ampla gama de circuitos integrados, tais como: ADCs, D/As, amplificadores operacionais e circuitos de lógica digital.

Figura 59: Exemplos de encapsulamentos de circuitos integrados SMD.



Fonte: [58].

2.5.6 Principais Etapas de Projeto de uma PCI

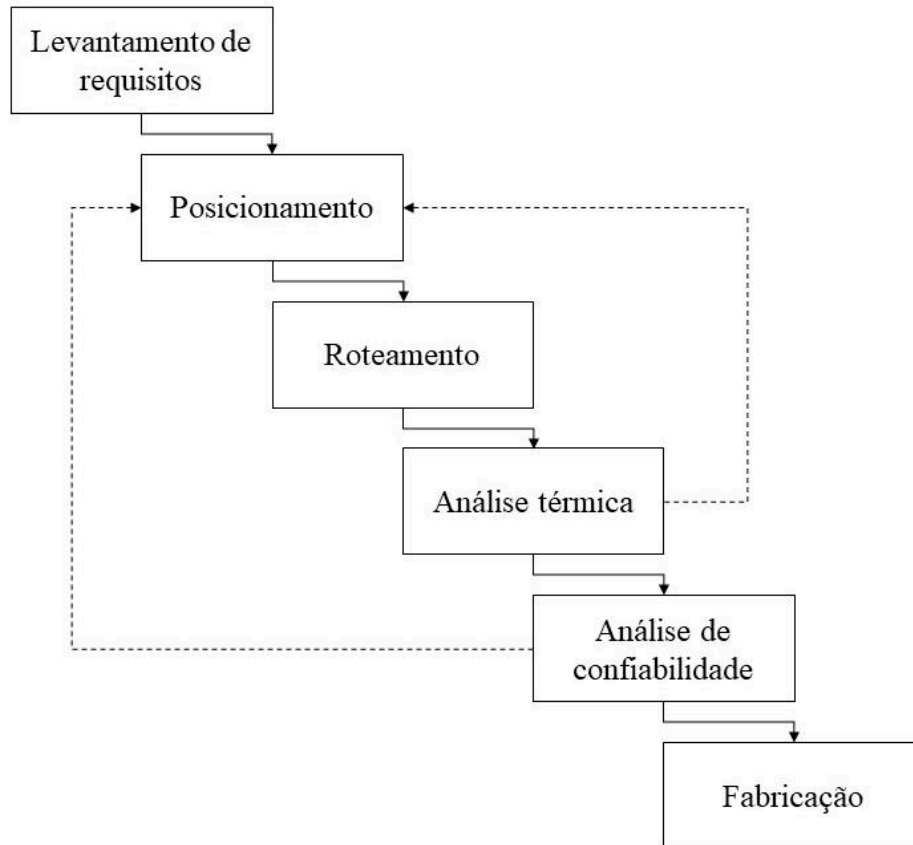
Nos últimos anos, diversos setores têm demandado por equipamentos eletrônicos com maiores funcionalidades, maior nível de confiança, custo baixo e tempo de desenvolvimento menor. Porém há uma grande dificuldade em atender essa demanda, devido à disponibilidade de componentes eletrônicos, estes que são utilizados na montagem de tais equipamentos, a redução de oferta de itens qualificados, alto custo de produção, longo prazo de entrega e até restrições governamentais [59].

Tendo em vista a minimização dos riscos quanto a confiabilidade e prazos, o desenvolvimento de projetos eletrônicos segue algumas etapas, como mostrado na Figura 60. Estas que consistem tradicionalmente no levantamento de requisitos, posicionamento, roteamento, análise térmica, análise de confiabilidade e por último a fabricação.

No levantamento dos requisitos são definidas as características físicas, elétricas, térmicas e taxa de falhas dos componentes. Sendo realizada uma rápida análise dos componentes que, do ponto de vista térmico, são considerados críticos e ou dissipam muita energia. Por meio desta análise é identificado nível de gerenciamento térmico que será demandado, sugerindo um posicionamento preliminar dos componentes. Cujo resultado desta

interação, permite estabelecer os requisitos para um melhor posicionamento dos componentes na PCI que é um processo altamente criativo e individual.

Figura 60: Principais etapas de projeto de uma PCI.



Fonte: Adaptado de [59].

Posicionamento definido, a próxima etapa é o roteamento, a qual consiste em encontrar o menor caminho de ligação entre dois pontos de conexão sem que nenhum dos caminhos traçados se cruze um com o outro no mesmo plano. Esta etapa pode ser realizada por softwares especializados, no entanto em circuitos profissionais todo o traçado é realizado de forma manual ou então adicionadas regras para o traçado automático.

Finalizado o roteamento, é transferida todas as informações incluindo o levantamento das informações de taxa de falhas e características térmicas dos componentes para uma ferramenta específica (por exemplo, BETASoft®, www.betasoft.com; Flotherm®, www.mentor.com; IceBoard®, www.ansys.com; entre outros) e uma nova análise térmica é realizada. O resultado pode implicar em novas alterações no posicionamento dos componentes, que muitas das vezes pode ser demorado e custoso. Tendo o posicionamento dos componentes sendo refeito, o processo de análise pode ser repetido tantas vezes quanto for necessário.

A etapa seguinte, análise de confiabilidade, é realizado cálculos que visam a predição da confiabilidade. Entrando no cálculo variáveis tal como as taxas de falhas dos componentes

em função de suas temperaturas de junção. Como resultado desta análise, pode ser necessário um novo posicionamento, embora não seja comum. Ao final da análise a próxima etapa consiste de fato na fabricação da PCI, etapa importante do processo e a ele dedicado um tópico neste trabalho.

Enquanto que o processo de aquisição dos componentes qualificados e necessários para fabricação do protótipo tem início logo após a finalização do projeto e geração dos esquemas. Contudo, a completa relação dos componentes só é concluída após os testes funcionais do modelo final. Na grande maioria das vezes, a conclusão da fabricação dos modelos sofre atrasos, seja pela indisponibilidade dos componentes requeridos ou mesmo ao prazo de entrega exigido pelos fornecedores que é longo.

2.6 SOFTWARE DE DESIGN E LAYOUT

Antes dos computadores as placas de circuito impresso eram feitas à mão usando fitas adesivas e PADs em filme de desenho transparente. E muitas horas eram passadas sobre uma caixa de luz fluorescente, cortando, colocando, rasgando e roteando trilhas manualmente. Com o avanço dos computadores surgiram vários *softwares* e no ramo da engenharia os *softwares* de desenho assistido por computador ou do inglês *Computer-aided design* – CAD se popularizaram e tornaram-se indispensáveis durante o processo de desenvolvimento [60]. Pois com este tipo de ferramenta, o engenheiro projetista tem o máximo de flexibilidade no *design* e edição de placas em relação às técnicas tradicionais.

2.6.1 KiCad

Atualmente existem diversos *softwares* para projetos de placas de circuito impresso que englobam softwares pagos e *softwares open source* gratuitos como o KiCad. O KiCad é um conjunto de *software* de código aberto para *Electronic Design Automation* – EDA, cujo objetivo é fornecer o melhor conjunto de ferramentas de desenvolvimento eletrônico multiplataforma para *designers* profissionais, recebendo o apoio para seu desenvolvimento empresas e instituições como o *European Organization for Nuclear Research* – CERN, Arduino e *Raspberry Pi foundation*.

O KiCad tem um número grande e crescente de usuários, muitos deles *hobbistas* e *makers*, que contribuem bastante para o desenvolvimento da plataforma que hoje é tão boa quanto aos softwares concorrentes não gratuitos. Seu conjunto de programas aborda todo o

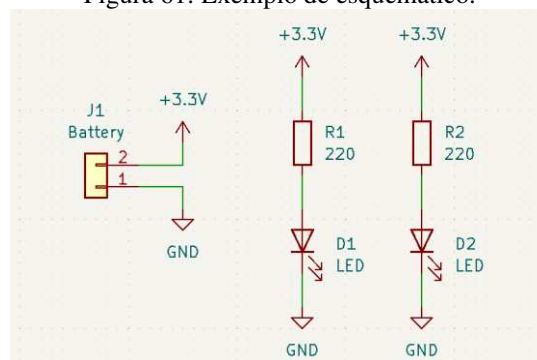
processo de projeto de uma placa de circuito impresso, lidando desde o esquemático à geração de arquivos de fabricação.

2.6.1.1 Conceitos Básicos

O fluxo de trabalho típico no KiCad consiste em duas tarefas principais: desenhar um esquema e *layout* da placa de circuito impresso. O esquema mostrado na Figura 61 é uma representação simbólica do circuito: quais componentes são usados e quais conexões são feitas entre eles. Símbolos esquemáticos são representações pictóricas de componentes eletrônicos em um esquema, como um ziguezague para um resistor ou um triângulo para um LED.

O esquema contém símbolos para cada componente do projeto, com fios conectando pinos nos símbolos. O esquema normalmente é desenhado primeiro, antes de realizar o *layout* da placa de circuito.

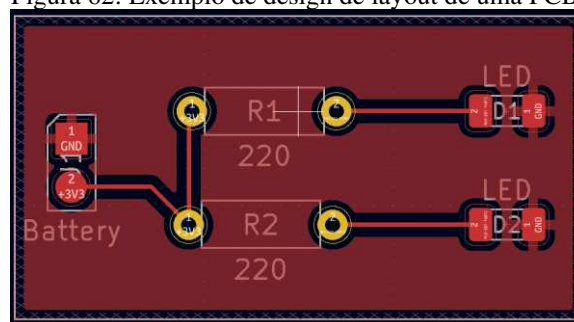
Figura 61: Exemplo de esquemático.



Fonte: Autor.

A placa é realização física do esquema, com pegadas de componentes posicionadas na placa e trilhas de cobre fazendo as conexões descritas no esquema, Figura 62. As pegadas ou *footprints* são um conjunto de PADS de cobre que combinam com os pinos de um componente físico. Quando a placa for fabricada e montada, o componente será soldado em sua área correspondente na placa de circuito.

Figura 62: Exemplo de design de layout de uma PCB.



Fonte: Autor.

2.6.1.2 Fluxo de Trabalho

Normalmente, o esquema é desenhado primeiro. Isso significa adicionar símbolos ao esquema e desenhar as conexões entre eles. Símbolos personalizados podem precisar ser criados se os apropriados ainda não estiverem disponíveis. Nesta fase, os *footprints* também são selecionados para cada componente, com *footprints* personalizados criados conforme necessário. Quando o esquema estiver completo e o projeto for aprovado em uma verificação de regras elétricas (*Electrical Rules Check* - ERC), as informações do projeto no esquema serão transferidas para o editor de placa e o *layout* começará.

O esquema descreve quais componentes estão no projeto e como eles estão conectados e o editor de placas usa essas informações para facilitar o *layout* e evitar incompatibilidades entre o esquema e a placa de circuito impresso. O processo de *layout* requer a colocação cuidadosa de cada pegada na placa de circuito. Após colocar os componentes, as trilhas de cobre são desenhadas entre os componentes com base nas conexões no esquema, bem como em outras considerações elétricas, como resistência de traço, requisitos de impedância controlada, diafonia, etc.

Frequentemente, o esquema precisará ser atualizado após o início do *layout*, as alterações esquemáticas podem ser facilmente inseridas no *design* da placa. O inverso muitas vezes pode acontecer, quaisquer alterações de *design* feitas no *layout* da placa podem ser empurradas de volta para o esquema para manter os dois consistentes. Quando o *layout* da placa está completo e a placa passou na verificação das regras de projeto (*Design Rule Check* - DRC), as saídas de fabricação são geradas para que a placa possa ser fabricada por um fabricante de PCI.

2.6.1.3 Componentes do KiCad

O KiCad consiste em vários componentes de *software* diferentes, Figura 63, alguns dos quais são integrados para facilitar o fluxo de trabalho do projeto de PCI e alguns dos quais são independentes.

Figura 63: Gerenciador de projeto do KiCad.



Fonte: Autor.

Os principais componentes do KiCad geralmente são iniciados a partir dos botões do iniciador na janela do gerenciador de projetos KiCad. Componentes estes listados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Descrição dos componentes do KiCad.

Nome do componente	Descrição
Editor do esquemático	Criar e editar esquemas; simular circuitos com SPICE; gerar arquivos BOM.
Editor de símbolos	Criar e editar símbolos esquemáticos e gerenciar bibliotecas de símbolos.
Editor da PCI	Criar e editar PCIs; exportar arquivos 2D e 3D; gerar arquivos de saída de fabricação.
Editor de <i>footprints</i>	Criar e editar <i>footprints</i> de componentes da PCI e gerenciar bibliotecas de <i>footprints</i> .
Visualizador de Geber	Visualizador de arquivos Gerber e de perfuração.
Conversor de imagem	Conversor de imagens de <i>bitmap</i> em símbolos ou <i>footprints</i> .
Ferramentas de cálculo	Calculadora para componentes, largura de trilha, espaçamento elétrico, código de cores, etc.
Editor do esquema	Criar e editar arquivos das bordas de folha.

Fonte: Autor.

2.7 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE UMA PCI

Com o projeto da placa finalizado, a etapa final é gerar saídas de fabricação para que a placa possa ser fabricada e montada. Os arquivos que devem ser gerados são:

- **Gerbers:** os gerbers são arquivos padronizados e utilizados pelos *softwares* de CAD para descrever o projeto da placa de circuito impresso. O fabricante usará os arquivos gerbers para a fabricação. Tais arquivos contém informações das camadas de cobre, máscara de solda, legenda, furação e delimitação da placa.
- **BOM (*Bill of Materials*):** é uma lista de todos os componentes necessários para a montagem da placa. A lista pode ser gerada pelo software CAD, tendo ao final um arquivo que pode ser em formato CSV ou planilha. Na BOM são inseridas as referências dos componentes, descrições, *part numbers* dos fabricantes e distribuidores, quantidade, encapsulamento e demais informações relevantes. Essa lista será usada pelo comprador ou montadora para aquisição das partes.
- **Arquivos Centroides, coordenadas XY ou *pick n' place*:** contém informações sobre onde cada componente será montado na placa. Cujo objetivo é fornecer as informações sobre posição e orientação dos componentes de tecnologia de montagem em superfície SMD que serão usados para configuração da máquina inseridora. Os arquivos são gerados pelos *softwares* de CAD e devem ser enviados para a montadora.
- **Documentação:** demais documentações importantes para a montagem, como recomendações, orientações, etc.

Antes de pedir a montagem, será necessário pedir a fabricação das PCIs. Além do envio dos arquivos gerbers gerados, também são exigidas as especificações de acabamento, material, cor, etc. A seguir estão as principais especificações necessárias para a fabricação da PCI:

- Nome do projeto: nome e versão do PCI;
- Dimensões da PCI;
- Quantidade;
- Material;
- Número de camadas;
- Espessura da PCI;
- Acabamento da superfície;
- Cor da máscara de solda;
- Cor da serigrafia;
- Espessura do cobre;
- Especificações especiais:
 - Fiducial;

- Panelização;
- Teste elétrico;
- Estêncil;
- Certificação.

2.8 BOAS PRÁTICAS DE DESENVOLVIMENTO DE PCBS

Não importa o quão grande um projeto possa parecer ser, ele deve ser construído para que possa colher os benefícios pretendidos de sua aplicação. Portanto, cabe aos *designers* de PCIs incluir as melhores práticas de *layout* do PCI para fabricação. Neste tópico será abordado algumas boas práticas para o layout de PCIs visando minimizar problemas com EMC, EMI, Loops de terra, acoplamentos entre outros problemas comuns em PCIs.

2.8.1 Regras de DFM

A melhor prática ao projetar placas de circuito impresso é adquirir e seguir as regras e diretrizes de fabricação (*Design for Manufacturing* – DFM) fornecidas pelo fabricante que construirá a PCI. As fabricantes devem fornecer um manual com todas as capacidades de produção, bem como, suas limitações. Seguindo essas regras de DFM do fabricante, o projetista garante que as dimensões e especificações do *layout* da PCI estarão dentro das capacidades do equipamento usado pela empresa que irá realizar a fabricação.

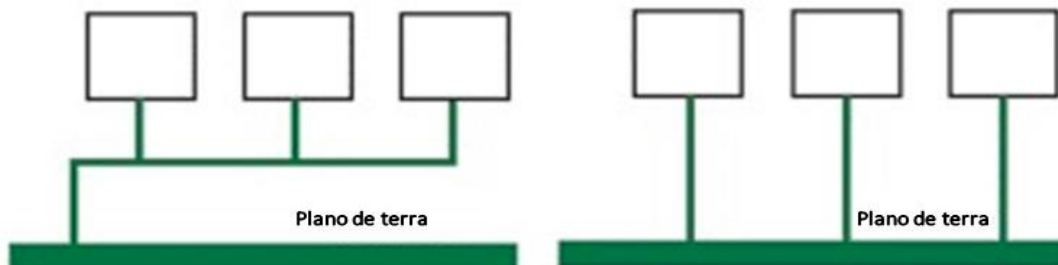
2.8.2 Planos de Terra de uma PCI

Um plano de terra de baixa indutância é essencial para ajudar a eliminar problemas de compatibilidade eletromagnética (*ElectroMagnetic Compatibility* - EMC). Aumentar o tamanho das áreas de terra de uma PCI diminui a indutância de terra em um sistema, além de reduzir emissões eletromagnéticas e o *Crosstalk*. Ao conectar todos os terminais de terra individuais e, logo, conectá-los ao plano de terra, não é uma boa prática, pois eleva o tamanho da malha de corrente e os sinais ainda podem acabar se acoplando ao plano de terra de maneiras diferentes, gerando uma PCI de baixa qualidade, alta indutância e problemas sérios de EMC.

O caminho que um sinal percorre de volta ao plano de terra é muito importante, pois quando o sinal passa por um caminho mais longo, é criado um loop de terra formando uma antena e irradiando energia. Portanto, toda a trilha que flui corrente de volta para a fonte deve seguir o menor caminho possível, e indo diretamente ao plano de terra, tal como mostra a Figura

64. Uma abordagem de *design* recomendada é possuir um plano inteiro de terra, visto que assim acomoda uma menor impedância para as correntes de retorno.

Figura 64: Exemplo de conexão ao plano de terra. A esquerda o não recomendado e a direita o recomendado.

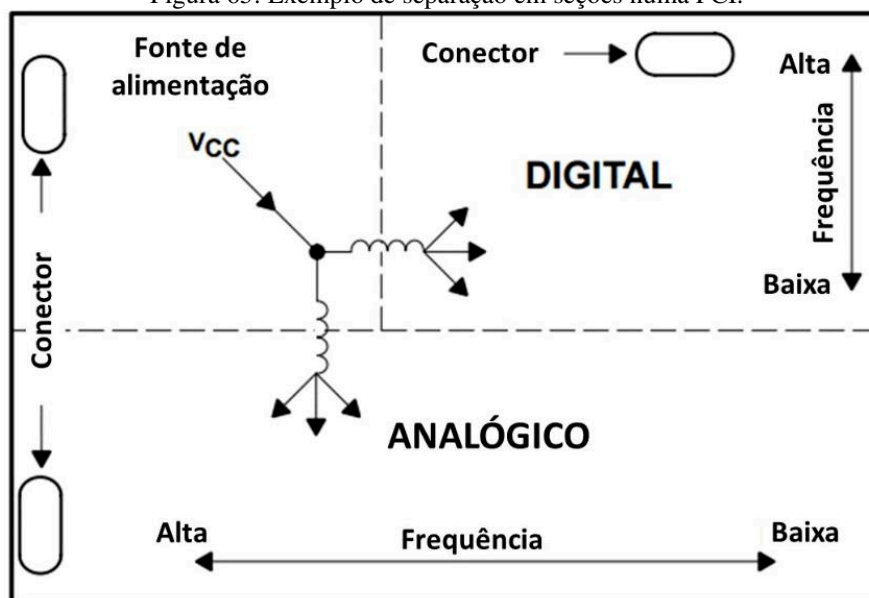


Fonte: Adaptado de [61].

2.8.3 Agrupamento e Posicionamento na PCI

Outra boa prática visando a minimização de EMC, é o agrupamento dos componentes na PCI de acordo com a sua funcionalidade, tal como seções digitais, seções analógicas, fontes de alimentação, circuito de baixa velocidade, circuitos de alta velocidade e assim sucessivamente, Figura 65. Tendo as trilhas de cada grupo devendo estar dentro de sua área designada.

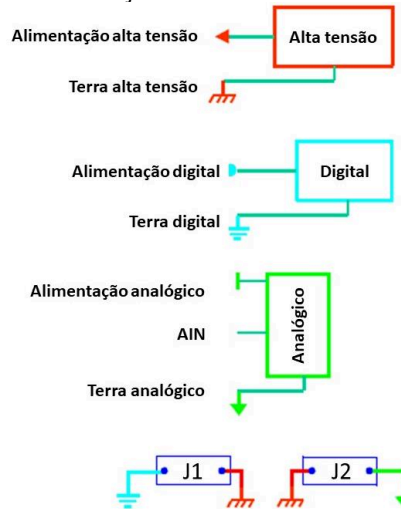
Figura 65: Exemplo de separação em seções numa PCI.



Fonte: [61].

Também é recomendado a divisão em seções da alimentação por função, tal como mostra a Figura 66, fazendo a ligação entre os planos de terra em pontos preestabelecidos. Uma vez, eletricamente conectados, tratam-se de planos de terra diferentes.

Figura 66: Exemplo onde cada seção de um circuito tem seu próprio plano de terra.



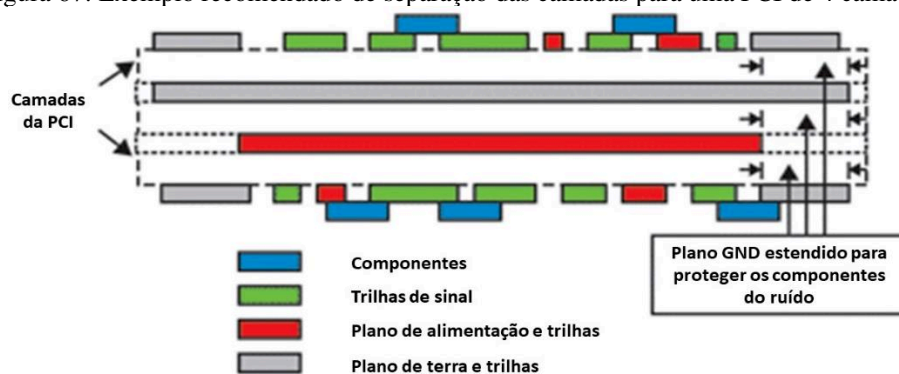
Fonte: [61].

Além desta divisão, é recomendado na união entre os planos de terra que haja um filtro para que o sinal possa fluir melhor de um subsistema para outro.

2.8.4 Camadas da PCI

Uma boa organização das camadas de um PCI é vital quando o assunto é a minimização de EMC. Onde é recomendado que PCIs que utilizem mais do que duas camadas, uma camada inteira deve ser usada como plano de terra, como mostra a Figura 67. Para o caso de uma placa de com quatro camadas, a camada abaixo do plano de terra deve ser usada como um plano de VCC.

Figura 67: Exemplo recomendado de separação das camadas para uma PCI de 4 camadas.



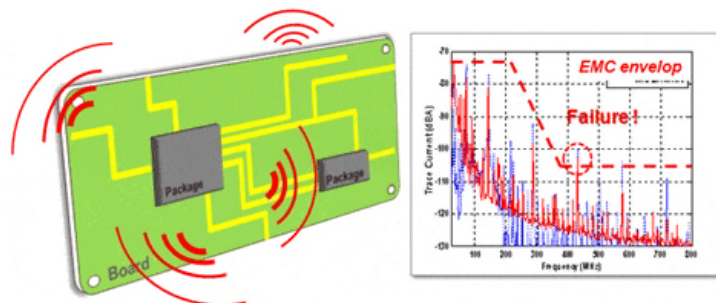
Fonte: [61].

2.8.5 Circuitos Digitais

Quando o assunto é sinais de *clock* ou qualquer outro sinal de alta velocidade, a atenção para esses circuitos deve ser dobrada para manter a radiação e *crosstalk* sob controle, Figura 68. Ao traçar trilhas para estes circuitos é recomendado elas serem as mais curtas possíveis e

estarem ao lado de um plano de terra e fora do plano de alimentação, uma vez que podem induzir ruído no plano alimentação.

Figura 68: Trilhas de alta velocidade irradiam EMI.



Fonte: [61].

2.8.6 Casamento de Impedância

Um bom casamento de impedância em linhas de transmissões evita reflexões indesejadas em trilhas que transportam sinais de ultra alta frequência na faixa de 10 GHz ou mais. Como sempre que há uma diferença de impedância, uma parte do sinal é perdida em forma de reflexão e uma grande quantidade de energia é irradiada. Portanto, uma boa prática recomendada para evitar reflexões indesejadas é a de evitar ângulos de 90°, uma vez que em um ângulo reto a largura da trilha é aumentada para 1414 vezes a sua largura original. Modificando características da linha tais como a capacitância e indutância, resultando na reflexão. Ao rotear esses tipos de sinais, conforme mostrado na Figura 69, quanto mais suave for a curva, melhor é a passagem do sinal e menores as chances de possíveis reflexões.

Figura 69: Melhores práticas para traçar trilhas.



Fonte: [61].

2.8.7 Circuitos Analógicos

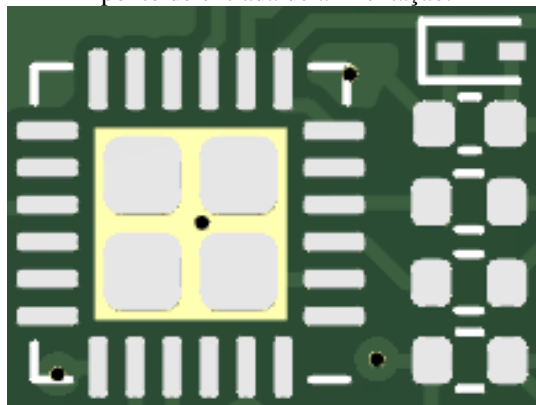
Em circuitos analógicos, o recomendado é que as trilhas que transportam sinais analógicos devem ser mantidas longe das trilhas de sinais de alta velocidade ou chaveamento, e sempre estarem protegidas com planos de terra. Onde também é importante o não

compartilhamento de plano de terra com circuitos digitais, devendo possuir um filtro para eliminar os ruídos de alta frequência.

2.8.8 Capacitor de Desacoplamento

Quaisquer ruídos na fonte de alimentação podem ocasionar falhas no funcionamento de um dispositivo. Normalmente, este ruído acoplado na fonte de alimentação é proveniente de uma alta frequência, e por isso é recomendado o uso dos capacitores de *bypass* ou desacoplamento para filtrar este ruído. Uma vez que seu uso fornece um caminho de baixa impedância para sinais de alta frequência no plano de VCC para o terminal de terra. Este caminho deve ser o mais curto possível, seguindo pelos capacitores de desacoplamento, como mostra a Figura 70. A distância do capacitor de desacoplamento e o circuito o qual deseja-se proteger é muito importante, pois distâncias longas de trilhas adicionam indutâncias indesejadas em série.

Figura 70: Posicionamento recomendado dos capacitores de desacoplamento na PCI, sempre próximo a cada ponto de entrada de alimentação.



Fonte: Autor.

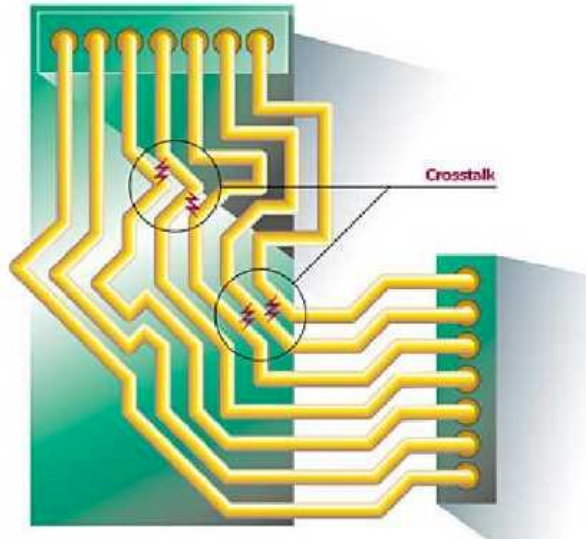
Geralmente é adotado capacitores cerâmicos de 100 nF próximos a cada semicondutor do dispositivo, ligados a cada ponto de entrada de alimentação. Sendo necessário pensar em outros valores e posições, caso a situação seja um circuito de alta potência, ou sinais de alta frequência.

2.8.9 Crosstalk

Qualquer fenômeno indesejado pelo qual um sinal transmitido em um circuito ou canal de um sistema de transmissão cria em outro é denominado de *crosstalk*, Figura 71. E em placas de circuitos impresso esse fenômeno pode existir entre duas trilhas quaisquer, muitas das vezes causadas por indutância mútua e capacitância mútua. Características que são alteradas devido o espaçamento entre as duas trilhas, a frequência do sinal, e a impedância das trilhas. Em

circuitos digitais o *crosstalk* causado por indutância é ligeiramente maior que o *crosstalk* por capacitância mútua. E pode ser reduzido, aumentando o espaçamento entre as trilhas ou por meio da redução da distância entre o plano, para o caso de PCIs multicamadas.

Figura 71: Problemas de *crosstalk* entre as trilhas.

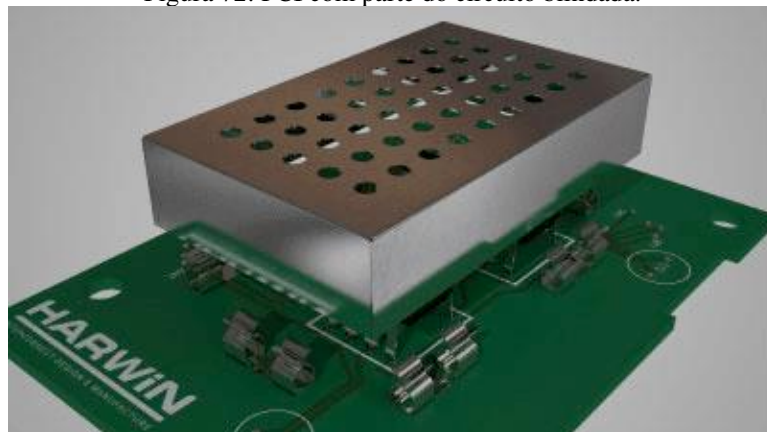


Fonte: [61].

2.8.10 Blindagem

Dentre todas as recomendações a blindagem consiste em um método não elétrico, mas sim mecânico para melhorar a EMC. Onde é empregada para cancelar interferências externas e evitar a irradiação eletromagnética para fora do sistema, podendo ser usada para cobrir uma parte ou todo o sistema, variando conforme os requisitos. A blindagem, Figura 72, opera como uma Gaiola de Faraday conectado ao plano de terra do circuito, reduzindo eficazmente a EMI absorvendo e refletindo sua irradiação.

Figura 72: PCI com parte do circuito blindada.



Fonte: [61].

2.8.11 Espessura da Camada de Cobre

A espessura da camada de cobre da placa de circuito impresso influencia diretamente na queda de tensão e na capacidade de fornecimento de energia para um determinado circuito. Este que pode resultar em um não funcionamento dos componentes dos vários circuitos embarcados numa PCI caso não haja um bom dimensionamento tanto da espessura do cobre quanto da largura das trilhas. Portanto, é uma boa pratica realizar uma análise para garantir que a espessura e larguras das trilhas estão de acordo com o mínimo de energia que será demandado pelos circuitos, em especial os circuitos de potência e chaveamentos de motores. Para isso existem, ferramentas que ajudam neste dimensionamento tanto em *softwares* de *design* de circuitos quanto em sites online, Figura 73.

Figura 73: Exemplo de calculadora para o dimensionamento elétrico do *software* KiCad.

Calculadora da PCI

Reguladores Atenuadores de RF E-Series Código das cores Linha da transmissão Tamanho da via Largura da trilha Espaçamento elétrico Classes das placas

Parâmetros

Corrente (I): 2,84406 A

Aumento da temperatura (ΔT): 10.0 °C

Comprimento do condutor: 20 mm

Resistividade do cobre: 1,72e-08 Ω·m

Caso especifique a corrente máxima, então a largura da trilha será calculada automaticamente.

Caso especifique uma das larguras da trilha, então a corrente máxima que ela suportará será calculada automaticamente. A largura para que a outra trilha também possa lidar com esta corrente também será calculada.

O valor de controle é mostrado em negrito.

Os cálculos são válidos para correntes de até 35 A (externo) ou 17,5 A (interno), aumentos de temperatura até 100 °C e larguras com até 400 mil (10 mm).

A fórmula do IPC 2221 é

$$I = K \cdot \Delta T^{0.44} \cdot (W \cdot H)^{0.725}$$

onde:

I = a corrente máxima em A

ΔT = aumento da temperatura acima do ambiente em °C

W é a largura em mils

H é a espessura (altura) em mils

K 0.024 para trilhas internas ou 0.048 para as trilhas externas

Traços da camada externa

Largura da trilha (W): 1,27 mm

Espessura da trilha (H): 0,035 mm

Área da seção transversal: 0,04445 mm²

Resistência: 0,00773903 Ω

Queda da tensão: 0,0220103 V

Perda da potência: 0,0625987 W

Traços da camada interna

Largura da trilha (W): 3,30383 mm

Espessura da trilha (H): 0,035 mm

Área da seção transversal: 0,115634 mm²

Resistência: 0,0029749 Ω

Queda da tensão: 0,00846082 V

Perda da potência: 0,0240631 W

Restaura os padrões

Fonte: Autor.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os conhecimentos básicos necessários para o desenvolvimento do projeto da PCI, englobando desde a história dos *drones*, seus componentes eletrônicos, placas de desenvolvimento, PCIs e boas práticas de construção. No capítulo seguinte será abordado os materiais e métodos necessários para o desenvolvimento deste projeto, expondo todos os requisitos, avaliação e testes necessários para a validação do projeto da placa de desenvolvimento para mini *drones*.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Após serem apresentados toda a teoria por trás deste projeto, neste capítulo será abordado o método de desenvolvimento utilizado, bem como os materiais utilizados no processo de desenvolvimento do projeto.

3.1 METODOLOGIA

A metodologia adotada para o projeto consistiu em quebrar em partes o processo de desenvolvimento, obtendo-se as seguintes etapas:

1) Revisão bibliográfica

Inicialmente foram realizadas pesquisas e um levantamento de projetos já existentes e em andamento para compreender melhor o nicho a qual o projeto destina-se, além dos principais desafios que poderiam ser vistos ao decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

2) Levantamento de requisitos

Após a análise dos projetos e revisão bibliográfica, foi realizado um levantamento de requisitos necessários para a realização do projeto, sendo estudadas novas tecnologias buscando atendê-las com a escolha do *hardware* e *software* apropriados que também levou em consideração as experiências adquiridas com trabalhos anteriores.

3) Projeto elétrico

Com os requisitos definidos, a etapa 3 consistiu em elaborar o esboço elétrico criando os principais circuitos de um mini *drone*, interligando-os em seus devidos barramentos e ao final executando a verificação de regras elétricas ou ERC como manda o fluxo de trabalho apresentado em 2.6.1.2.

4) Layout da PCI

Após ter concluído o projeto elétrico o próximo passo resumiu-se em criar o *layout* da PCI, passando pelas etapas de posicionamento dos componentes, roteamento e checagem de erros DRC conforme manda o fluxo de trabalho do *software* utilizado para o desenvolvimento, tópico 2.6.1.2. Processo que levou em consideração também as boas práticas de desenvolvimento apresentadas no tópico 2.8.

5) Geração de arquivos de fabricação

Estando com o *layout* finalizado, o próximo passo executado foi a geração dos arquivos necessários para o processo de fabricação da PCI, também já detalhado em 2.7.

6) Testes e Avaliação

Por último o projeto foi carregado no servidor da empresa escolhida para fabricação, devendo passar pelo teste que visa garantir que o projeto atende aos requisitos mínimos para fabricação, e estão dentro dos limites impostos de seus maquinários usados para a fabricação. Também foi realizado nesta etapa a avaliação do projeto, bem como as mudanças julgadas necessárias, identificadas e corrigidas. Onde ao final da avaliação, se não constatada nenhuma pendência ou desobediências as regras de fabricação, o projeto estará consolidado e pronto para ser fabricado e montado.

3.2 TRABALHO ANTERIOR

O trabalho desenvolvido aqui foi baseado em trabalhos anteriores realizados pelo autor, onde foram adquiridos conhecimentos tanto em aspectos construtivos quanto de funcionamento, *hardware* e *firmware*. A primeira versão foi fundamentada no projeto *MultiWii*, um *software* de controle para multirotores [62] bastante utilizado devido a sua grande versatilidade e compatibilidade com vários tipos de projetos. O mini *drone* foi desenvolvido utilizando módulos convencionais de sensores e uma placa Arduino Pro Mini, com o objetivo de ter um custo relativamente baixo, onde optou-se pela redução de seu tamanho.

O protótipo teve toda a sua estrutura/*frame*, Figura 74, projetada para encaixar os vários módulos de circuitos eletrônicos compostos pelo *drone*, onde foi utilizada a impressora 3D para fabricação. Esse recurso foi fundamental, devido a quantidade de módulos que compunham o seu funcionamento. Além disso, a estrutura foi projetada para prender os motores sem o uso de parafusos, por meio de pressão, eliminando o peso extra. Todo o dispositivo foi construído com o foco em ter no final um *drone* leve, capaz de levantar voo e ter um desempenho satisfatório.

Para conseguir alcançar o objetivo, optou-se pela utilização de motores *brushed* de baixo custo, mas de alta performance, capazes de gerar uma tração de aproximadamente 40 g cada, quando utilizado hélices bi pás de 55 mm. Este tipo de motor foi escolhido devido a quantidade circuitos eletrônicos necessários para o seu funcionamento. A eletrônica dos motores *brushed* é simplificada, resultando num circuito menor e menos complexo, tornando possível o desenvolvimento de um circuito de baixo custo.

Figura 74: Frame utilizado no primeiro protótipo.



Fonte: Autor.

Assim, da unificação de vários módulos encontrados comercialmente para Arduino, o primeiro protótipo do mini *drone* foi criado, Figura 75. O qual conseguiu cumprir com seu objetivo, oferecendo um desempenho razoável, mas de fácil controle e de baixo custo. Com base nas experiências adquiridas no desenvolvimento deste dispositivo, espera-se criar uma placa de desenvolvimento para mini *drones* para ser utilizado como ferramenta educacional.

Figura 75: Primeiro protótipo do mini *drone*.

Fonte: Autor.

Cabe aqui ressaltar que originalmente este trabalho abordaria todo o processo de desenvolvimento, o que incluía o projeto elétrico, *design* do *layout* da PCI, fabricação e montagem da PCI, bem como a montagem do mini *drone* e alguns *firmwares* de testes para comprovar o funcionamento de todos os periféricos embarcados na placa de desenvolvimento. Cujo resultado final seria um mini *drone* totalmente funcional e com todas as adaptações julgadas necessárias para ser utilizado como uma ferramenta educacional e de pesquisa. No entanto, devido aos valores elevados envolvidos no processo de confecção o presente trabalho se ateve apenas ao projeto da placa de circuito impresso de uma placa de desenvolvimento para mini *drones*.

3.3 MATERIAL E CUSTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado apenas um computador e um *software* destinado ao *design* de placas de circuito impresso, onde o *software* escolhido é bastante conhecido e de código fonte aberto, cuja utilização é gratuita. O *software* KiCad v6.0 pode ser encontrado para *download* por meio do seguinte link (<https://www.kicad.org/download/>). Existe diversos outros *softwares* que podem ser utilizados para esta finalidade tal como o *Altium Design*, contudo, o intuito deste trabalho é tornar o projeto mais acessível, além de contribuir com a comunidade *open source*, *maker* e de pesquisa.

Além do *software*, foi utilizado o site da JLCPCB, este para realizar a validação e as cotações da fabricação da PCI, componentes, montagem e frete. Site disponível no link (<https://jlcpcb.com/>). As cotações e estimativas dos valores obtidos para a confecção de um mini *drone* é apresentada nos resultados deste trabalho, contudo, a estimativa ultrapassou a quantia de 1 mil reais, tornando inviável para financiamento com recursos próprios. Desta forma, o trabalho consistiu apenas no projeto da placa de circuito impresso, não tendo nenhum custo, ao passo que todo o processo é realizado inteiramente num computador e com *softwares* gratuitos.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi abordado as etapas e os materiais que serão utilizados para desenvolvimento do projeto, bem como, seus custos. Já no capítulo seguinte, será abordado o processo de desenvolvimento do projeto apontando os principais pontos, para que qualquer um possa replicar o presente trabalho.

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será abordado todos os passos executados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, iniciando pelas regras de DFM do fabricante escolhido até a geração de arquivos de fabricação, testes e avaliação.

1.6 REQUISITOS DE DFM

Como mencionado no item 2.8.1, a adoção das regras de DFM tem que ser adotadas e seguidas, sendo uma das primeiras tarefas realizadas antes de iniciar o desenvolvimento do projeto. Logo, foram levantados os requisitos de DFM tanto para a fabricação da PCI, quanto para o processo de montagem. Ambos abordados a seguir.

4.1.1 DFM para Fabricação da PCI

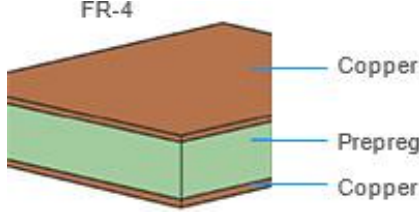
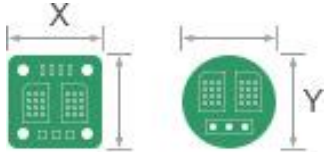
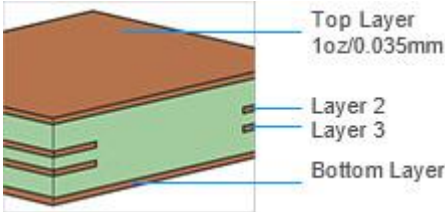
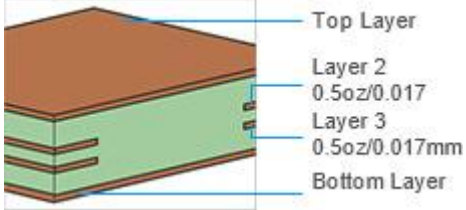
Seguindo com as boas práticas para o desenvolvimento, procurou-se por empresas que fossem capazes de realizar tanto a fabricação da PCI quanto a aquisição e montagem dos componentes. Onde foram consultadas e avaliadas empresas nacionais e internacionais, sendo a JLCPCB a escolhida, devido as suas capacidades de fabricação e montagem estarem alinhadas com os requisitos previstos para o projeto. Além disso, sua plataforma é bastante desenvolvida, possuindo até verificação de regras de *layout*. Esta que visa garantir que o projeto esteja de acordo com as capacidades técnicas de produção antes mesmo de o usuário realizar o pedido de fabricação.

Com o intuito de redução de custos gerados com a fabricação e eliminar revisões ou alterações de *design* que causem atrasos na programação. Foi consultado os recursos de fabricação da PCI pela JLCPCB em seu site que pode ser encontrado em [63]. Abaixo nas tabelas de 3 a 7, temos as especificações para a fabricação da PCI.

4.1.1.1 Fabricação da PCI

Na Tabela 3 abaixo são abordadas as especificações relacionadas a confecção de uma placa de circuito impresso, especificações tais como: dimensões, espessura, quantidade de camadas entre outras.

Tabela 3: Capacidade de fabricação da PCI.

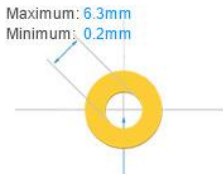
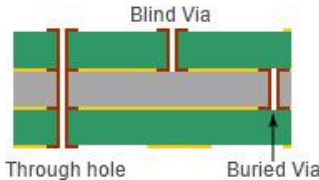
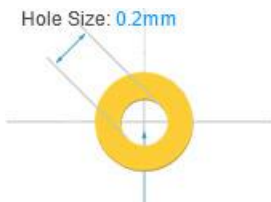
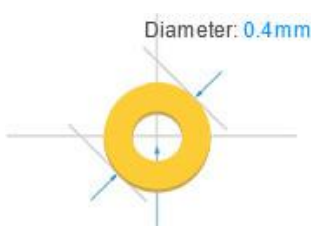
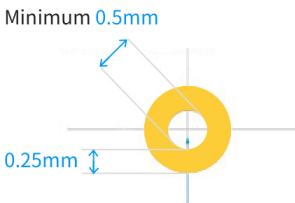
Característica	Capacidade	Anotação	Padrão
Nº de camadas	1, 2, 4, 6 camadas	Número de camadas de cobre na placa.	
Material	FR4	FR-4 Padrão Tg 130-140/ Tg 155	
Dimensão máxima	400 x 500 mm	Dimensão máxima que a JLCPCB pode aceitar.	
Espessura da placa	0.4 / 0.6 / 0.8 / 1.0 / 1.2 / 1.6 / 2.0 mm	A espessura da placa acabada.	
Espessura da camada de cobre externa	1 oz / 2 oz (35 μ m / 70 μ m)	O peso de cobre acabado da camada externa é de 1 oz ou 2 oz.	
Espessura da camada de cobre interna	0,5 oz (17.5 μ m)	O peso de cobre acabado da camada interna é de 0,5 oz por padrão. O peso interno de cobre de 2 oz está disponível para PCIs de 4 camadas com espessura de 1,6 mm.	

Fonte: Adaptado de [63].

4.1.1.2 Tamanho da Broca-Furo

Abaixo na Tabela 4, são abordadas as especificações para furos através da placa de circuito impresso, incluindo furos do tipo PTH e vias.

Tabela 4: Capacidade do tamanho da broca/furo.

Característica	Capacidade	Anotação	Padrão
Tamanho do furo de perfuração	0.20 mm- 6.30 mm	O tamanho da broca mínima é de 0,20 mm. O tamanho máximo da broca é de 6,30 mm.	
Vias Cegas/Enterradas	Não suportado	Atualmente não suporta Vias Cegas/Enterradas, apenas Vias através de buracos.	
Tamanho mínimo do furo de uma Via	0,2 mm	Para PCB de camada única e dupla, o tamanho mínimo do furo da via é de 0,3 mm; Para PCB multi camada, o tamanho mínimo do furo é de 0,2 mm	
Diâmetro mínimo de uma Via	0,4 mm	Para PCB de camada única e dupla, o diâmetro mínimo da via é de 0,5 mm; Para PCB multi camada, o diâmetro mínimo da via é de 0,4 mm	
Tamanho do furo PTH	0.20 mm - 6.35 mm	O tamanho do anel anular será ampliado para 0,15 mm na produção.	
Tamanho do bloco	Mínimo 1.0 mm	O tamanho do PAD será ampliado em 0,5 mm do que o tamanho do furo. O tamanho mínimo do anel anular banhado ao redor através do PAD é de 0,25 mm. Se os tamanhos recomendados não forem respeitados, o bloco não será produzido corretamente.	

Fonte: Adaptado de [63].

4.1.1.3 Anel Anular

A Tabela 5 especifica o tamanho mínimo do anel de cobre envolto de um furo, seja PTH ou Via para a espessura de uma e duas onças.

Tabela 5: Capacidade para o tamanho do anel anular.

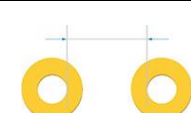
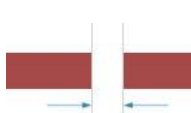
Espessura de cobre	Anel anular mínimo	PTH	Padrão
Cobre de 1 oz	0,13 mm	0,3 mm	
Cobre de 2 oz	0,2 mm	0,3 mm	

Fonte: Adaptado de [63].

4.1.1.4 Folga Mínima

Na Tabela 6, são abordadas as especificações de folga mínima entre furos, PADs e outros.

Tabela 6: Capacidade para folgas.

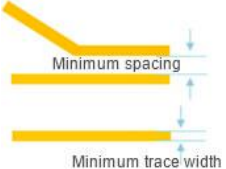
Característica	Capacidade	Padrão
Entre furos (redes diferentes)	0,5 mm	
Entre Vias (mesmas redes)	0,2 mm	
Entre PADs (PADs sem furos e redes diferentes)	0,127 mm	
Trilha para Via	0,254 mm	
PTH para Trilha	0,33 mm	
PAD para Trilha	0,2 mm	

Fonte: Adaptado de [63].

4.1.1.5 Largura Mínima da Trilha e Espaçamento

A Tabela 7 abaixo especifica a largura e espaçamento mínimo para as trilhas, considerando o número de camadas e a espessura de cobre.

Tabela 7: Capacidade para a largura de trilha e espaçamento.

Característica	Largura mínima de trilha	Espaçamento mínimo	Padrão
1 - 2 Camadas	5 mil (0,127 mm)	5 mil (0,127 mm)	
4 - 6 Camadas	3,5 mil (0,09 mm)	3,5 mil (0,09 mm)	
Espessura do cobre de 2 oz	8 mil (0,2 mm)	8 mil (0,2 mm)	

Fonte: Adaptado de [63].

4.1.2 DFM para a Montagem

Ainda no site, também é possível encontrar os requisitos para a montagem de uma PCI, esta que pode ser de dois modos. O primeiro é o modo denominado de PCBA Econômico, que como o próprio nome diz, possui o foco no baixo custo e fabricação de poucas unidades. Enquanto que o segundo modo denominado de PCBA padrão é mais caro e engloba um volume maior de produção e mais recursos que o modo econômico. A Tabela 8 abaixo exhibe em detalhes cada modo, estes que foram tirados de [63].

Tabela 8: Modos de montagem.

Características	PCBA Econômico	PCBA Padrão
Tipos de montagem	Colocação lateral única	Colocação lateral única e dupla
Nº de camadas da PCI	2, 4, 6 camadas	1 – 6 camadas
Espessura	0,8 mm - 1,6 mm	0,4 mm - 2,0 mm
Dimensão	Tamanho único do PCB: 2 Camadas: 10 x 10 mm – 480 x 320 mm 4 - 6 Camadas: 10 x 10 mm – 350 x 320 mm Tamanho do painel PCB: 10 x 10 mm – 250 x 250 mm	Tamanho único do PCB: 70 x 70 mm – 400 x 500 mm Tamanho do painel PCB: 70 x 70 mm – 250 x 250 mm
Volume de pedidos	2 - 50 peças	2 - 80000 peças
Acabamento de superfície	Limitado por opções específicas	Sem limite
Cor da PCI	Limitado por opções específicas	Sem limite
Formato de entrega	PCB único	PCB único e Painel com corte em V
Pacote Mínimo	0402	0201
Espaçamento mínimo de pinos (CI)	0,4 mm	0,35 mm
Temperatura de refluxo	255 +/- 5 °C (não ajustável)	240 +/- 5 °C
Tempo de construção	1 - 3 dias	≥ 4 dias

Fonte: Adaptado de [63].

4.2 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

Após a execução da etapa anterior, foram listadas as principais características para o projeto, estas que foram definidas com base no levantamento feito e experiências adquiridas com o desenvolvimento dos projetos anteriores e classificados em requisitos obrigatórios e não obrigatórios. Sendo os requisitos obrigatórios, aqueles em que o projeto deverá obrigatoriamente possuir e os não obrigatórios entrando como um adicional ao projeto, podendo ou não serem adicionados.

4.2.1 Requisitos Obrigatórios

Os requisitos definidos aqui deverão obrigatoriamente estar presente no projeto final, sendo estes, os pontos básicos levantados e que irão dar a característica de placa de desenvolvimento ao projeto.

1) Suporte a módulos de expansão

O suporte a módulos de expansão visa dar ao usuário a possibilidade de adicionar módulos extras incrementando o *hardware* com novos sensores e periféricos.

2) Possuir comunicação sem fio

Oferecer previamente embarcado na placa algum método de comunicação para controle remoto e trocas de informações sem fio.

3) Conector padrão USB

Para garantir uma maior compatibilidade e proporcionar o fácil acesso para a realização de gravações de *firmware* e depuração.

4) Prover pelo menos uma interface de comunicação (SPI, I2C ou UART)

Este requisito visa garantir o suporte a módulos de expansão mais robustos e que possuam interfaces de comunicação para troca de dados.

5) Prover pinos GPIOs

Requisito extremamente necessário para que o usuário consiga realizar a leitura desde sinais analógicos a sinais digitais, bem como possa utilizar esses pinos como atuadores digitais.

6) Bom poder de processamento

Também requisito extremamente importante e que garantirá a execução de códigos complexos de forma rápida, além de garantir um bom desempenho em casos de execução de sistemas operacionais de tempo real que drenam parte do uso CPU.

7) Boa capacidade de memória (FLASH, SRAM e EEPROM)

Assim como o bom desempenho de processamento, possuir memórias de boas capacidades é fundamental para se extrair o máximo de desempenho, este que poderá operar com enormes linhas de algoritmos, gravação de informações, logs, e processamentos paralelos de tarefas.

8) Proteções contra ESD e ou alimentação invertida

Muito importante que a placa de circuito impresso possua proteções, evitando a queima de seus componentes ao ser manuseada pelo usuário, ou mesmo protegendo caso ocorra inversão da polaridade da alimentação.

9) Não usar a placa de circuito impresso como estrutura mecânica

Como relatado anteriormente, este é um ponto tomado como melhoria às placas concorrentes contornando o problema da fragilidade de suas placas de desenvolvimento a quedas e colisões.

10) Usar componentes comuns e com valores acessíveis

Requisito que visa tornar o projeto de fácil manutenção/atualização ao garantir uma maior compatibilidade com o uso de valores comerciais de componentes e o uso de *sockets* e encapsulamentos comuns.

11) Posicionamento unilateral dos componentes na PCI

Como forma de diminuir o preço do serviço de montagem da placa, será adotado o posicionamento unilateral dos componentes, pois como relatado anteriormente o processo de montagem para PCIs com posicionamento de componentes em ambas as faces é superior.

12) Estar dentro das capacidades de produção da JLCPCB

Para garantir a fabricação do projeto é obrigatório que se leve em consideração as capacidades de produção da fabricante, tanto para o processo de fabricação da PCI, quanto para a montagem.

4.2.2 Requisitos Opcionais

Os requisitos levantados neste tópico não são obrigatórios, contudo, cada item aqui adicionado conta como diferencial ao projeto que se destacará perante as principais placas concorrentes estudadas. Onde foram vistos pontos para a inserção de melhorias no presente projeto.

1) Possuir além dos sensores básicos acelerômetro e giroscópio, outros sensores embarcados

A adição de sensores visa oferecer maiores possibilidades ao usuário, uma vez que não precisará adicionar módulos de sensoriamento simples. Liberando espaço para a inserção de módulos mais específicos e ou robustos.

2) Oferecer mais de um tipo de tecnologia de comunicação sem fio

Este requisito consiste em também aumentar as possibilidades de uso pelo usuário, onde poderá além de escolher qual interface de comunicação deseja usar, a possibilidade de usar os dois ao mesmo tempo, seja um para controle e outro para depuração ou leitura de dados.

3) Suporte ao padrão de espaçamento entre furos de frames

Assim como tudo na indústria tem-se padrões, no caso dos mini *drones* é possível encontrar *frames* de diversos modelos, tamanhos e materiais em sites *online*. Pensando em expandir as possibilidades de uso, seria essencial que a placa seguisse o padrão de espaçamento.

4) Suporte a mais de uma linguagem de programação e ou RTOS

Este requisito visa proporcionar a democratização do projeto, uma vez que a placa de desenvolvimento pode ser capaz de suportar linguagens de programação desde o nível mais baixo, a nível de registradores, a um nível de completa abstração, com uma linguagem de alto nível.

5) Suporte a mais de uma interface de comunicação para módulos de expansão

Também com a finalidade de aumentar as possibilidades de uso, oferecer uma segunda interface de comunicação garante uma maior compatibilidade com periféricos e também permite que seja adicionados módulos de expansão mais robustos, capazes de usar duas interfaces de comunicação simultaneamente.

Após este levantamento, iniciou-se a etapa de desenvolvimento do projeto elétrico, etapa onde são definidos os componentes e construídos os esquemáticos dos vários circuitos que farão parte da placa de desenvolvimento e que é abordada no tópico seguinte.

4.3 PROJETO ELÉTRICO

Neste tópico será abordado o processo de escolha, definições, topologias e esquemas de ligação dos vários circuitos presentes no projeto. Iniciando pela parte da alimentação e circuito de proteção, passando por todos circuitos responsáveis por garantir o funcionamento dos vários circuitos eletrônicos, sensores e microcontrolador até a conclusão de todo o esquemático elétrico da placa de desenvolvimento proposta.

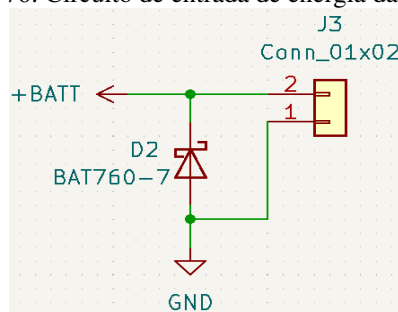
4.3.1 Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação é o circuito capaz de prover a energia elétrica nas tensões e potências corretas dimensionadas para suprir a demanda de cada circuito da placa. A alimentação neste projeto é fornecida de duas formas, a primeira pela USB e a segunda pela bateria. Onde ambas as fontes de fornecimento possuem além de níveis de tensões distintos, barramentos diferentes. Tendo a necessidade de um circuito de controle e condicionamento da alimentação para o seu uso nos demais circuitos do projeto.

O objetivo deste circuito é condicionar as duas fontes de alimentação provenientes da USB e bateria, para que possam suprir a demanda solicitada por cada circuito do projeto.

Foi elaborado o esquema elétrico da conexão da bateria, este que é feito por meio do conector J3. Além disso, foi inserido um diodo próximo ao conector para proteção contra uma possível inversão de polaridade, garantindo assim, que não apareça uma diferença de potencial relevante de forma a danificar os circuitos da placa. Também foi definido para fins de padronização que no decorrer do desenvolvimento dos próximos circuitos, os circuitos que utilizarem conectores tais como o J3 visto na Figura 76 abaixo, o pino 1 será reservado exclusivamente para o terminal terra do circuito.

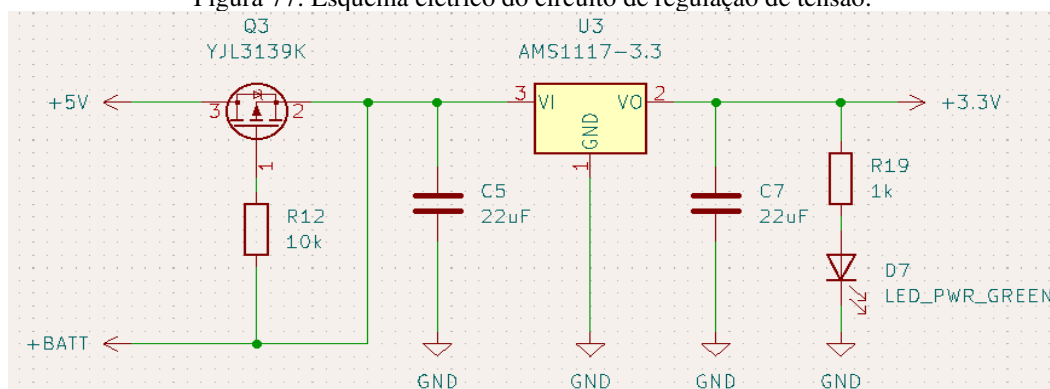
Figura 76: Circuito de entrada de energia da bateria.



Fonte: Autor.

Como a grande maioria dos circuitos integrados operam com uma tensão nominal de 3,3 V, fez-se necessário o desenvolvimento de um circuito de regulação capaz de converter a tensão proveniente da bateria e da USB para fornecer de maneira estável este nível de tensão. O circuito desenvolvido é proveniente do manual de referência do circuito integrado do regulador de tensão AMS117 cuja referência é U3 no esquema da Figura 77 abaixo. Onde o manual especifica dois capacitores de 22 μ F de 25 V para desacoplamento. Ainda no circuito abaixo foram adicionados mais dois circuitos, um responsável por alternar entre as fontes de alimentação para o circuito de conversão, e o outro para identificação de alimentação por meio de um LED.

Figura 77: Esquema elétrico do circuito de regulação de tensão.

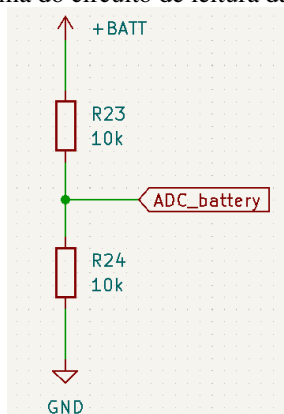


Fonte: Autor.

O circuito composto pelo MOSFET de canal P cuja referência é Q3 e o resistor R12 configuram a entrada do conversor AMS1117, desabilitando a entrada +5 V quando a bateria está conectada e ativando novamente quando a bateria é desconectada. O circuito adicional composto pelo R19 e D7 fazem parte da indicação da presença de alimentação de 3,3 V no circuito, que quando o LED está ligado indica a presença de 3,3 V, e quando desligado, nenhuma fonte de alimentação está conectada. O circuito integrado AMS1117 possui a capacidade de entregar uma corrente máxima de até 1 A, sendo mais do que suficiente para alimentar todos os circuitos do projeto.

Ainda foi adicionado um circuito de condicionamento da tensão da bateria, Figura 78, uma vez que para ser realizado a sua leitura, é necessário que o valor da tensão esteja entre o intervalo de medição suportado pelo conversor analógico digital, entre 0 e 3,3 V. Para isso, um divisor de tensão foi implementado, reduzindo a tensão da bateria pela metade no pino do conversor, este que agora pode ler valores de tensões de até 6,6 V, intervalo que cobre toda a faixa de variação de carga da bateria, onde normalmente varia entre 2,8 a 4,2 V.

Figura 78: Esquema do circuito de leitura da tensão da bateria.



Fonte: Autor.

4.3.2 Circuito da Interface USB

O circuito de interface da USB é o circuito responsável por condicionar o sinal de dados da comunicação USB, a protegendo contra ESD e a convertendo sua comunicação de USB para UART que é a interface compatível pelo microcontrolador utilizado.

O objetivo desta etapa é condicionar o sinal de dados e converter o protocolo de comunicação USB para UART nível TTL compatível com o microcontrolador.

Uma das formas pensadas para a comunicação é a interface USB que é bastante popular, desta maneira foi elaborado o esquemático que provê um melhor casamento dos sinais de transmissão, bem como os circuitos de proteção, estes dotados com proteção contra ESD e curtos na alimentação. Na Figura 79 abaixo pode ser visto o esquema completo do circuito da USB, iniciando pelo conector USB do tipo micro B e referenciado como J1, que cujos pinos sem uso foram aterrados.

O pino VBUS do conector é responsável pelo fornecimento de 5 V proveniente da USB para alimentar qualquer circuito, portanto, foi protegido. Sua proteção conta com um fusível reinicializável que entra em atuação quando a corrente passante é maior do que a permitida, abrindo o circuito e protegendo contra possíveis danos.

O fusível escolhido, cuja referência F1 começa a atuar quando a corrente ultrapassa a capacidade máxima de fornecimento de uma interface USB convencional, definida como 500 mA e retorna a operar após alguns instantes, quando o problema que fez elevar a corrente for resolvido, evitando assim, futuras manutenções na placa para substituir o fusível.

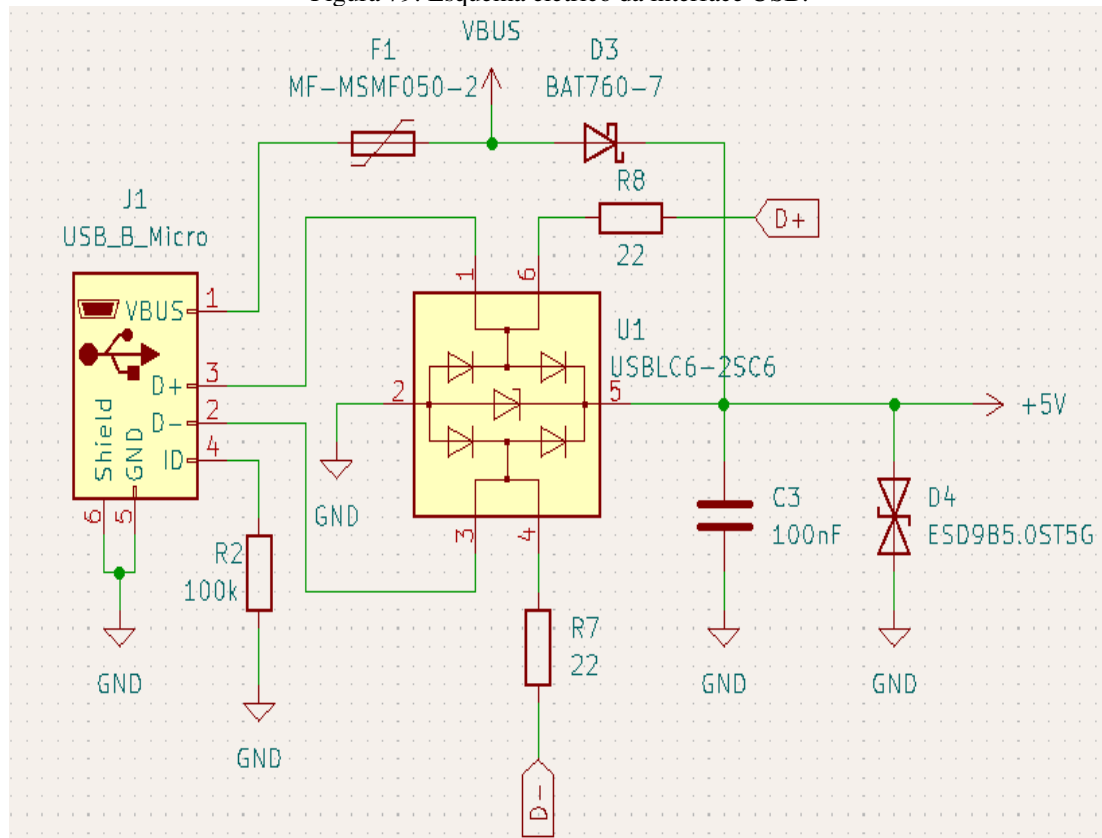
Além da proteção de corrente, uma proteção contra inversão de polaridade foi inserida por meio do diodo de cuja referência D3, esta que também protege evitando uma alta tensão de retorno no caso de uma ESD.

O circuito integrado U1 é responsável por eliminar possíveis ESD nas linhas de comunicação da USB, enquanto os resistores R7 e R8 constituem de resistores de terminação. Ambos componentes garantem uma boa integridade do sinal, mantendo o sinal condicionado e com o casamento de impedância adequado e de acordo com os padrões da norma que rege os requisitos de comunicação USB. Enquanto os demais componentes C3 e D4, são um capacitor de desacoplamento e um diodo de proteção bidirecional contra ESD para linha geral de alimentação de 5 V provenientes da USB.

O microcontrolador do projeto não suporta comunicação via interface USB diretamente, no entanto, permite comunicação UART, esta que pode ser utilizada em conjunto com um CI

conversor de comunicação. Para isso, o circuito integrado escolhido foi o CP2101N, que é bastante similar ao adotado nas placas de desenvolvimento baseado nos módulos ESP32.

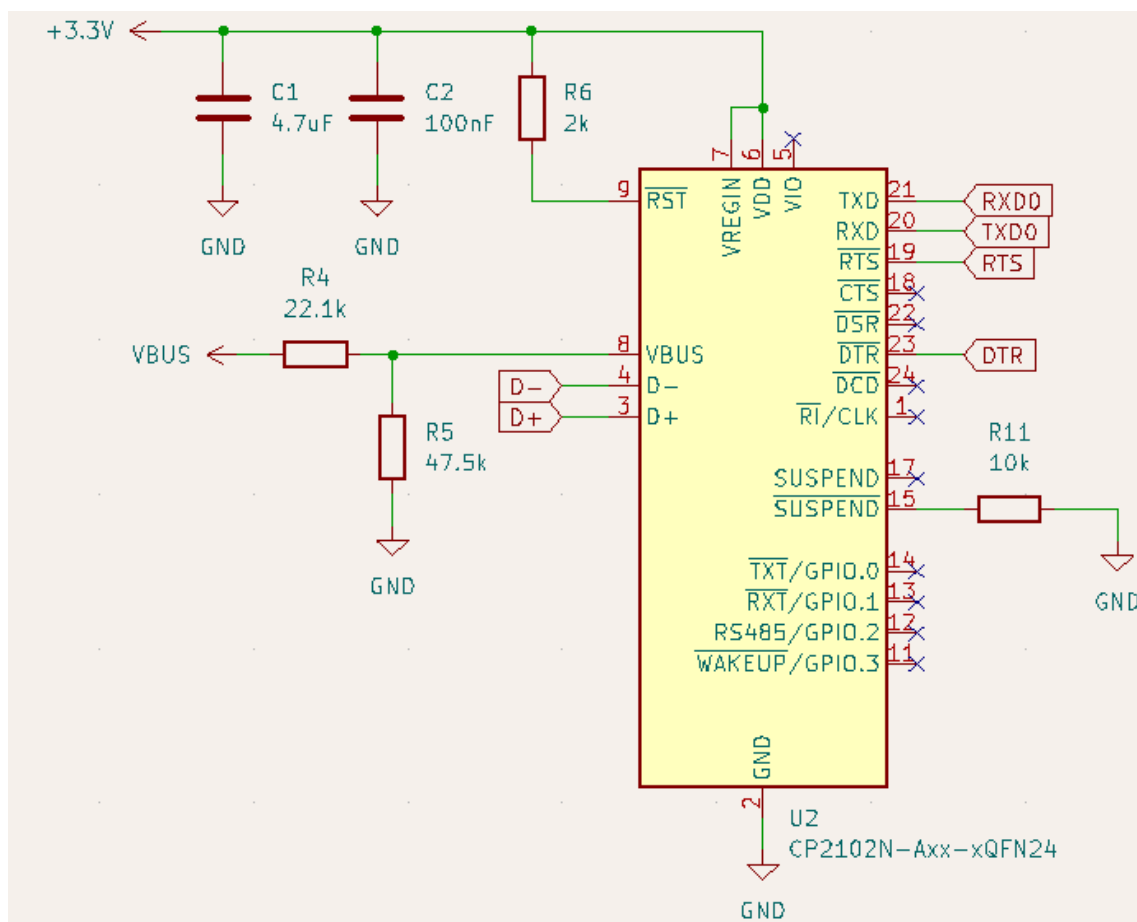
Figura 79: Esquema elétrico da interface USB.



Fonte: Autor.

Tal escolha garante que o mesmo esquema elaborado nas placas de desenvolvimento do ESP32 possa ser replicado no projeto. A Figura 80: Esquema elétrico do CI conversor USB para UART. A Figura 80 exibe o esquema elaborado para realizar esta conversão, tendo os componentes C1, C2, R4, R5, R6 e R11 provenientes do próprio manual da referência do CI que estabelece os componentes necessário para o seu funcionamento. Demais pinos do CI foram conectados tirando como base o esquema elétrico da placa de desenvolvimento do ESP32, e pinos sem uso foram marcados como sem conexão, para evitar erros ao executar a verificação de regras elétricas.

Figura 80: Esquema elétrico do CI conversor USB para UART.



Fonte: Autor.

4.3.3 Circuito do Microcontrolador

O circuito do microcontrolador é o circuito que conta com os componentes básicos para o seu funcionamento e as interconexões entre todos os periféricos, uma vez que o microcontrolador é o cérebro da placa e é responsável pelo controle e atuação de cada circuito, sensores, atuadores, conversores, barramentos de comunicação e etc.

O microcontrolador ou neste caso, o módulo ESP32 WROOM foi escolhido para o projeto por vários motivos, destacando-se pela quantidade de recursos e periféricos tais como: TIMERS, RTC, ADCs, DACs, PWMs, SPIs, I2Cs, UARTs, pinos GPIOs, suporte a criptografia AES por *hardware* e interfaces de comunicação sem fio como *Wi-Fi* e *Bluetooth*. Além do bom desempenho que poderá proporcionar tanto em capacidade de processamento, onde a CPU possui dois núcleos de processamento de 32 bits com *clock* máximo de 240 MHz cada, quanto em armazenamento. Onde em termos de memória a CPU possui internamente uma boa quantidade memória ROM e SRAM e ainda conta com a possibilidade de expansão destas memórias com a utilização da memória flash externa de 4 MB embarcada no módulo.

Este módulo apresenta características que vão muito além dos requisitos obrigatórios levantados para o microcontrolador na etapa de levantamento de requisitos. E pensando em entregar a mais nos requisitos pedidos, tanto os obrigatórios quanto os opcionais, a escolha deste módulo foi inquestionável, visto que grande parte dos componentes necessários para o seu funcionamento já estão embarcados. Acelerando o processo de desenvolvimento, uma vez que o tempo de desenvolvimento poderia ser ligeiramente afetado, caso tivesse a necessidade de desenvolver o circuito de rádio frequência e lidar com o número maior de componentes.

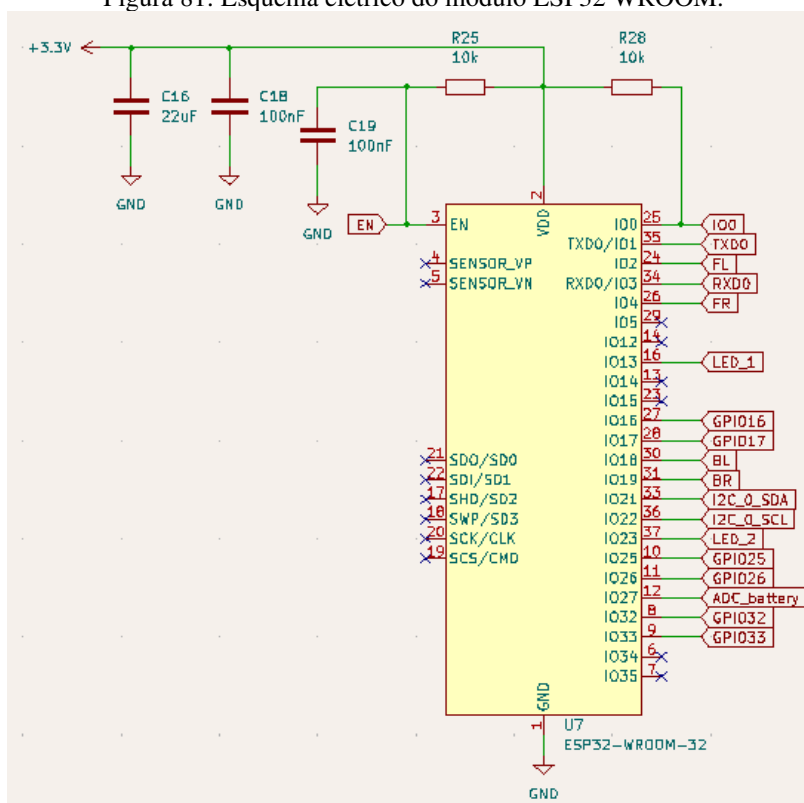
O objetivo deste circuito é realizar todas as ligações com os componentes básicos necessários para garantir o funcionamento do microcontrolador adotado para o projeto. Desta forma o circuito deve prover a conexão típica com capacitores de desacoplamento, condicionamento da sua alimentação, circuito de RESET e de BOOT, bem como, as conexões utilizadas nos demais circuitos e periféricos que irá atuar.

O desenvolvimento de seu esquema elétrico, teve como base as placas desenvolvimento disponíveis comercialmente denominadas de ESP32 DEV KIT, cujo esquema elétrico pode ser encontrado em [64]. A Figura 81 abaixo mostra o esquema elaborado, onde os componentes C16, C18, C19, R25 e R28 foram replicados do esquemático da placa de desenvolvimento ESP32 DEV KIT. Demais pinos do módulo, foram inseridos os rótulos de interconexão, estes que interligam os pinos que possuam rótulos idênticos e os pinos sem uso marcados como sem conexão.

Também se manteve o mesmo esquema elétrico destinado ao RESET e ao BOOT, facilitando o seu uso, visto que este padrão adotado das placas de desenvolvimento ESP32 DEV KIT são bem conhecidos. Além de manter a padronização, este tipo de configuração garante uma maior facilidade ao se gravar um *firmware*, pois não é necessário que o usuário pressione o botão de BOOT para entrar no modo de gravação. O esquema desenvolvido pode ser visto na Figura 82 abaixo, onde o SW1 representa o botão de RESET ou EN, enquanto o SW2 o botão de BOOT ou IO0.

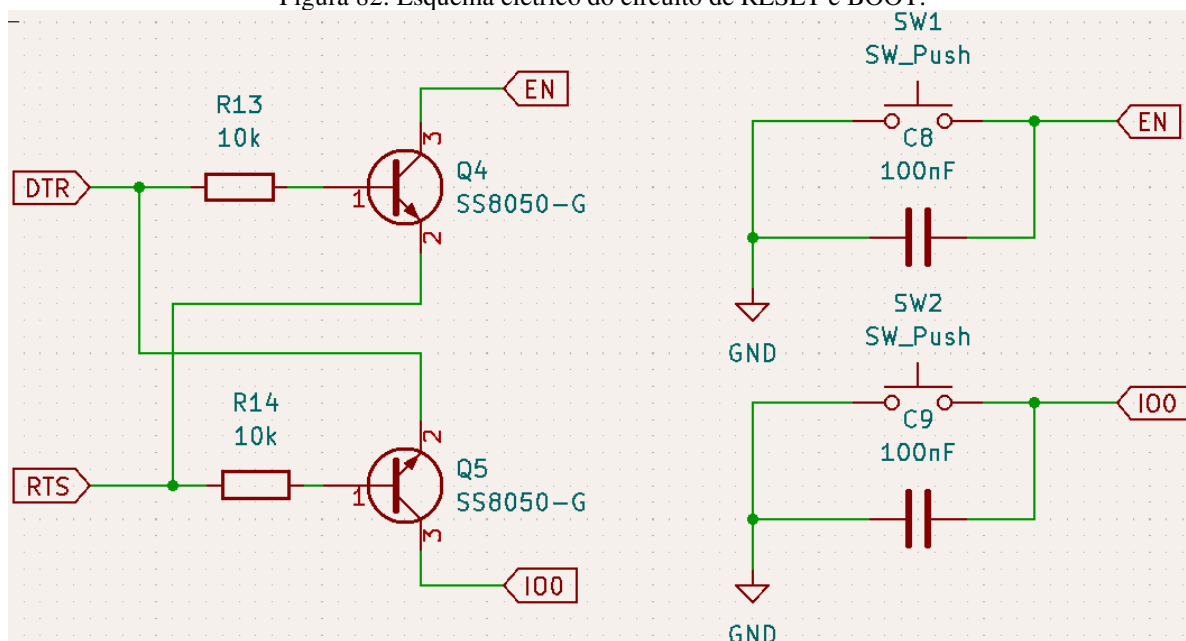
Ambos os botões são configurados como PULL UP, tendo o seu nível lógico zerado quando pressionado, ativando a sua funcionalidade. Que no caso do botão RESET, reinicia o módulo ESP32 WROOM e o botão de BOOT, permite a gravação de *firmware*. Ambos os botões contam com capacitores (C8 e C9) para *debouncing*, eliminando o efeito de *bouncing* ao pressionar o botão. Já o circuito composto pelos componentes R13, R14, Q4 e Q5 é responsável por controlar o nível lógico dos pinos EN e IO0, permitindo que um *firmware* seja gravado sem a necessidade do pressionamento dos botões.

Figura 81: Esquema elétrico do módulo ESP32 WROOM.



Fonte: Autor.

Figura 82: Esquema elétrico do circuito de RESET e BOOT.



Fonte: Autor.

4.3.4 Circuito dos Sensores

O circuito dos sensores não é apenas um circuito, mas um conjunto entre vários circuitos elétricos e circuitos integrados de sensores, que podem ou não compartilhar do mesmo

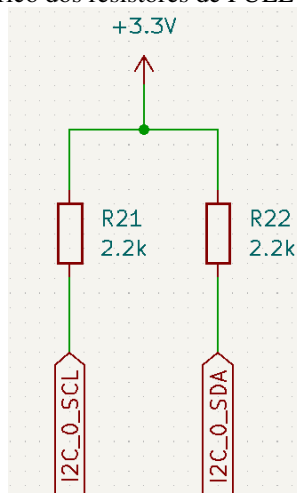
barramento de comunicação. Diferindo cada circuito pelo tipo do sensor e acoplamento dos componentes, onde cada sensor possui um circuito especial e acoplamento típico de componentes para seu funcionamento.

O objetivo dos circuitos dos sensores é garantir o condicionamento da alimentação, ligação no barramento de comunicação e ligação típica dos componentes de acordo com cada sensor.

Para o sensoriamento, foi escolhido os circuitos integrados MPU6050, QMC5883L e DPS310, ambos bastantes comuns e já consolidados quanto a usabilidade e precisão, tendo uma grande variedade de recursos e configurações. Além disso, todos os CIs escolhidos possuem suporte a interface de comunicação I2C, facilitando no desenvolvimento, pois podem operar no mesmo barramento de comunicação.

A Figura 83 abaixo exhibe o esquema elétrico do barramento I2C de número 0, criado para a interconexão de todos os sensores inclusos no projeto. O barramento opera com dois resistores de PULL UP, estes que são necessários conforme dita o manual de referência de cada CI. Apesar dos manuais de referência divergirem um pouco dos valores desses resistores, um valor próximo aos sugeridos foi escolhido, este que é geralmente o valor mais visto nos circuitos de barramento de comunicação I2C.

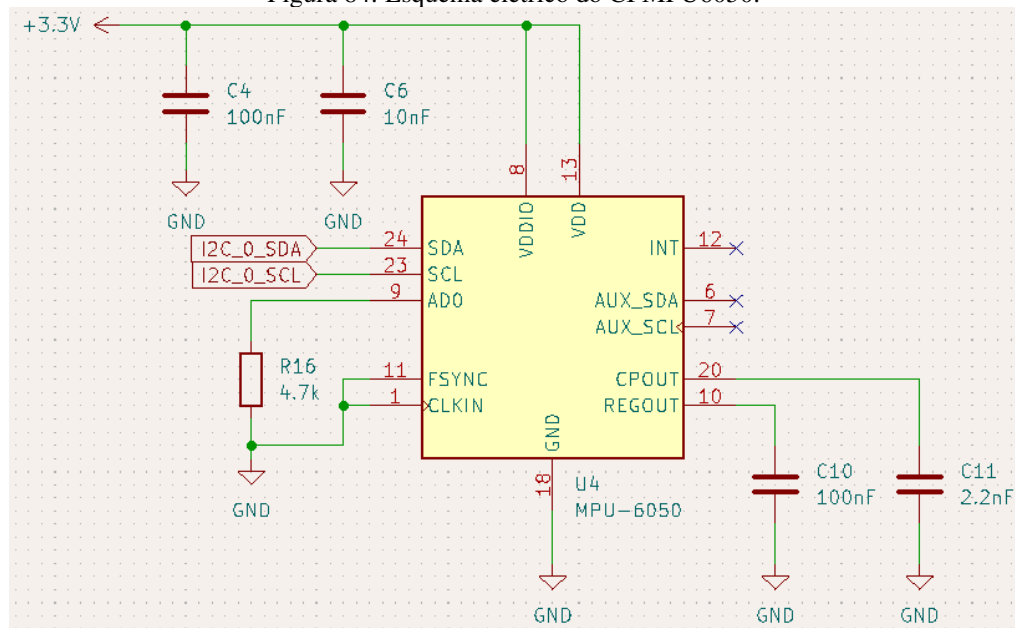
Figura 83: Esquema elétrico dos resistores de PULL UP do barramento I2C_0.



Fonte: Autor.

O MPU6050 é um circuito integrado que contém num único chip um acelerômetro e um giroscópio, ambos de 3 eixos, totalizando 6 graus de liberdade ou 6 DOF. Além disso, este CI conta com um sensor de temperatura que permite uma aferição num *range* de -40 a +85 °C. Seu esquema elétrico foi elaborado por meio do seu manual de referência, este que informa todos os componentes necessários para o seu funcionamento e diagrama de conexões. Resultando no esquema elétrico na Figura 84.

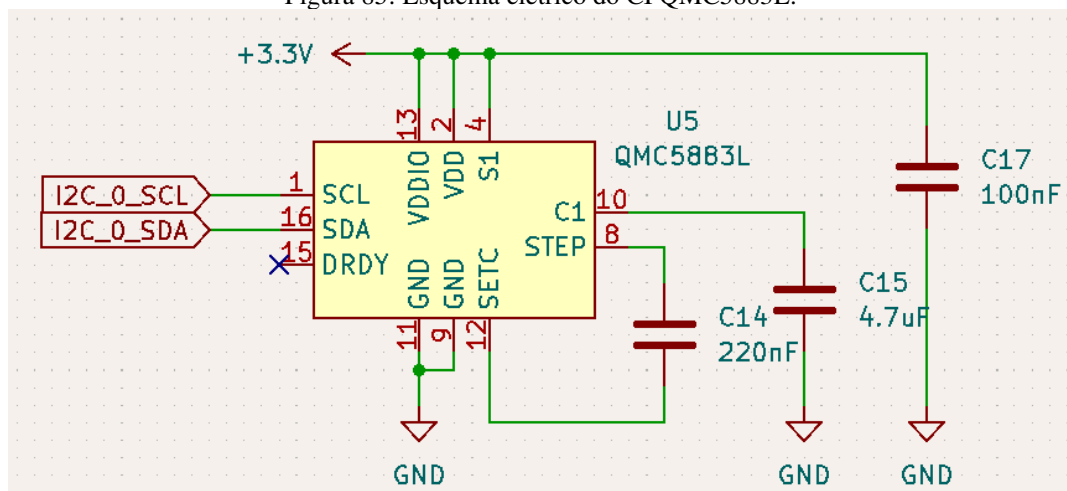
Figura 84: Esquema elétrico do CI MPU6050.



Fonte: Autor.

O QMC5883L é um sensor magnético de três eixos voltado para aplicações de alta precisão, tal como bússola, navegação, robô, *drones* e dispositivos portáteis pessoais. Se somado com o CI MPU6050 apresentado anteriormente de 6 DOF, os dois juntos são capazes de proporcionar 9 graus de liberdade ou 9 DOF. Seu esquema elétrico também foi tirado como base de seu manual de referência, este que define a quantidade, valores e ligações dos componentes. Seu manual pode ser obtido na Internet buscando pelo seu *part number*. A Figura 85 abaixo exhibe o esquema elétrico elaborado para o sensor.

Figura 85: Esquema elétrico do CI QMC5883L.

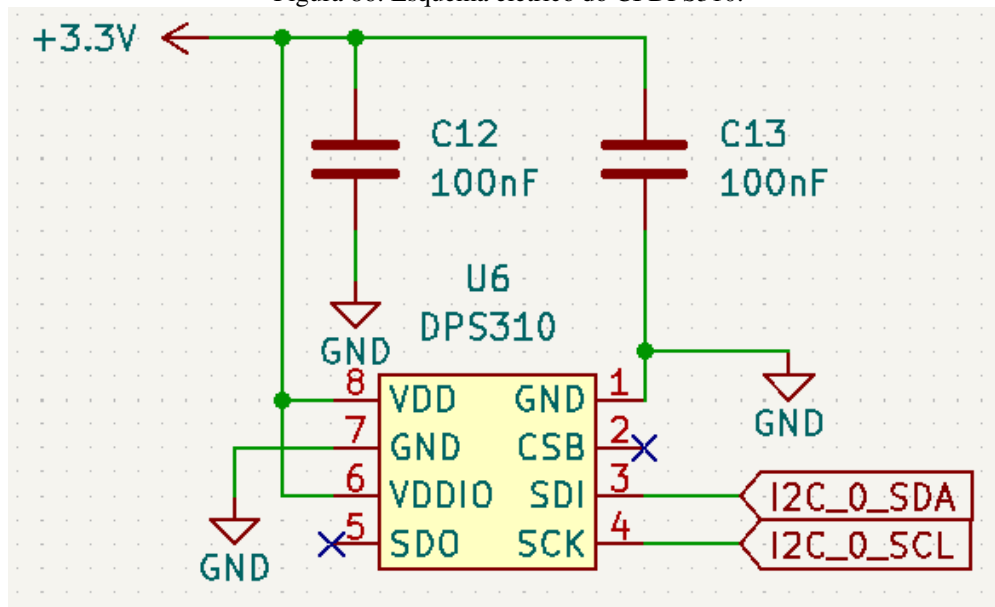


Fonte: Autor.

O DPS310 é um sensor de pressão de ar barométrico digital miniaturizado com alta precisão e um baixo consumo de corrente, capaz de medir pressão e temperatura. Assim como os outros sensores, seu circuito também foi elaborado baseado em seu esquema típico de ligação

que pode ser encontrado no seu manual de referência. Na Figura 86 é possível ver seu esquema elétrico completo.

Figura 86: Esquema elétrico do CI DPS310.



Fonte: Autor.

4.3.5 Circuito dos Motores

O circuito dos motores assim como o circuito anterior é um conjunto de vários circuitos, sendo 4 no total e um para cada motor. Cada circuito é responsável pela entrega individual de potência a um motor, potência que é traduzida do sinal PWM gerado pelo microcontrolador. A variação da potência implica diretamente na rotação do motor, onde à medida que a potência aumenta, a velocidade de rotação também aumenta de forma quase proporcional.

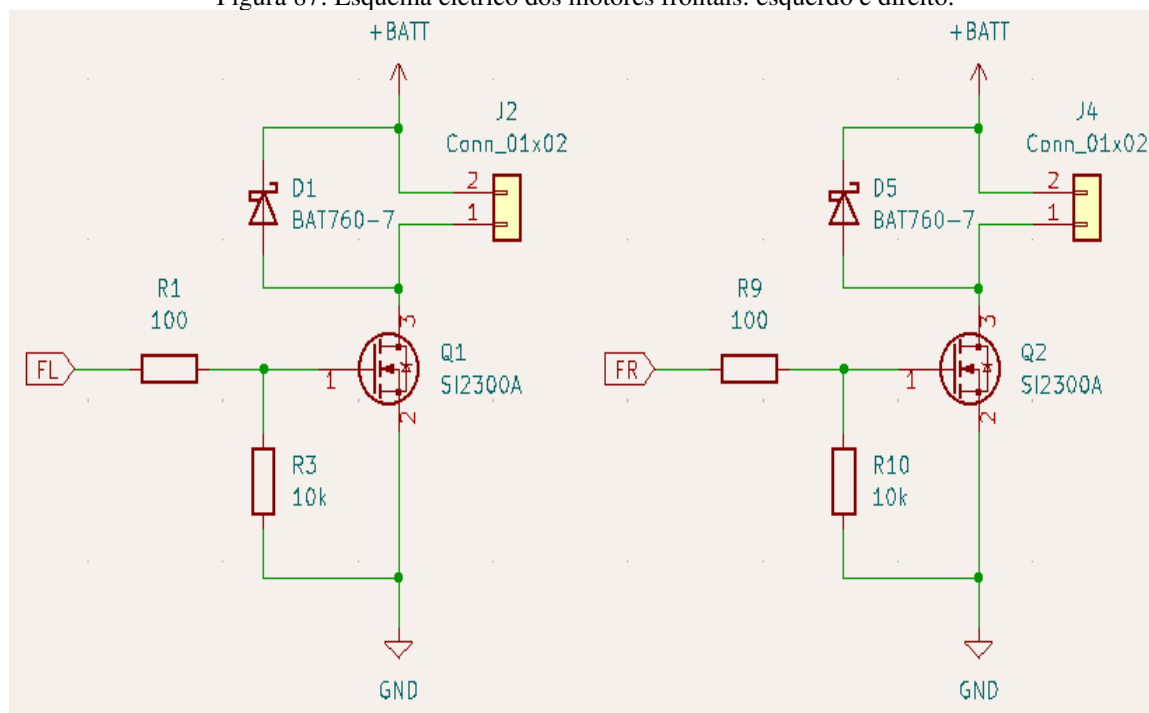
Este circuito tem como o objetivo transferir a potência de maneira individual para cada motor, controlando assim, a sua rotação.

Por ser um *drone* pequeno e focado em ter um baixo custo, a melhor solução de motorização e a escolhida para o projeto foram os motores com escova, visto que apresentam um circuito de acionamento simplificado e sem a necessidade de um controlador dedicado para cada motor. O controle de velocidade é realizado por meio do sinal PWM que é gerado pelo microcontrolador, e em termos eletrônicos este controle é baseado no chaveamento dos MOSFETs de potência Q1 e Q2 na Figura 87, que tem sua saturação manipulada.

Tendo um nível lógico alto em seu GATE, a resistência entre o DRENO e SOURCE é muito pequena e próximo de zero, fechando o circuito de alimentação do motor que consequentemente é acionado. Com nível lógico baixo em seu GATE, a resistência entre o DRENO e o SOURCE é alta, de tal forma a ser enxergada como um circuito aberto, desfazendo

assim a ligação do motor que consequentemente será desligado. Desta forma, uma comutação entre os estados do GATE do MOSFET de forma rápida tal como um sinal PWM, pode ser convertida em entrega de potência ao motor.

Figura 87: Esquema elétrico dos motores frontais: esquerdo e direito.

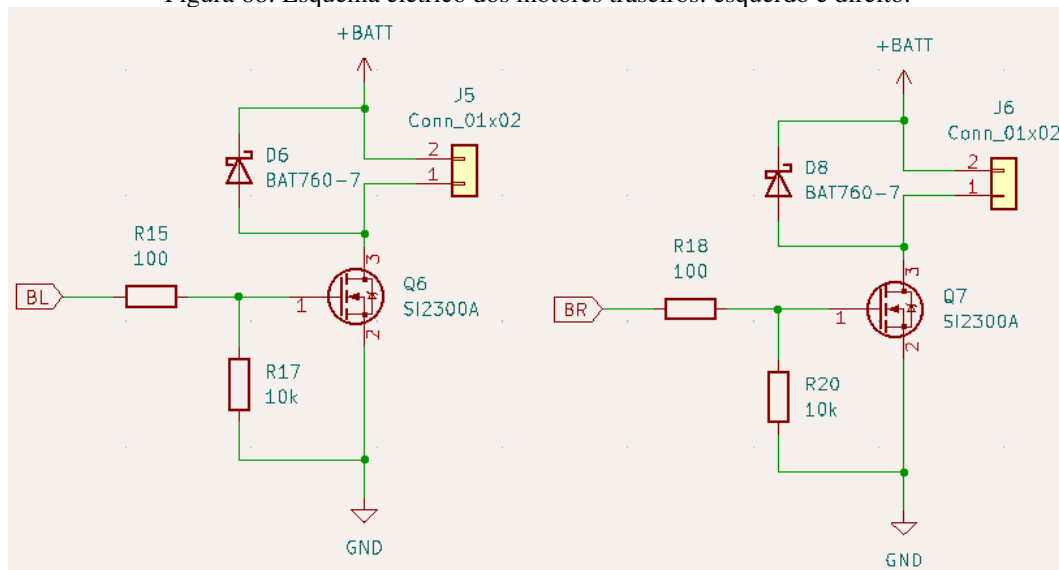


Fonte: Autor.

Na Figura 87, os resistores R3 e R10 são resistores de PULL DOWN, e responsáveis por eliminar a flutuação de tensão quando o nível lógico do sinal PWM é baixo. Já os resistores R1 e R9, são opcionais e atuam como limitadores de corrente, limitando a máxima corrente de pico que acontece num curto intervalo de tempo (ordem de microssegundos) entre as transições de nível no sinal PWM. Enquanto os diodos D1 e D5, são responsáveis por eliminar ruídos de alta tensão que são gerados por cargas de indução, evitando uma possível interferência ou mesmo queima de algum circuito e os designadores J2 e J4 são os conectores para ligação com os motores.

O circuito dos demais motores exibido na Figura 88 segue o mesmo esquema de ligação, tendo apenas os designadores dos componentes e o pino do sinal de PWM alterados. Os pinos de PWM de controle dos motores foram nomeados como: *Front Left* – FL, *Front Right* – FR, *Back Left* – BL e *Back Right* – BR. Sendo respectivamente os motores frontais: esquerdo e direito e motores traseiros: esquerdo e direito.

Figura 88: Esquema elétrico dos motores traseiros: esquerdo e direito.



Fonte: Autor.

Um ponto importante neste circuito foi a definição do MOSFET, este que foi escolhido visando o suporte a pelo menos o dobro da corrente máxima testada por um dos maiores motores que a placa oferecerá o suporte. No caso o motor de tamanho 8520, este que com carga (hélice bi pá de 55 mm) teve um consumo máximo próximo de 3 A nos testes realizados em trabalhos anteriores quando alimentado com uma tensão de 4 V. Portanto, o MOSFET escolhido de referência SI2300A suporta uma corrente de no máximo 6 A de modo contínuo, dando uma folga extra para o circuito de potência, uma vez que não irá ser danificado com uma carga maior sendo puxada pelo motor, tal como uma hélice de diâmetro maior ou mesmo uma com um número maior de pás.

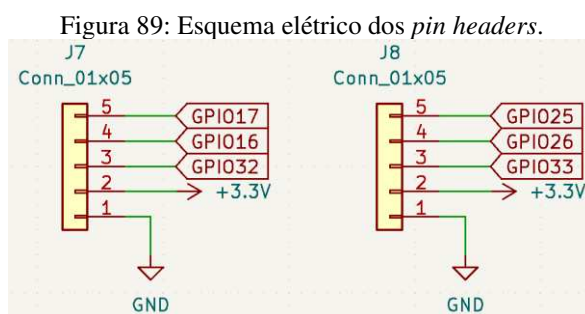
4.3.6 Circuitos dos *Pin Headers*

O circuito dos *pin headers*, visa interligar os pinos escolhidos para externalização do microcontrolador e de alimentação para o acesso por meio dos *sockets* de expansão. Possibilitando o uso de módulos de expansão pelo usuário.

Esse circuito tem como objetivo externalizar os pinos escolhidos para o *socket* de expansão. Foi criado pensando na modularização do projeto, para que possa ser capaz de oferecer o suporte à adição de placas com diferentes configurações ao projeto. Na qual, destaca-se a placa de desenvolvimento que possui a maior quantidade de pinos e recursos. Para isso, foram escolhidos com bastante reflexão cada pino a ser externalizado para uso com os módulos, visando dar o suporte ao máximo possível à todas as interfaces de comunicação.

Os pinos definidos foram os GPIOs 16, 17, 25, 26, 32 e 33, onde todos os pinos suportam PWM e interface de comunicação I2C. Além disso, os GPIOs 16 e 17 provém comunicação

UART, GPIOs 25 e 26 provém canais de DAC e ADC e por último os GPIOs 32 e 33 que também provém canais de ADC. Além dos recursos dos pinos, foram criados em cada *pin header*, pontos de alimentação. A Figura 89 abaixo exhibe o esquema elaborado para o circuito dos *pin headers*.



Fonte: Autor.

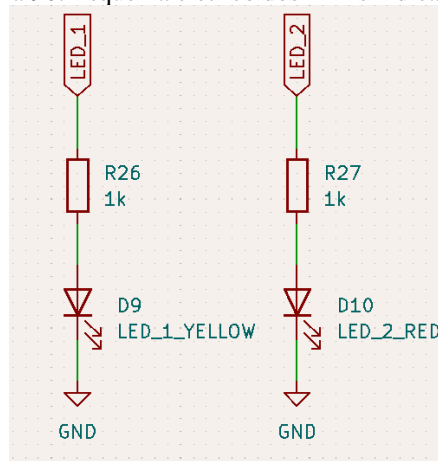
4.3.7 Circuito dos LEDs

O circuito dos LEDs visa condicionar os sinais dos pinos do microcontrolador limitando a corrente que circulará pelo diodo LED quando for acionado. Evitando uma possível queima da saída do microcontrolador ou mesmo do LED.

O objetivo deste circuito é limitar a corrente passante em cada LED.

Foi pensado em indicadores visuais para a placa, e, portanto, foram criados dois circuitos com LEDs como mostra Figura 90. Sendo cada um ligado a um GPIO do ESP32, estes que poderão ter seu controle de luminosidade feito por *firmware*, dando ao usuário a flexibilidade de criar regras personalizadas para o funcionamento individual de cada LED. Os resistores R26 e R27 foram inseridos para limitar a corrente dos LEDs e não deixar que extrapolem o limite máximo de fornecimento de corrente de cada pino que é de 6 mA.

Figura 90: Esquema elétrico dos LEDs indicadores.



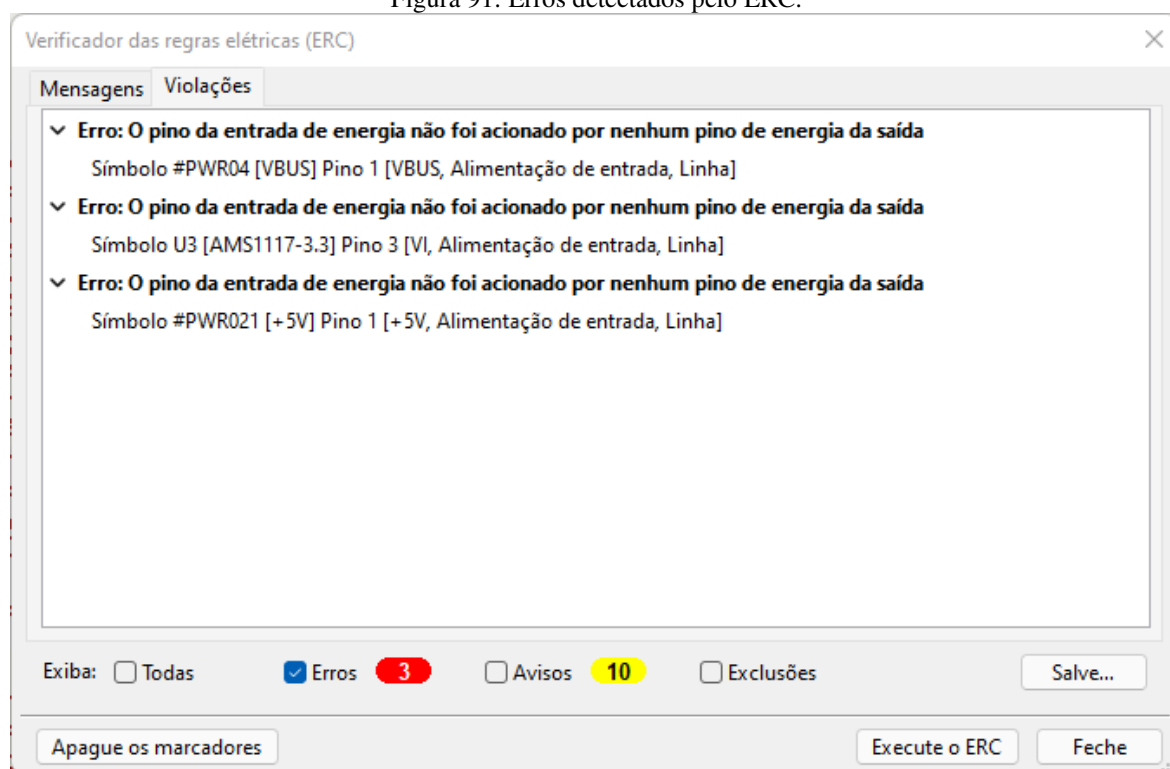
Fonte: Autor.

Tendo terminado a elaboração do último circuito, deve ser executada a primeira checagem elétrica por meio da ferramenta de ERC, e seus erros corrigidos e avisos analisados, de forma a não passar nenhum detalhe em branco.

4.3.8 Checagem de Erros ERC

Com a execução do ERC foram encontrados alguns erros e avisos relacionados ao esquema elétrico do projeto, estes que são exibidos na Figura 91 abaixo. Os erros indicam que o pino de entrada de energia não foi acionado por nenhum pino de energia de saída, erro comum e já conhecido no KiCad. Esse erro acontece quando se tem um pino definido como entrada de energia e que não está conectado a um pino de saída de energia, o ERC reclama que o pino não é acionado. O que significa que não foi passado para o circuito de onde ele estará recebendo esta energia, e para solucionar este erro, basta adicionar uma PWR_FLAG em cada circuito onde foi apontado o erro.

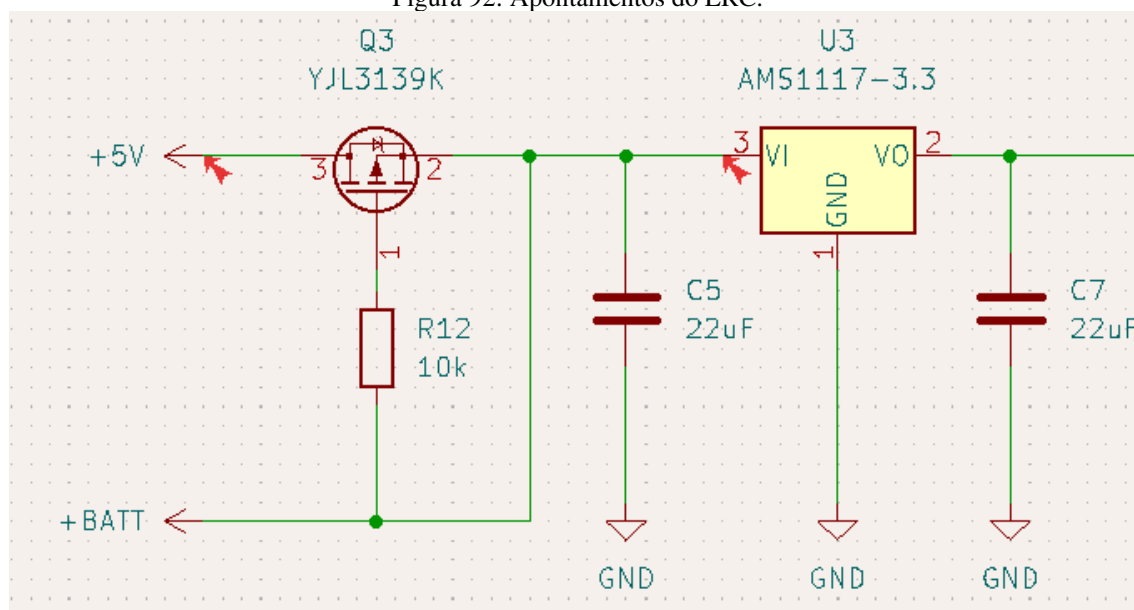
Figura 91: Erros detectados pelo ERC.



Fonte: Autor.

Na Figura 92 pode ser visto dois dos 3 apontamentos, e onde deverão ser inseridos as PWR_FLAGS.

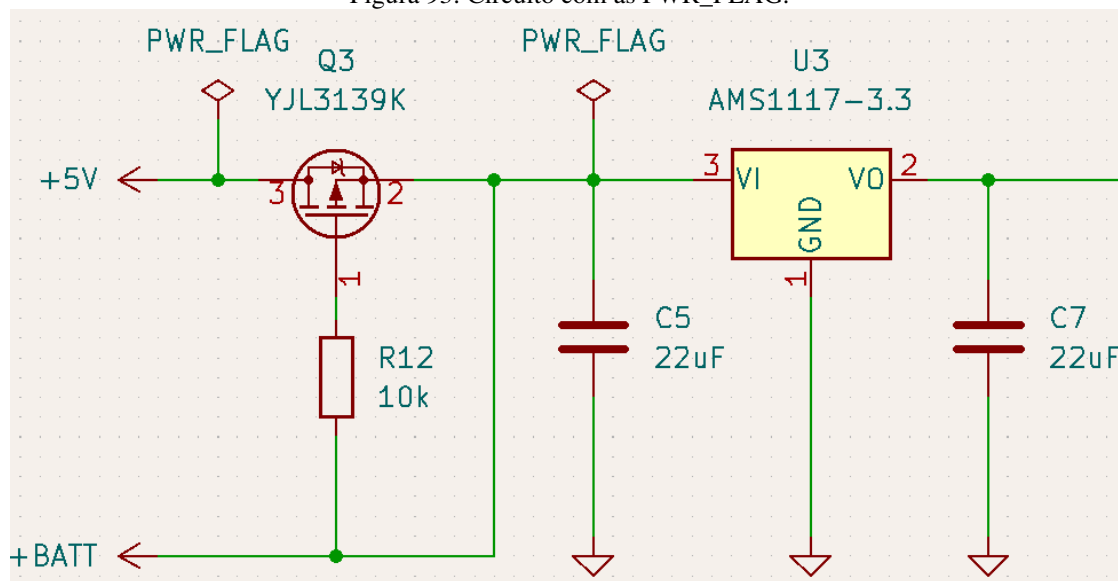
Figura 92: Apontamentos do ERC.



Fonte: Autor.

Na Figura 93, pode ser visto o mesmo circuito, porém com as PWR_FLAGS inseridas.

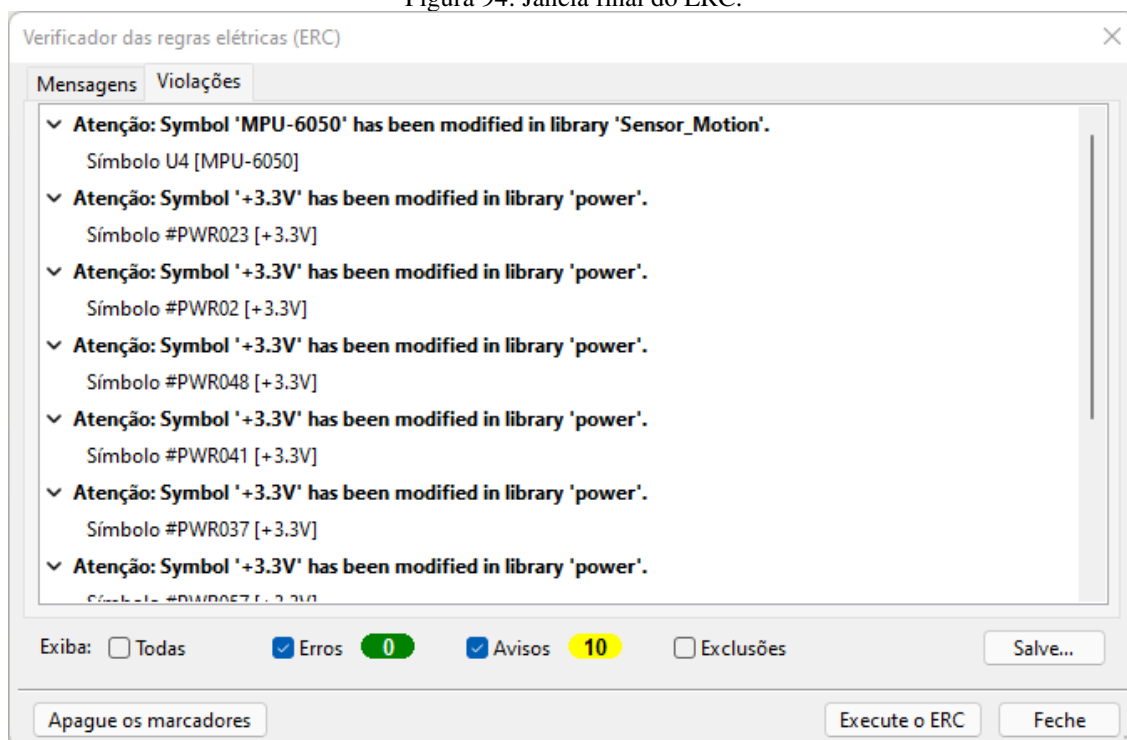
Figura 93: Circuito com as PWR_FLAG.



Fonte: Autor.

Como pode ser visto na Figura 94, com a inserção das PWR_FLAGS os erros desapareceram e sobraram apenas os avisos, estes que foram pesquisados na Internet e encontrou-se um tópico no fórum do KiCad sobre este problema, o qual se trata de um bug e que já foi reportado. O link para acesso ao fórum e detalhes do problema pode ser encontrado em [65].

Figura 94: Janela final do ERC.



Fonte: Autor.

Por se tratar de um bug, todos os avisos que cuja mensagem são “*has been modified in library '#####'*” foram ignorados, e como todos os avisos relatados se tratavam justamente do bug. Seguiu-se adiante com o desenvolvimento, tendo a etapa de projeto elétrico finalizada. O esquemático completo com todos os circuitos aqui desenvolvidos, pode ser encontrado no apêndice A deste trabalho.

4.4 LAYOUT DA PCI

Antes de iniciar o *design* do *layout* da PCI, deve-se garantir de ter realizado a checagem de ERC e que os erros levantados foram corrigidos, além de ter realizada a checagem da correta atribuição dos *footprints* dos componentes escolhidos. Passo de grande importância, pois é um tipo de erro que nenhuma checagem cobre. E somente são descobertos quando todo o processo de desenvolvimento foi concluído e a PCI está no processo de montagem, resultando num grande desperdício de tempo e recursos.

O processo de design do layout da PCI desenvolvido aqui é altamente criativo e individual, podendo ser feito de diversas maneiras e modos, e, portanto, será descrito os passos e mostrado os resultados ou o que se espera ter como resultado.

4.4.1 Configurando o PCI

O primeiro passo para o layout da PCI é definir as suas configurações, estas que devem estar de acordo com as especificações do projeto e da empresa que realizará sua fabricação e em alguns casos a sua montagem. No editor da PCI do KiCad e em menu arquivo e configurações da placa é possível entrar com as especificações, onde na janela aberta foi configurado primeiramente a quantidade de camadas de cobre e o empilhamento físico definindo a espessura tanto do cobre quanto do dielétrico entre as camadas. Para esse projeto o número de 4 camadas seria o suficiente e foi definido baseado nas experiências adquiridas no desenvolvimento de outros projetos.

Enquanto que para a espessura da PCI, manteve-se o padrão de 1,6 mm, variando apenas a espessura do cobre da primeira e da última camada para 0,07 mm ou 2 oz. A espessura de 2 oz para as duas camadas foi atribuída tendo a intenção de utilizar essas camadas como planos de alimentação. E garantir uma boa taxa de transferência de energia, pois serão utilizadas para alimentar os 4 motores e demais circuitos. Abaixo na Figura 95, pode ser visto a janela de configuração da placa com as especificações mencionadas inseridas.

Figura 95: Janela de configuração da PCI no KiCad.

The screenshot shows the 'Camadas com cobre' (Copper Layers) configuration window in KiCad. The 'Camadas com cobre' dropdown is set to 4. The 'Impedância controlada' (Controlled Impedance) checkbox is unchecked. The 'Adiciona uma camada dielétrica' (Add a dielectric layer) button is visible. The table below lists the layers and their properties:

Camada	Id	Tipo	Material	Espessura	Colorido	Épsilon R	Perda da Tan
F.Silkscreen		Serigrafia da parte de cima	Jão especificado		Branco		
F.Paste		Pasta de solda da parte de baixo					
F.Mask		Máscara de solda da parte de cima	Jão especificado	0,01 mm	Verde	3,3	0
F.Cu		Cobre		0,07 mm			
Dielétrico 1		Núcleo	FR4	0,468666 mm		4,5	0,02
In1.Cu		Cobre		0,017 mm			
Dielétrico 2		PrePreg	FR4	0,468666 mm		4,5	0,02
In2.Cu		Cobre		0,017 mm			
Dielétrico 3		Núcleo	FR4	0,468666 mm		4,5	0,02
B.Cu		Cobre		0,07 mm			
B.Mask		Máscara de solda da parte de baixo	Jão especificado	0,01 mm	Verde	3,3	0
B.Paste		Pasta de solda da parte de baixo					
B.Silkscreen		Serigrafia da parte de baixo	Jão especificado		Branco		

At the bottom, the 'Espessura do empilhamento da placa' (Board stackup thickness) is set to 1,599998 mm, and the 'Ajuste a espessura dielétrica' (Adjust dielectric thickness) button is visible.

Fonte: Autor.

Na mesma janela e em Regras de Desenho e Restrições, foram adicionadas as especificações vistas no tópico 4.1.1 que são as especificações mínimas de DFM. Abaixo na Figura 96 pode ser visto a configuração realizada.

Figura 96: Inserção dos requisitos de DFM.

Recursos permitidos

☐ Permite as vias cegas/encobertas

☒ Permite as micro vias (µVias)

Arco/círculo aproximado por segmentos

Desvio máximo permitido: mm

Nota: o preenchimento da zona pode ser lento quando < 0,005 mm.

Estratégia do preenchimento da zona

☐ Comportamento mimico legado

☒ Polígonos suavizados (melhor desempenho)

☐ Permite filetes fora do contorno da zona

Ajuste do comprimento

☒ Inclua a altura do empilhamento nos cálculos do comprimento da trilha

Cobre

Isolamento mínimo:

mm

Largura mínima de trilha:

mm

Largura anular mínima:

mm

Diâmetro mínimo da via:

mm

Isolamento entre o furo e o cobre:

mm

Isolamento entre a borda e o cobre:

mm

Furos

Furo passante mínimo:

mm

Isolamento do furo a furo:

mm

µVias

Diâmetro mínimo da µVia:

mm

Furo mínimo da µVia:

mm

Fonte: Autor.

Para facilitar no design do layout, foram definidos alguns tamanhos para a largura das trilhas e vias, estas que podem ser vistas na Figura 97 abaixo.

Figura 97: Predefinição do tamanho de trilhas e vias.

Dimensões de trilha e via pré-definidas:

Trilhas

Largura
0,2 mm
2 mm
4 mm

Vias

Dimensão	Furo
0,6 mm	0,2 mm
0,8 mm	0,4 mm

Pares Diferenciais

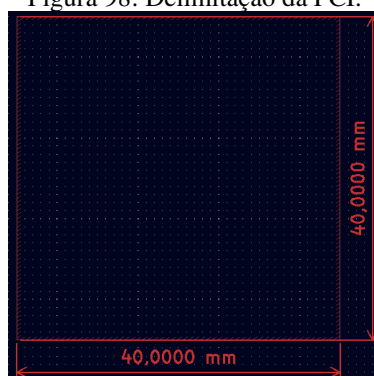
Largura	Lacuna	Espaçamento de Via
---------	--------	--------------------

Fonte: Autor.

4.4.2 Delimitação da PCI e Posicionamento dos Componentes

Com as configurações inseridas, pode-se iniciar de fato o design do layout, este que se inicia com a delimitação do tamanho da placa de circuito impresso, onde neste caso estipulou-se um valor para o tamanho da placa de 40 x 40 mm. E sua borda foi então traçada delimitando toda a região da placa de circuito, estando pronta para ser sobreposta com todos os componentes e circuitos integrados. A Figura 98 exhibe a delimitação da região da PCI.

Figura 98: Delimitação da PCI.



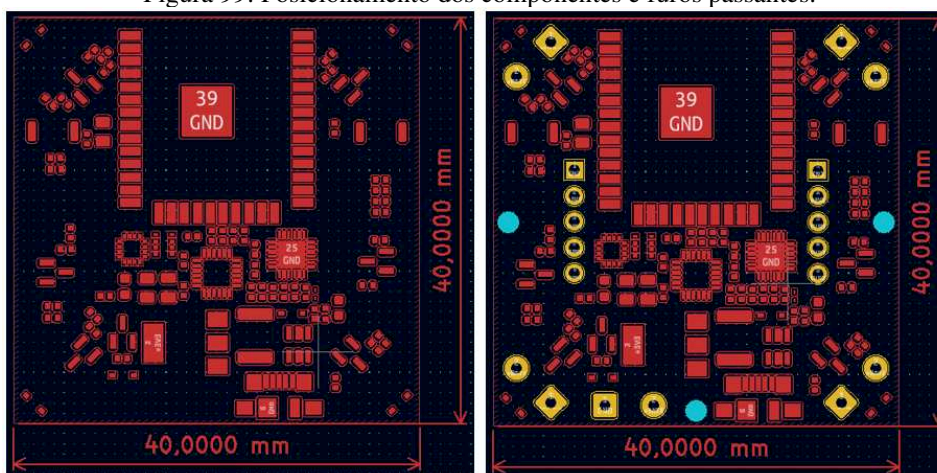
Fonte: Autor.

Com a delimitação da PCI, pode ser feito o posicionamento dos componentes, este que é um processo que pode ser feito de inúmeras formas e então como mencionado anteriormente, será apenas mencionado o que se espera obter como resultado. Onde neste caso é esperado que todos os componentes de montagem de superfície estejam sobrepostos na placa de circuito.

Possuindo lugares estratégicos pensados e separados para a inserção dos conectores de furos passantes e furos para encaixe da placa de circuito na estrutura ou *frame*. Além disso, vale ressaltar a leitura e da adoção das sugestões do manual de referência para o *design* de *hardware* do ESP32 WROOM [66]. Onde existe sugestões de posicionamento do módulo na placa de circuito impresso visando o mínimo de interferência da PCI na antena do módulo.

Na Figura 99 abaixo, em amarelo e em cada borda da placa estão um par de pinos para a ligação dos motores, enquanto que os pinos amarelos no centro da placa são os pinos destinados a conexão com módulos externos, e o último par de pinos amarelos são os conectores para bateria. Os círculos azuis, representam um furo na placa, este destinado ao encaixe da placa em seu *frame*.

Figura 99: Posicionamento dos componentes e furos passantes.



Fonte: Autor.

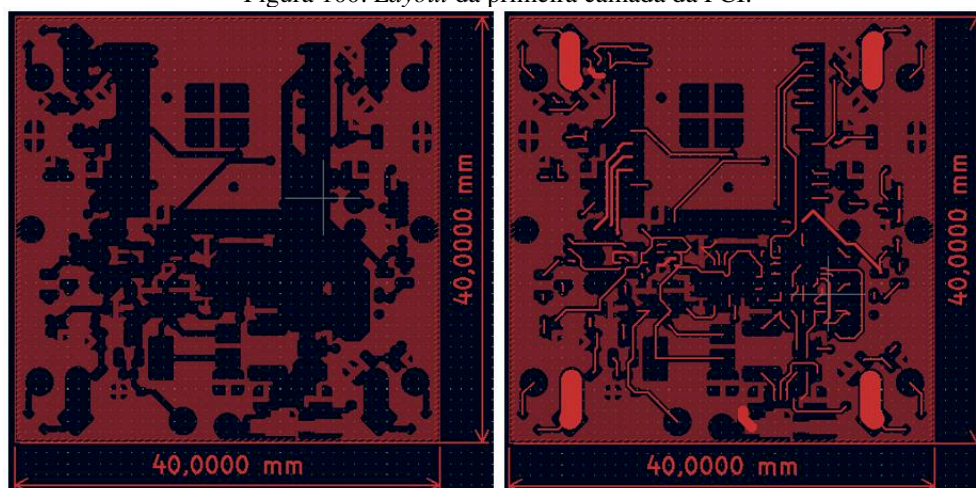
4.4.3 Roteamento

Com todos os componentes posicionados na placa foi iniciado o processo de roteamento, este que foi realizado inteiramente de forma manual, tendo o controle total de cada trilha, definindo as melhores estratégias de contorno entre os vários caminhos possíveis e nunca realizando curvas de mais de 45° .

4.4.3.1 Primeira Camada

A primeira camada da placa teve seu plano inteiramente conectado ao terminal terra, eliminando desta forma as trilhas entre o terminal terra dos componentes ao GND, tendo como resultado a Figura 100 abaixo. Onde pode ser visto ao lado esquerdo o plano de terra e ao lado direito o plano de terra e as trilhas interligando cada circuito.

Figura 100: *Layout da primeira camada da PCI.*

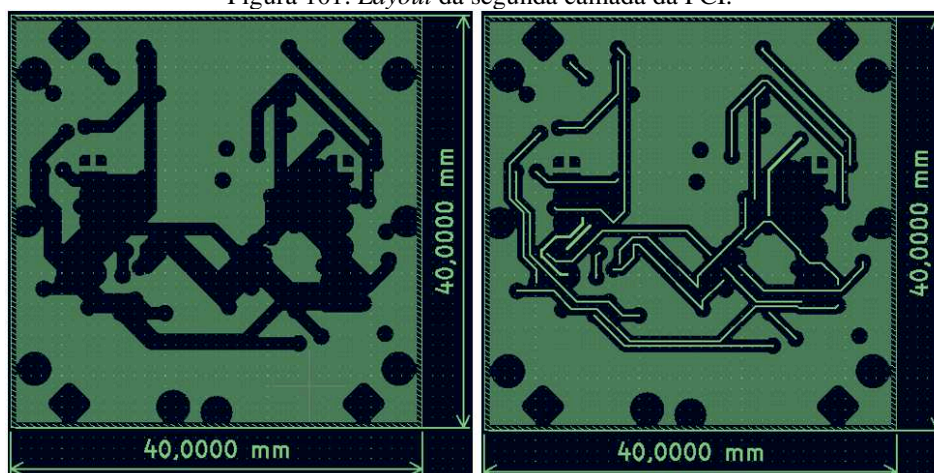


Fonte: Autor.

As trilhas que cuja espessura é significativamente maior, foi desenhada para suportar uma corrente máxima de 6 A em cada conexão do motor, que é algo improvável de acontecer. Porém garante uma faixa extra de segurança para a placa de circuito impresso, além de estar alinhada com a escolha do MOSFET visto no tópico 4.3.5.

4.4.3.2 Segunda Camada

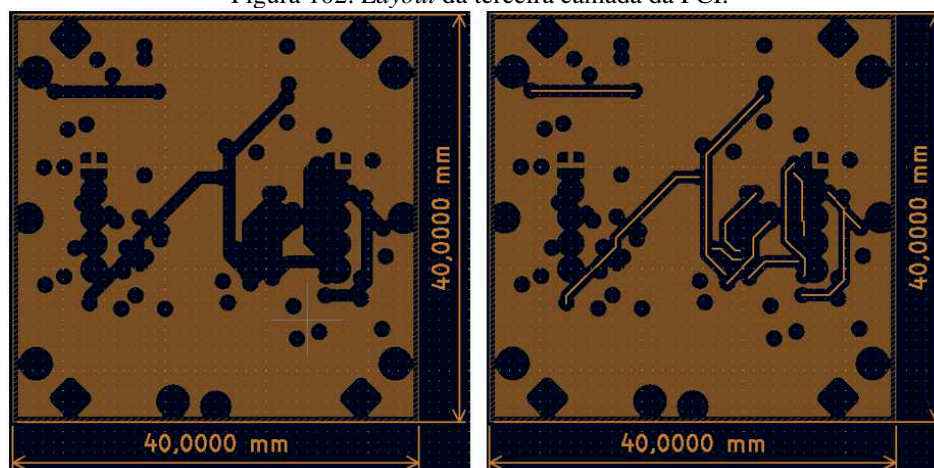
A segunda camada, Figura 101, assim como a primeira, também foi conectada ao terminal terra do circuito. Decisão tomada devido ao fato da primeira camada ter sido muito reduzida por conta do roteamento das trilhas. Tal redução fez com que o plano de terra não cobrisse determinadas áreas, sendo necessário o uso de vias para garantir o preenchimento de cada zona ou conexão.

Figura 101: *Layout* da segunda camada da PCI.

Fonte: Autor.

4.4.3.3 Terceira Camada

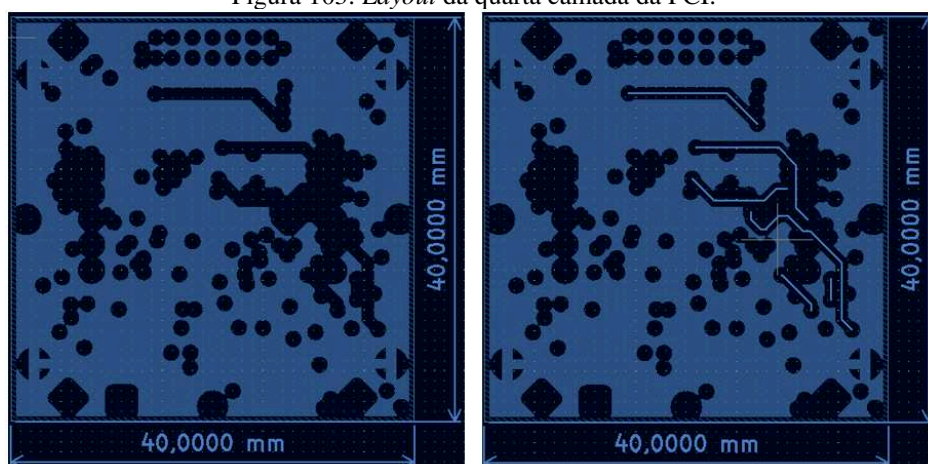
Assim como a segunda camada, a terceira também foi conectada ao terminal terra do circuito devido o mesmo motivo. Na Figura 102, fica mais perceptível enxergar os vários furos no plano, estes que são as vias inseridas, interligando as trilhas de um plano a outro, ou mesmo ligação entre planos.

Figura 102: *Layout* da terceira camada da PCI.

Fonte: Autor.

4.4.3.4 Quarta Camada

A quarta camada, Figura 103, foi interligada ao plano de alimentação da bateria, esta que ficou bastante livre e com pouco roteamento de trilhas. Portanto, não houve a necessidade de usar mais de um plano para cobrir toda a extensão da placa.

Figura 103: *Layout* da quarta camada da PCI.

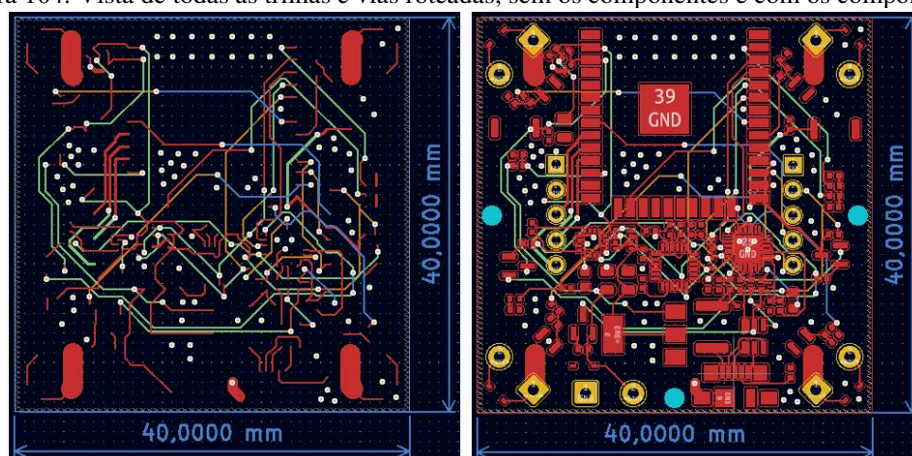
Fonte: Autor.

4.4.3.5 Interconexão entre as Camadas

Para a conexão entre as camadas foram utilizadas as vias, já mencionadas anteriormente. Na Figura 104, é mostrado o layout final das trilhas de todas as camadas sobrepostas e com suas respectivas vias de interconexões.

Além das vias de interconexões de trilhas de um plano para outro, foram inseridas vias conectando os planos, estas que podem ser diferenciadas das demais por não terem nenhuma interconexão com trilhas. Tais vias além de realizarem a interconexão de um plano ao outro garantem que partes da camada de terra que foram impedidas devido a passagem de alguma trilha de se conectar ao terminal terra, sejam conectadas.

Figura 104: Vista de todas as trilhas e vias roteadas, sem os componentes e com os componentes.



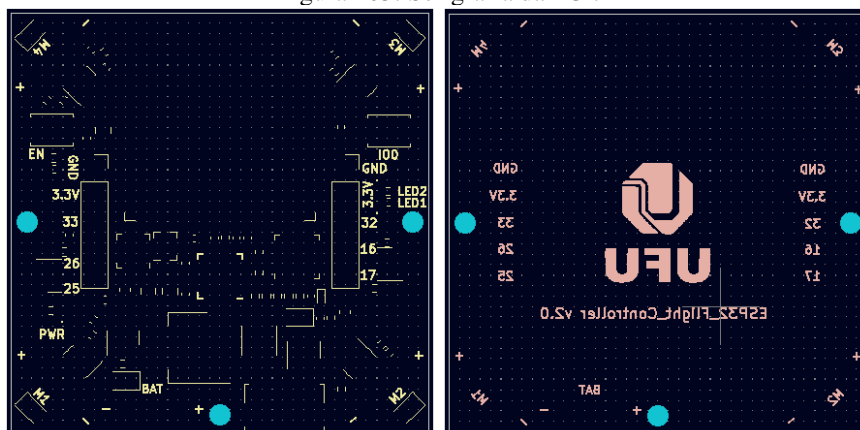
Fonte: Autor.

4.4.3.6 Serigrafia

De forma a facilitar o reconhecimento dos *pinouts* pelo usuário, foram inseridas serigrafias no projeto referenciando cada entrada ou saída do circuito, bem como a polarização

para o caso da conexão de alimentação. Tais modificações podem ser vistas na Figura 105, onde é possível ver a serigrafia do topo da placa e da traseira, esta que foi personalizada incluindo o símbolo da universidade. Também na traseira da placa foi inserido o nome do projeto e atual versão.

Figura 105: Serigrafia da PCI.



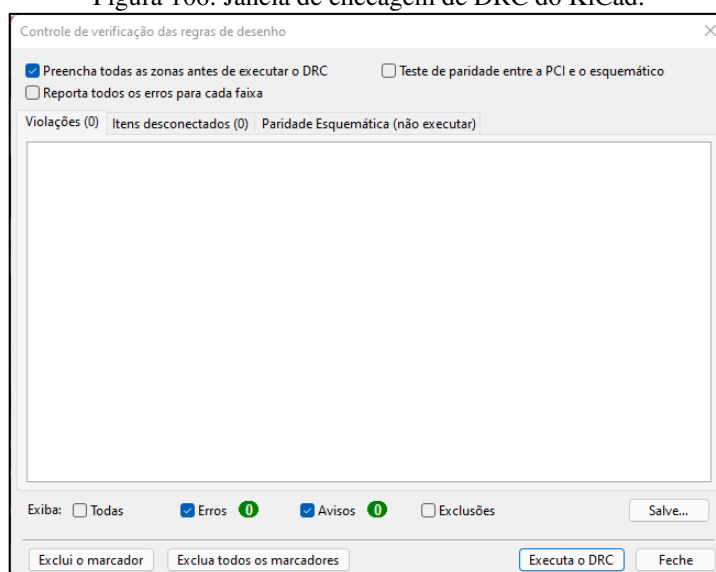
Fonte: Autor.

Tendo terminado a elaboração do *design* do *layout*, deve ser executada a primeira checagem de *design* por meio da ferramenta de DRC, e seus erros corrigidos e avisos analisados, de forma a não passar nenhum detalhe em branco.

4.4.4 Checagem de Erros DRC

Com a execução do DRC não foram encontrados nenhum erro ou aviso, como mostra a Figura 106. Portanto, seguiu-se adiante com o projeto e o resultado final do *design* do *layout* pode ser visto no tópico seguinte.

Figura 106: Janela de checagem de DRC do KiCad.

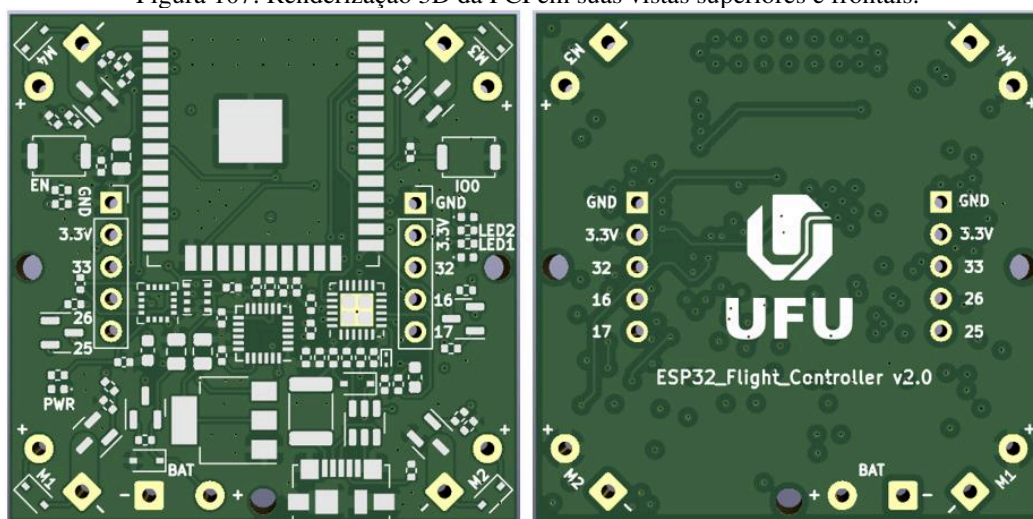


Fonte: Autor.

4.4.5 Layout Final

Aqui é abordado o resultado do desenvolvimento, que é a renderização 3D do modelo da PCI, que pode ser visto na Figura 107, onde a imagem da esquerda representa a vista superior e ao lado a vista inferior.

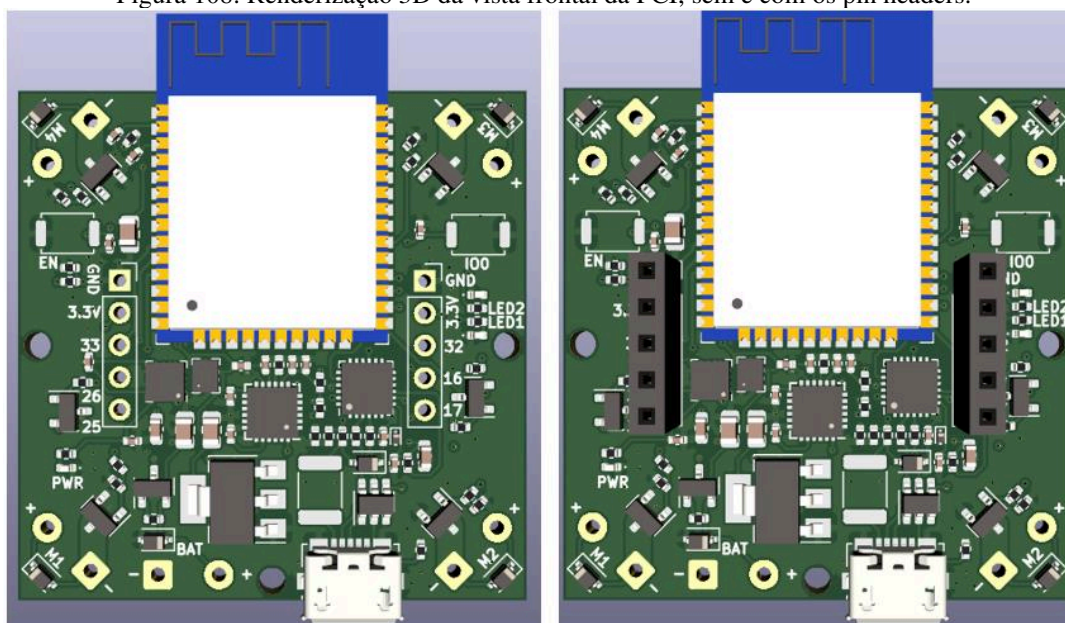
Figura 107: Renderização 3D da PCI em suas vistas superiores e frontais.



Fonte: Autor.

Na Figura 108, pode ser vista a imagem com a inserção dos componentes SMD e ao lado com a inserção da barra de pin header, esta responsável por prover o suporte aos módulos externos.

Figura 108: Renderização 3D da vista frontal da PCI, sem e com os pin headers.



Fonte: Autor.

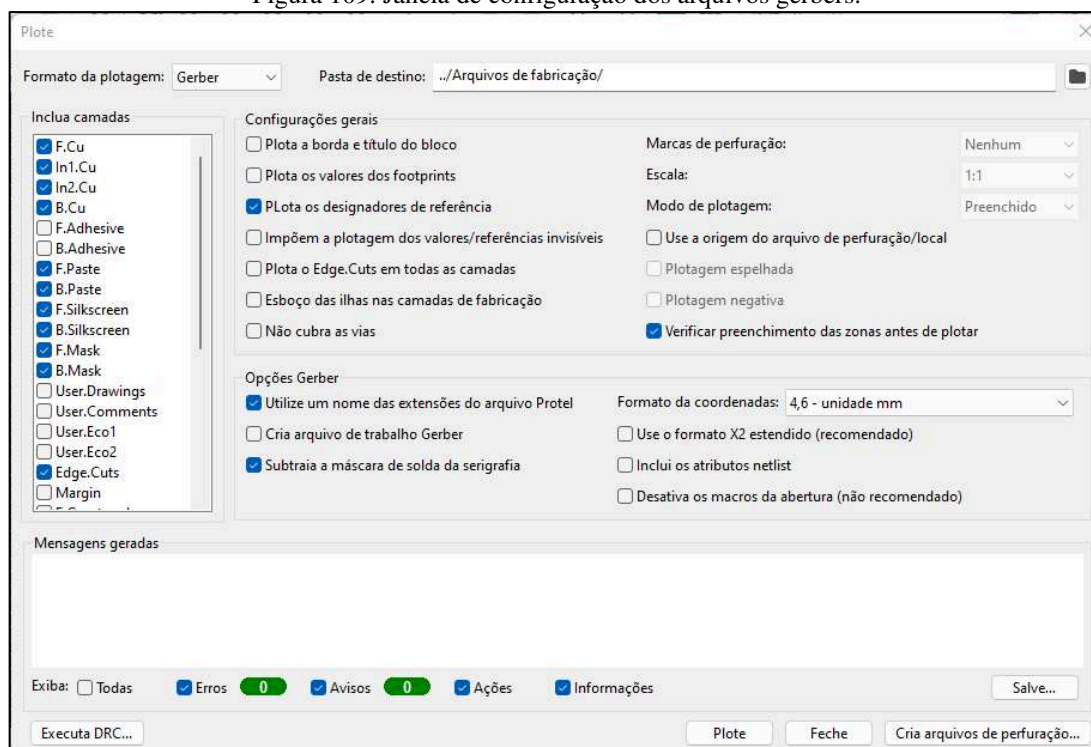
Tendo finalizado o *design* do *layout* e todas as checagens analisadas e corrigidas, pode-se então iniciar a preparação para a geração dos arquivos de fabricação. Etapa que é descrita no tópico seguinte.

4.5 GERAÇÃO DE ARQUIVOS DE FABRICAÇÃO

Nesta etapa é abordado as configurações para a geração dos arquivos necessários para o processo de fabricação da PCI. As configurações podem variar conforme a empresa contratante para a fabricação, onde a maioria dispõe das configurações e como deve ser gerado os arquivos. Para este projeto, todo o processo desde a fabricação da placa de circuito impresso a montagem, a empresa escolhida foi a JLCPCB e, portanto, as configurações utilizadas seguem o seu padrão recomendado. Este padrão e tutorial de como gerar os arquivos pode ser encontrando em [67].

Para a fabricação do PCI são necessários três conjuntos de arquivos, são eles: Arquivos Gerbers, Drill e por último e opcional, mas requerido pelo JLCPCB o mapa de perfuração. Ao seguir o tutorial, deve-se atentar para alguns pontos. Tais como na janela de configuração de geração dos arquivos gerbers, marcar todas as camadas, como no caso do projeto a PCI possui 4 camadas. A janela de configuração deverá ficar como mostra a Figura 109.

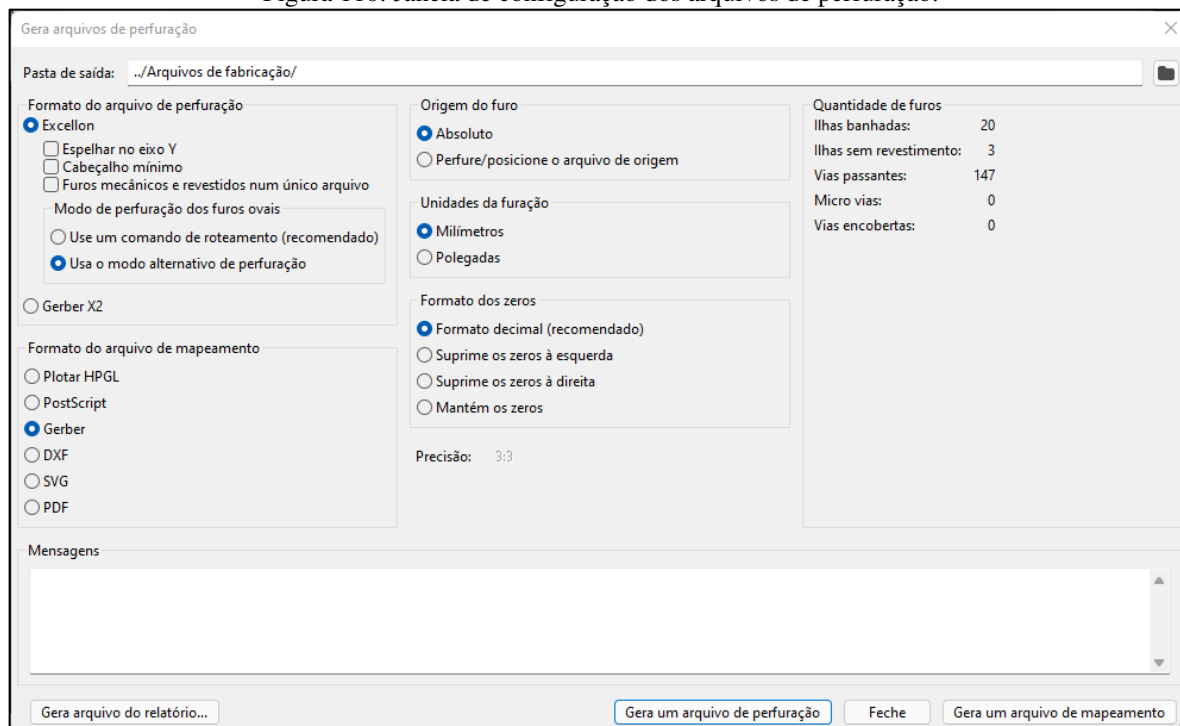
Figura 109: Janela de configuração dos arquivos gerbers.



Fonte: Autor.

Com a janela configurada, podem ser gerados os arquivos gerbers clicando em *plote*. Após a geração dos gerbers, o próximo passo é a geração dos arquivos de perfuração. Esta que pode ser configurada por meio do botão “Criar arquivos de perfuração”. Ao ser clicado, a janela exibida na Figura 110 abaixo é aberta, e a seguinte configuração exibida foi a utilizada para a geração dos arquivos. Configuração que é a mesma requerida pelo tutorial.

Figura 110: Janela de configuração dos arquivos de perfuração.



Fonte: Autor.

Tendo a janela configurada, basta gerar os arquivos de perfuração clicando no botão “Gera um arquivo de perfuração”. Feito isso o próximo passo é a geração do mapa de perfuração, este que pode simplesmente ser gerado clicando no botão “Gera um arquivo de mapeamento” na mesma janela exibida na Figura 110 acima. Chegado até aqui, pode ser feita a verificação dos arquivos dentro diretório escolhido e conferir se todos estão presentes. No caso do projeto com 4 camadas e seguindo as configurações acima, foram gerados 15 arquivos. Quantidade que pode variar de acordo com a configuração escolhida e quantidade de camadas da PCI.

Além dos arquivos de fabricação da PCI, podem ser gerados também os arquivos que auxiliarão na montagem dos componentes, estes que são os arquivos BOM e Centroide. E assim como para o PCI, existem também uma certa padronização que as empresas adotam para esses arquivos. Esta que pode ser tanto no formato do arquivo BOM, quanto ao *layout* e organização deste arquivo, e por último, mas não obrigatório o arquivo centroide. Um tutorial também da JLCPCB pode ser encontrado em [68], o mesmo foi seguido passo a passo sem realizar

nenhuma alteração em seu fluxo, resultando em dois arquivos csv. Um contendo o BOM e o outro o arquivo centroide. Ambos arquivos disponíveis no apêndice B e C.

Tendo finalizado a geração dos arquivos necessários para fabricação e montagem, pode ser realizada a etapa de testes e avaliação, esta que é a consolidação do projeto aqui desenvolvido. Etapa abordada no próximo capítulo.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico foi abordado todos os passos apresentados para o processo de desenvolvimento do projeto declarados no tópico 3.1. Passos que incluem desde o levantamento de requisitos a concepção final do projeto, tendo como resultado os arquivos de fabricação prontos para serem consolidados pelo JLCPCB. No próximo tópico será confrontado o projeto aqui desenvolvido pelos resultados e avaliação dos principais objetivos propostos pelo trabalho.

5 RESULTADOS

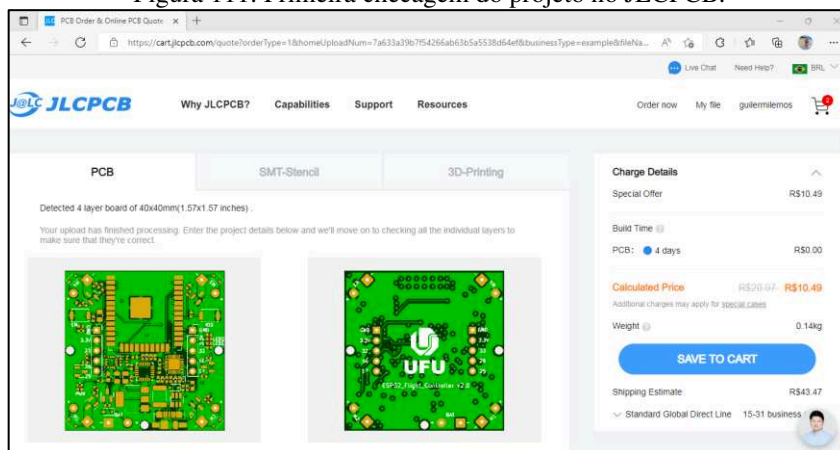
Uma placa de desenvolvimento para ser utilizada como ferramenta educacional e de pesquisa, deve ser capaz de prover certa maleabilidade tal como modificações de *firmware* e de *hardware* como apontado no tópico 4.2. Estas que são de grande importância, pois garantem ao pesquisador uma ampla gama de combinações, visto que podem ser implementadas de forma fácil novos sensores, periféricos e diferentes algoritmos de controle, possibilitando incontáveis usos.

Como o objetivo deste trabalho é o projeto de uma placa de desenvolvimento pronta para ser fabricada e montada, se faz necessário à sua validação. Desta forma, este capítulo abordará, além dos testes e validação, a avaliação das características essenciais para que o projeto possa servir como uma ferramenta de ensino e pesquisa. Características estas, que serão discutidas e seu projeto colocado em prova, comparando-o com os principais concorrentes do mercado.

5.1 TESTES E AVALIAÇÃO

Com os arquivos de fabricação gerados no capítulo anterior, tópico 4.5. Foi possível comprimi-los num único arquivo e subido no site da JLCPCB. Etapa pela qual realizou-se o primeiro teste e sua validação quanto aos requisitos de fabricação e de montagem. Antes de subir o projeto no site, foi criado uma conta para poder efetuar a cotação para sua fabricação e montagem. Após subir os arquivos no site, é realizada a primeira validação, na qual somente aparece a visualização da placa se todas as regras do projeto estão alinhadas com os requisitos de fabricação, caso contrário são geradas mensagens informando o problema para correção.

Figura 111: Primeira checagem do projeto no JLCPCB.



Fonte: Autor.

Na Figura 111 pode-se notar que o projeto passou com êxito nesta primeira verificação, bastando entrar com as configurações de personalização da PCI. Algumas configurações, já foram pré-carregadas do projeto, e, portanto, não foi necessário alterá-las.

As configurações de ordem das camadas não são carregadas por padrão, logo devem ser informadas para garantir a correta ordem da PCI. Na Figura 112, pode ser vista a inserção dessas informações. Para facilitar a seleção das camadas de cobre dentre todas as opções apresentadas, o KiCad as renomeia com o final com o prefixo “_Cu”.

Figura 112: Configuração da ordem das camadas de cobre da PCI.

Layer	Layer Name
L1(Top layer)	esp32_flight_controller-F_Cu.gtl
L2(Inner layer1)	esp32_flight_controller-In1_Cu.g2
L3(Inner layer2)	esp32_flight_controller-In2_Cu.g3
L4(Bottom layer)	esp32_flight_controller-B_Cu.gbl

Fonte: Autor.

Já na parte mostrada na Figura 113, foi alterada apenas a espessura da camada externa e interna de cobre para 1 oz.

Figura 113: Demais configurações da PCI.

PCB Color	Green	Purple	Red	Yellow	Blue	White
	Black					
Silkscreen	White					
Silkscreen Technology	Ink-jet/Screen Printing Silkscreen	High-definition Exposure Silkscreen				
Surface Finish	HASL(with lead)	LeadFree HASL-RoHS	ENIG-RoHS			
Outer Copper Weight	1 oz	2 oz				
Inner Copper Weight	0.5 oz	1 oz	2 oz			
Gold Fingers	No	Yes				
Material Type	FR4-Standard Tg 130-140C	FR-4 TG155				
Confirm Production file	No	Yes				
Flying Probe Test	Fully Test					
Castellated Holes	No	Yes				

Fonte: Autor.

Cabe aqui ressaltar que quanto maior for a espessura do cobre da placa mais caro é o processo de sua fabricação. E neste caso, optou-se por fazer esta alteração, diferindo do que foi definido anteriormente no projeto, porém visando o baixo custo, esta configuração foi necessária e não terá um grande impacto na capacidade de distribuição de energia. Visto que, com esta configuração, as camadas de cobre internas com plano GND, possuem uma espessura maior e complementam a perda de cobre da camada do topo, que também é um plano GND. Enquanto que a última camada conectada ao VCC da bateria, não possui complementos, no entanto ela é que menos sofre com perdas de área em seu plano, pois é a camada com menor número de trilhas.

Para essas configurações da PCI obteve-se a cotação mostrada na Figura 114 para a fabricação de 5 peças. Cotação realizada no dia 17/08/2022.

Figura 114: Cotação para a fabricação de 5 PCIs.

Charge Details	
Special Offer	R\$10.49
Inner Copper Weight	R\$89.14
Build Time ?	
PCB: 4 days	R\$0.00
Calculated Price	R\$99.63
Additional charges may apply for special cases	
Weight ?	0.14kg
SAVE TO CART	
Shipping Estimate	R\$43.47
Standard Global Direct Line 15-31 business days	

Fonte: Autor.

Para acrescentar o serviço de montagem, na mesma página é exibido a opção de montagem, bastando habilita-la para realizar a sua configuração. Onde, neste caso foram alteradas apenas a quantidade de montagem para duas PCIs, como mostrado na Figura 115.

Figura 115: Configuração do processo de montagem da PCI.

Fonte: Autor.

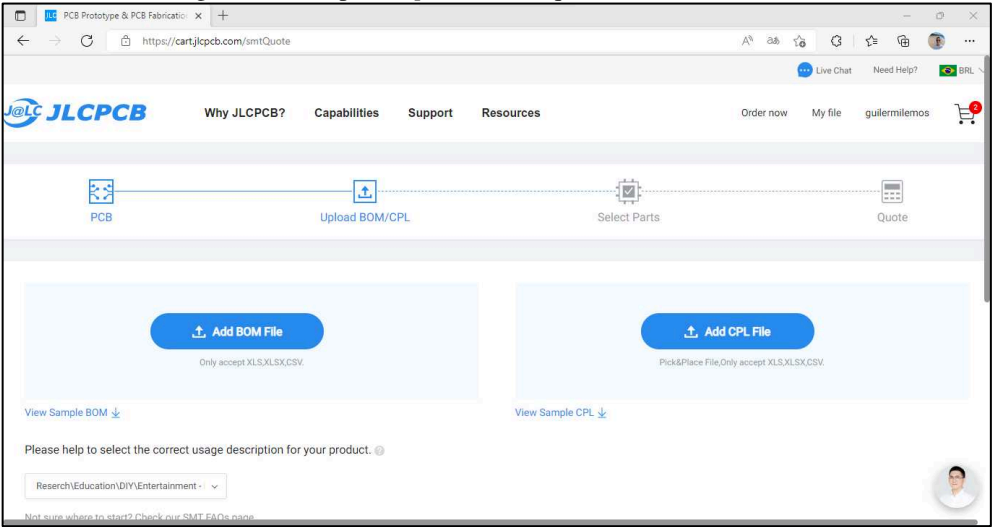
Além disso, foi selecionado para a própria JLCPCB realizar a aquisição dos componentes, estes que estão listados no arquivo BOM gerado. Tal configuração pode ser vista na Figura 116.

Figura 116: Configuração para a aquisição de componentes.

Fonte: Autor.

Feito isso, o próximo passo é aceitar os termos e condições e clicar em confirmar, onde será redirecionado para a próxima etapa. A próxima etapa consiste em subir os arquivos BOM e centroide, onde na Figura 117 pode ser visto dois botões, um para cada arquivo que deve ser adicionado.

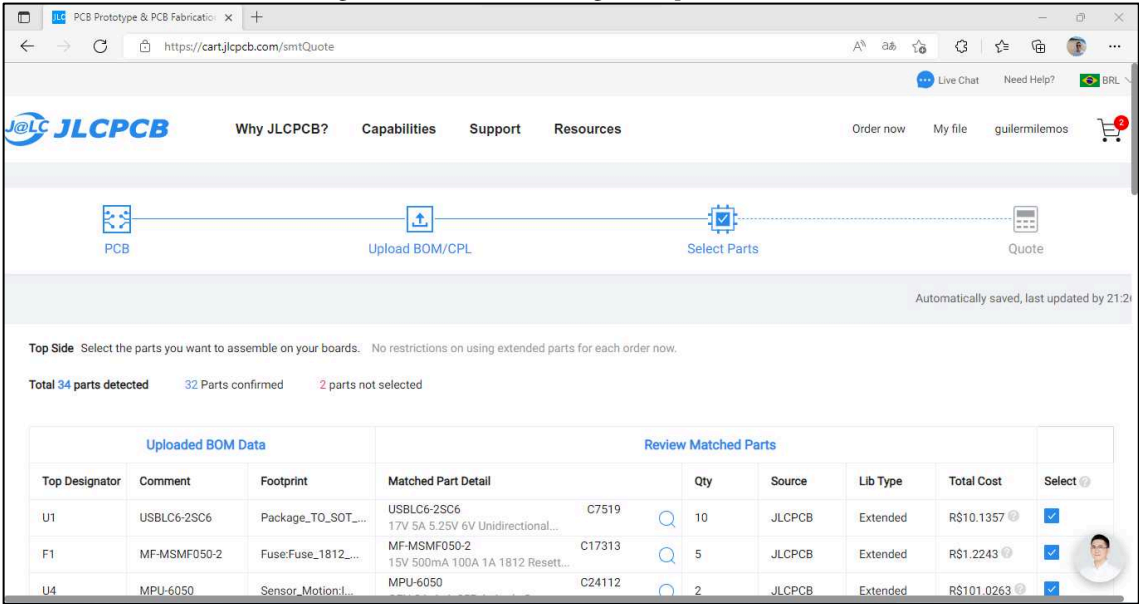
Figura 117: Etapa de *upload* dos arquivos BOM e centroide.



Fonte: Autor.

Após o *upload* dos arquivos, bastou clicar em *next* e a próxima tela surgiu. Nesta tela é para ser conferido todos os *part numbers* do projeto, alguns já são correlacionados automaticamente, outros são necessários inserir automaticamente. A Figura 118 abaixo, mostra esta tela, bem como indica que não encontrou dois componentes. Estes que precisam ser adicionados manualmente.

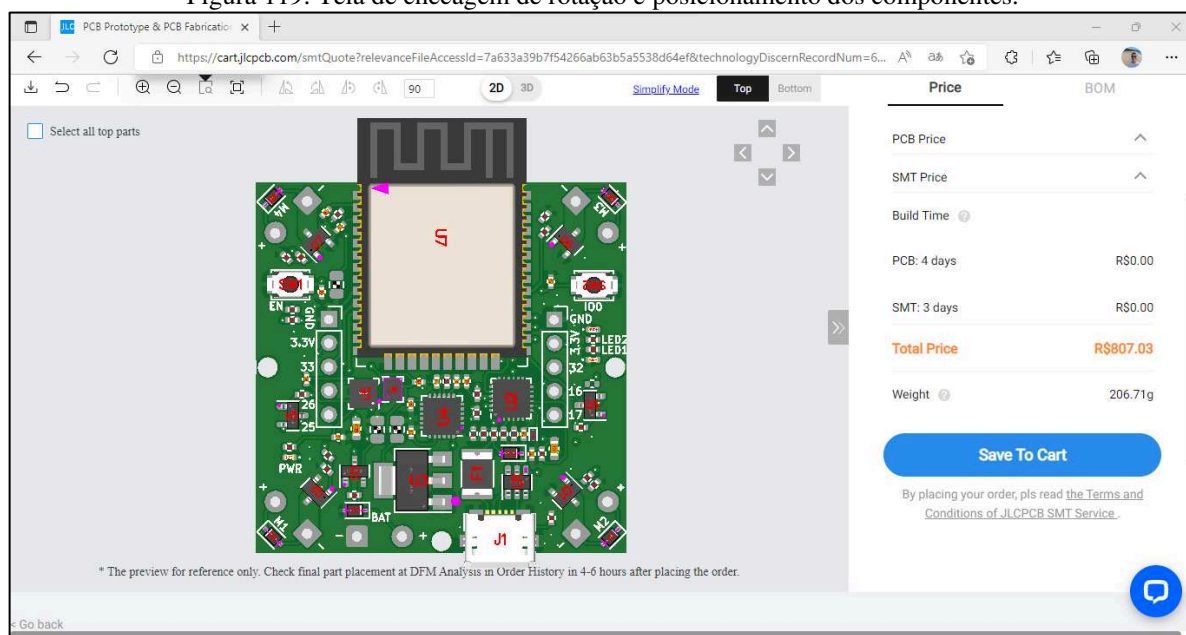
Figura 118: Tela de checagem de *part numbers*.



Fonte: Autor.

Após serem adicionados os *part numbers* não reconhecidos e ter verificado os demais, passou-se para a tela de cotação final clicando em *next*. Onde surgiu a seguinte tela da Figura 119. Devendo ser conferida a rotação dos componentes e se estão nos seus devidos lugares, caso tenha alguma rotação que esteja errada, esta deverá ser corrigida.

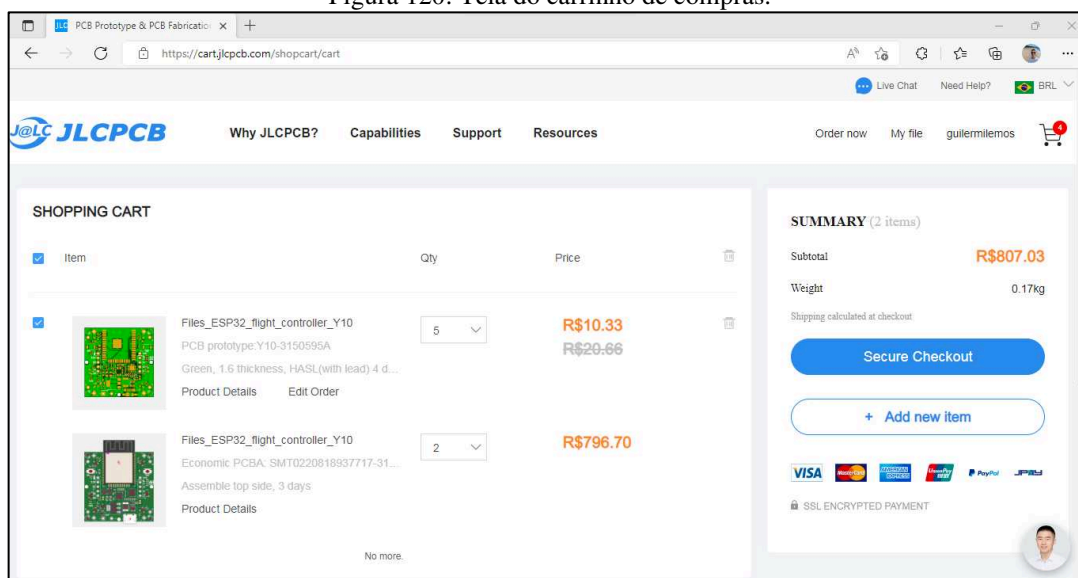
Figura 119: Tela de checagem de rotação e posicionamento dos componentes.



Fonte: Autor.

Feito a verificação e estando tudo certo, prosseguiu-se para o próximo passo clicando em “*Save To Cart*”, Figura 120. Desta forma, a próxima tela surgiu, e então prosseguiu-se clicando em “*Secure Checkout*” para continuar com o processo e obter a cotação final com o valor do frete.

Figura 120: Tela do carrinho de compras.



Fonte: Autor.

Na tela de *checkout* foi selecionado o frete mais barato, tendo então o seu valor de fabricação, montagem e frete. Cujos valores são exibidos abaixo na Figura 121 e Figura 122.

Figura 121: Tela com o valor final de fabricação, montagem e frete.

The screenshot shows a web browser window with the URL `https://cart.jlpcb.com/payMethod?hasSmt=1&shoppingCartAccessIdList=41a6cc6f4fc442feac952d3e1a6ecb78,28554f67df324249...`. The page is titled "2.Shipping Method" and displays a list of shipping options under the heading "FCA (Duty, customs and GST collected at the time of delivery)". The options are:

- ☐ DHL Express Worldwide: 10-15 business days. Note: There may be import customs duty&Tax and disbursement fee,if the order value exceeds the customs threshold. ☐ Use My DHL Account.
- ☐ DHL Express Economy: 11-16 business days. Note: The logistics information will be updated two days later after you get AWB number.
- ☐ UPS Express Saver: 13-17 business days.
- ☒ FedEx International Packet: 12-16 business days. Note: FedEx will pay duty and collect it from customer when the parcel is taxed by customs. Pls make sure duty is acceptable before order.If parcel is destroyed due to unpaid duty,no compensation will be provided.
- ☐ S.F Express (UPS): 13-17 business days.
- ☐ Standard Global Direct Line: 15-31 business days. Note: The express delivery method requires the order amount to be less than 100.00\$.

At the bottom of the shipping method section, there are two buttons: "Back to Cart" and "Continue". To the right of the shipping method section, there is a "SUMMARY" box with the following details:

SUMMARY	
Merchandise Total	R\$807.03
Shipping	R\$123.47
Grand Total:	R\$930.50

At the bottom of the page, there is a "3.Submit Order" button and a small circular profile picture of a man.

Fonte: Autor.

Figura 122: Cotação de fabricação e montagem da PCI do projeto incluindo o frete.

SUMMARY	
Merchandise Total	R\$807.03
Shipping	R\$123.47
Grand Total:	R\$930.50

Fonte: Autor.

Como pode ser visto, o projeto desenvolvido passou em todas as etapas de checagem sem apresentar nenhum problema, mostrando que o projeto desenvolvido neste trabalho se encontra consolidado e pronto para fabricação.

Ao concluir o projeto, as experiências adquiridas ao longo de seu desenvolvimento foram muitas, onde dedicou-se a criação de um tópico (tópico 5.2 seguinte) deste capítulo para o seu compartilhamento.

5.2 EXPERIÊNCIAS ADQUIRIDAS

Com base no trabalho já realizado anteriormente e já abordado no tópico 3.2, bem como a primeira versão do projeto, pode-se obter experiências que ajudou no processo de desenvolvimento, tais como melhores escolhas de componentes, mudanças na placa de circuito impresso, e outras. Estas que tiveram grande relevância e enorme contribuição para o

desenvolvimento da segunda e atual versão, abordada por este trabalho. Tais experiências são abordados nos tópicos seguintes.

5.2.1 Preço dos Componentes

No momento de desenvolvimento deste trabalho o mundo estava passando por uma pandemia, a pandemia do coronavírus. Esta que provocou a paralisação de diversas indústrias, sendo o setor de fornecimento de *chips* um dos mais afetados devido a política de distanciamento e a adoção em massa do regime de *home office*. Esse regime provocou um grande aumento na procura por PCs, *smartphones*, *tablets* e *notebooks*, e a indústria não conseguiu acompanhar a demanda. Dando início a uma atual escassez global de *chips*, esta que tem impactado diretamente todos os setores de tecnologia, tais como os setores de *smartphones*, televisores, eletrodomésticos e em especial o setor automotivo.

Com a oferta de produtos eletrônicos sendo reduzida e a procura por estes produtos estar aumentando, houve um enorme acréscimo do preço dos chips, alguns tendo seu preço multiplicado por mais de 10 vezes. Como foi o caso do microcontrolador escolhido na primeira versão do projeto, que estava custando a unidade mais de R\$300,00, contribuindo para inviabilização do projeto. Visto este problema, adotou-se para o processo de escolha de um componente, além das checagens padrões, a prática de verificar a quantidade em estoque, previsão de recepção da próxima remessa e a adoção de uma lista contendo os possíveis substitutos. Desta forma, não eliminará por completo o risco de passar pelo ocorrido mencionado, no entanto, suas chances de acontecer são bastante reduzidas.

5.2.2 Posicionamento Bilateral dos Componentes

Ao ser desenvolvido a primeira versão do projeto, optou-se pelo posicionamento dos circuitos dos dois lados da placa, sendo o circuito de potência na parte de baixo da placa e os demais circuitos na parte de cima. Tal configuração foi escolhida devido ao fato de poder manipular melhor as trilhas de potência que cuja largura é muito superior para ser capaz de comportar toda a energia demandada pelos motores. Não havendo nenhuma outra trilha passando pela última camada da PCI que não seja as trilhas relacionadas ao circuito de alimentação e potência.

Porém, como visto anteriormente nos requisitos de DFM para montagem da JLCPCB, a montagem bilateral só está disponível para o modo PCBA padrão, este que por sua vez tem um preço maior quando comparado ao modo PCBA Econômico. Além disso, na época do

desenvolvimento da primeira versão não existia a montagem bilateral em nenhum dos modos. Detalhe que só foi percebido após a finalização do projeto, impossibilitando a sua fabricação pelo JLCPCB. Valendo aqui ressaltar a importância de ler nos mínimos detalhes todas as regras de capacidades da empresa escolhida para realizar a fabricação e montagem do projeto e aplicá-las desde o início do desenvolvimento.

5.2.3 Dificuldades de Fabricação e Montagem no Brasil

Como não havia a possibilidade de realizar a montagem com a JLCPCB, foram feitas pesquisas de empresa nacionais que fizessem, além do processo de montagem, a compra dos componentes e fabricação da PCI, como uma alternativa a JLCPCB. Onde por meio das pesquisas feitas, não foi possível encontrar alguma empresa nacional que fizesse tanto o serviço de fabricação da PCI no formato *multilayer*, quanto a aquisição de componentes e sua montagem. No entanto, foi visto que existia empresas que só fazia o processo de fabricação da PCI ou só a montagem e muitas das vezes a fabricação estava limitada a apenas PCIs de duas camadas.

Desta forma, optou-se por realizar uma cotação de ambos os serviços para a primeira versão do projeto nas únicas empresas que poderiam atender os requisitos de fabricação. Onde, foi apresentado a ambas as empresas, o projeto e seus respectivos arquivos de fabricação, bem como, visto com a empresa que realiza a montagem dos componentes, a possibilidade da mesma em adquiri-los.

A empresa que seria responsável pela montagem passou algumas especificações técnicas de como a PCI deveria ser fabricada, estas especificações seriam para que a montagem ocorresse de forma robotizada pelos maquinários da empresa. Tendo como resultado, um processo de montagem mais rápido e com alta precisão no posicionamento dos componentes, além de possuir um custo mais barato quando comparado com a montagem manual. As especificações passadas para a fabricação da PCI, incluíam que fossem montadas em um painel com aba de no mínimo 5 mm e com pelo menos 4 PCIs, ambas vincadas para facilitar o seu destacamento, bem como a confecção do estêncil.

Quanto a aquisição dos componentes a empresa confirmou que poderia fazer o serviço de aquisição de componentes, estes que seriam adquiridos com fornecedores nacionais parceiros e os que eles não tivessem seriam importados. Tendo um tempo de espera estimado para a aquisição de 10 a 15 dias para componentes adquiridos com os parceiros e um prazo de 28 dias para componentes importados. Para isso, o arquivo BOM foi encaminhado à empresa

que ficou de retornar com o valor da cotação tanto para a montagem quanto para a aquisição dos componentes.

Quanto a empresa que seria responsável pela fabricação da PCI, foi realizada a cotação para a fabricação de acordo com os requisitos da empresa que faria a montagem, esta que enviou a cotação baseada na quantidade de peças e prazo, cotação exibida na Tabela 9. Porém a cotação enviada, era para a confecção das PCIs sem as especificações de aba e vinco, e que para a configuração especificada, têm-se um valor mínimo que deve ser atingido para a fabricação. O valor mínimo para a confecção de placas *multilayers* é de R\$1.200,00 tendo como prazo máximo 10 dias, além disso, o valor por peça não foi informado devido ao fato de ser mais caro.

Tabela 9: Cotação realizada com a empresa que seria responsável pela fabricação da PCI.

Modelo	Faces	Material	Espessura	Cobre	Larg.	Comp.	Acabamento		Prazo opção 1	Prazo opção 2	Prazo opção 3
FLIGHT CONTROLLER	4	FR4	1,6	0,5	26	48	HAL	QTD	10 DU	5 DU	3 DU
Com teste elétrico, arquivo: Arquivos de fabricacao.zip.								3	R\$ 400,00	R\$ 460,00	R\$ 552,00
								5	R\$ 240,00	R\$ 288,00	R\$ 345,60

Fonte: Adaptado pelo autor.

Devido ao valor para a confecção da PCI nos padrões da empresa que realizaria montagem estar desalinhado com o foco do projeto que é o baixo custo, uma tentativa de negociação com a empresa para realizar a montagem foi feita. Visando a realização da montagem de forma manual, pois desta forma as placas poderiam ser fabricadas sem as especificações de abas e vinco tornando consideravelmente mais barata a sua fabricação. Onde não se obteve nenhuma resposta da empresa, várias tentativas foram feitas, mas nada foi respondido.

Desta forma, a primeira versão do projeto foi descartada e uma nova iniciada. Tendo como foco a fabricação e montagem na JLCPCB, surgindo a versão 2.0, cujo desenvolvimento foi abordado por este trabalho no capítulo anterior. Com a segunda versão, tomou-se todos os cuidados para que o projeto estivesse alinhado com as regras de DFM da JLCPCB. E como experiência, pode-se obter um pouco de conhecimento de empresas nacionais que realizam o processo de fabricação e montagem, que mesmo tendo que evoluir bastante em alguns aspectos, podem ser uma boa opção para a fabricação de projetos.

5.2.4 Compra de Componentes Avulsos

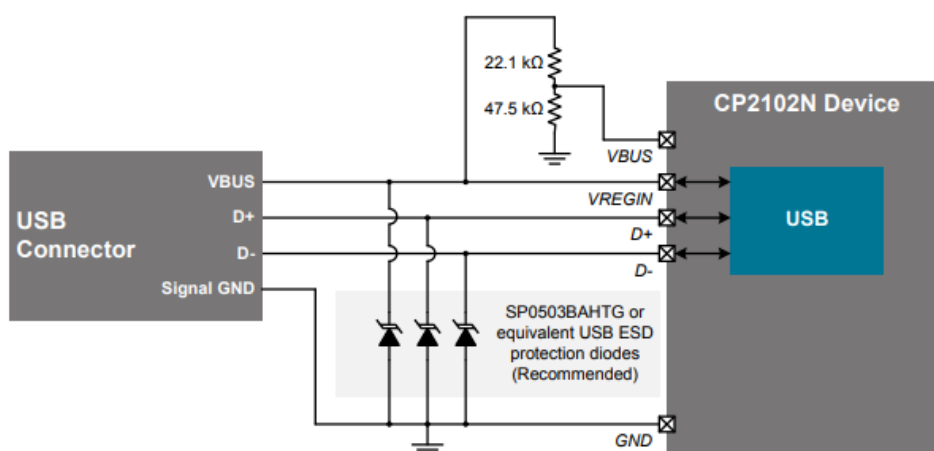
Como uma alternativa para prosseguir com a primeira versão do projeto, foi cogitada uma nova forma de fabricação. Consistindo em fabricar a PCI na JLCPCB e realizar o trabalho

de compra dos componentes e consequentemente a sua montagem. Porém a montagem utilizando um ferro de solda convencional iria exigir certa experiência prática com solda, este que o autor não possui e por isso foi descartada. No entanto, tal alternativa pode ser realizada caso possua destreza com solda de componentes SMD e circuitos miniaturizados. Ao escolher esta forma de fabricação e for pesquisar pelos componentes eletrônicos na internet, deve-se atentar para que o vendedor ou site seja de confiança, e que seja vendido componentes originais. Para isso deverá evitar sites de *e-commerce* convencionais e dar preferência a sites cujo nicho seja o de semicondutores e componentes eletrônicos, estes sites exibem certificados e qualificações de diversas fabricantes de semicondutores, estas que garantem a originalidade de seus produtos.

5.2.5 Manuais de Referência

Uma boa prática aprendida, com os desenvolvimentos anteriores e dentro do curso de graduação, foi em adquirir a prática de sempre pesquisar pelos manuais, tais como os *data sheets* e *reference manuals* de um circuito integrado. Onde a grande maioria aborda além das principais características do circuito integrado, um exemplo de como integra-lo ao projeto, incluindo os componentes necessários e informações para configurações personalizadas. A Figura 123 exibe um exemplo de um esquema elétrico obtido de um manual de referência do circuito integrado CP2102N, que é um conversor USB para UART. Neste esquema, é possível ver que há a necessidade de componentes externos para a sua utilização, tal como os resistores e os diodos para proteção contra ESD.

Figura 123: Diagrama de conexão típica da USB no CI CP2102N.

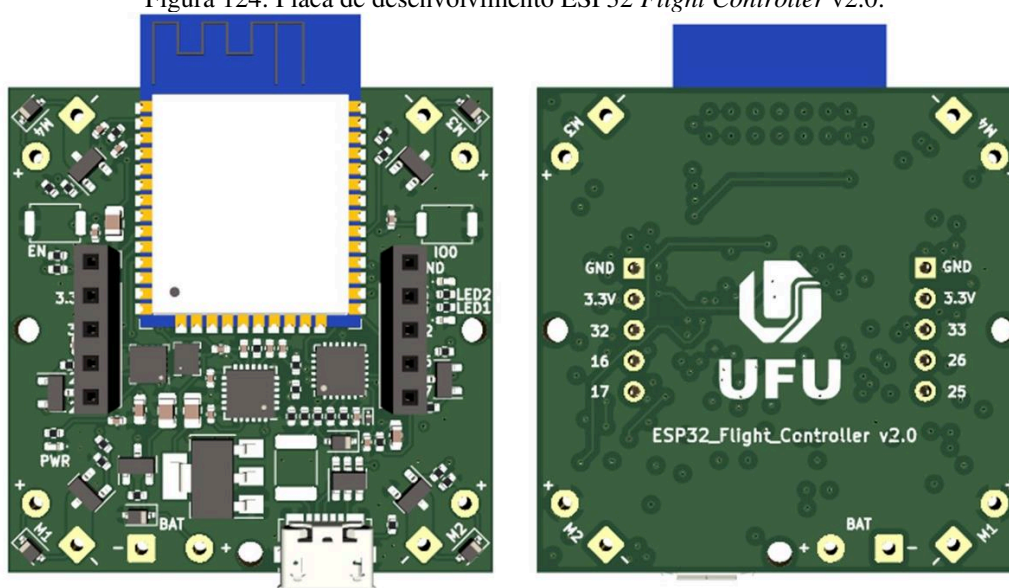


Fonte: [69].

5.3 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO

O projeto, Figura 124, foi desenvolvido visando atender os mini *drones*, que como o próprio nome diz, são dispositivos que possuem um tamanho compacto, trazendo inúmeras vantagens. Tais como: peso consideravelmente menor, peças de reposição de menor custo, eletrônica dos motores simplificada e de fácil entendimento, possibilidade de se operar em ambientes fechados, além de oferecer uma maior segurança para quem esteja operando. Características que o diferencia de um *drone* de proporções maiores, que têm o inverso destas características.

Figura 124: Placa de desenvolvimento ESP32 *Flight Controller* v2.0.



Fonte: Autor.

O tamanho reduzido da placa de desenvolvimento garante com que seja utilizado nos mais diversos tipos de *frames* de *drones* encontrados comercialmente ou mesmo para fabricação como modelos impressos 3D. Os furos de encaixe contidos na placa de circuito impresso, foram pensados e desenhados com o mesmo distanciamento, que é padronizado de alguns *frames* disponíveis comercialmente em fibra de carbono. Dando a liberdade de poder escolher entre criar seu próprio *frame* ou mesmo adquirir um em algum site especializado. Outro ponto relevante é a não adoção da placa de circuito como parte do *frame*, que como discutido anteriormente, adiciona um enorme ponto de falha no projeto.

Seu projeto conta com uma apropriada disposição dos componentes, tal como a conexão dos motores, esta que está alinhada com o posicionamento de cada motor, facilitando na hora da conexão. Os conectores de bateria e USB, ambos dispostos do mesmo lado da PCI, dando um espaço maior nas laterais da placa tornando mais fácil o encaixe e remoção dos módulos de

expansão. O posicionamento central dos conectores para o encaixe do módulo externo, garante um bom centro de massa quando há a inserção de um módulo de expansão. A disponibilização de pinos de alimentação regulados e em cada *socket* de expansão, possibilita que possa ser inserido mais de uma placa de expansão, uma em cada *socket*.

Apesar do projeto ser para a categoria mini, seu circuito de potência relacionado aos motores, foi desenvolvido pensando em entregar uma corrente máxima de 6 A por motor. Circuito capaz de prover uma enorme entrega de potência, caso sejam utilizados motores maiores ou mesmo uma hélice de proporções maiores ou com um número maior de pás.

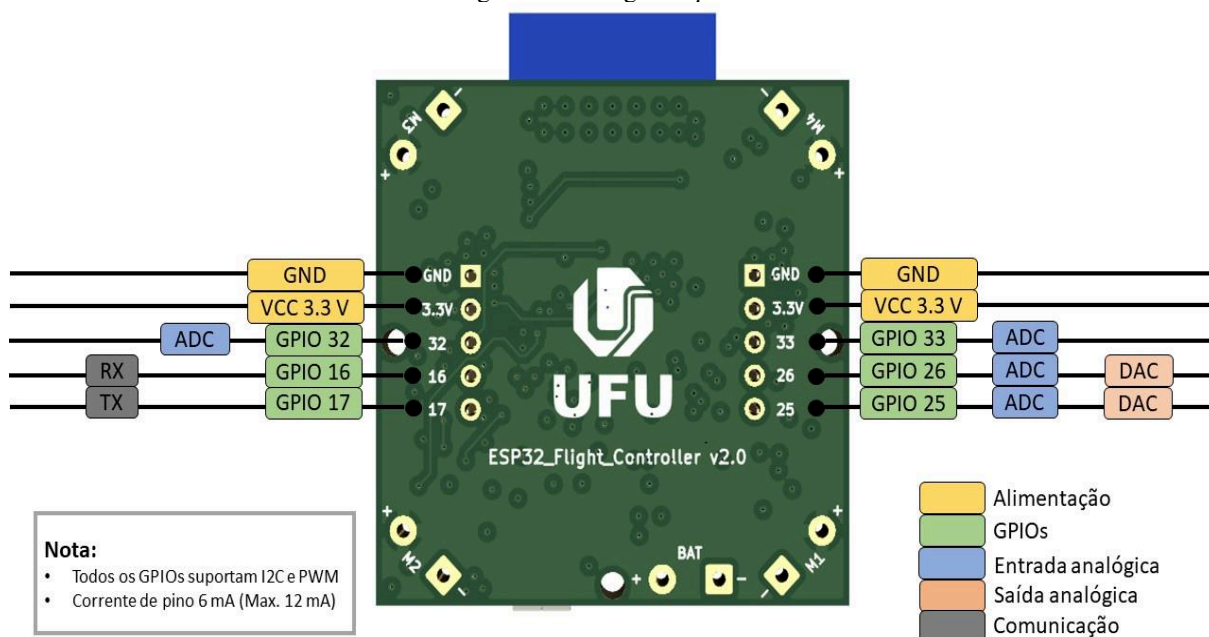
O circuito foi projetado para entregar uma potência de no máximo 20 W por motor, sendo que é mais do que suficiente, visto que em testes realizados, ligando diretamente na bateria um dos maiores motores da categoria mini, o 8520. Onde estava acoplado com uma hélice de 55 mm de diâmetro bi pá, houve um consumo máximo de 10 W. Sendo assim, o projeto conta com uma boa margem de segurança e garante uma ótima entrega de potência.

Para que a placa pudesse ser utilizada como ferramenta de pesquisa, esta deveria ser dotada de diversos mecanismos de proteção, principalmente contra ESD. Uma vez que, assim como qualquer outra placa de desenvolvimento, sempre tem o contato com as mãos dos usuários e factível de receber descargas eletrostáticas podendo acabar por danificar algum circuito. A placa desenvolvida no projeto contou com os mais diversos tipos de proteção, que incluem a ESD, proteção da USB, proteção contra inversão de polaridade e limitador de corrente. Garantindo assim, uma maior robustez ao projeto e permitindo que seja utilizada por qualquer pessoa.

No processo de desenvolvimento do projeto, um dos fatores mais relevantes e levado em consideração, foi em tentar garantir ao máximo as diversas possibilidades de configurações. No quesito *hardware*, possibilitando um ótimo desempenho de processamento e compatibilidade com um vasto número de periféricos e *firmware*, este que além de poder ser alterado e gravado facilmente via interface USB, existe o suporte a mais de uma linguagem de programação. No projeto, ambos quesitos tiveram uma grande evolução se comparado aos seus principais concorrentes, pois foi embarcado um poderoso microcontrolador com uma CPU de 2 núcleos, além de possuir uma memória externa de tamanho considerável de 4 MB e que dificilmente terá seu máximo atingido. O microcontrolador conta com suporte de linguagem de programação além do C padrão, o *micropython*, e suporte a RTOS com o freeRTOS da *Amazon*. Que é uma variante dos sistemas operacionais de tempo real para sistemas embarcados, se destacando pelo foco em IoT ou *Internet of Things*.

Enquanto ao sensoriamento, foram dispostos além dos sensores básicos para permitir o voo de um *drone*, sensor de pressão ou barômetro e magnetômetro. Sendo o único projeto que conta com todos esses sensores embarcados, dando ao dispositivo 9 graus de liberdade. Enquanto seu módulo de expansão conta com 6 pinos de GPIOs e interfaces UART, I2C, ADC, DAC e PWM, ambos podem ser vistos no diagrama *pinout* na Figura 125 abaixo.

Figura 125: Diagrama *pinout*.



Fonte: Autor.

Quanto as interfaces de comunicação, a placa de desenvolvimento conta com comunicação USB, comunicação sem fio por meio de *Wi-Fi* e *Bluetooth* e suporte à instalação de módulo receptor de rádio controle profissional por meio dos pinos de expansão.

O projeto foi desenvolvido utilizando os componentes mais comuns e acessíveis atualmente, possibilitando que sejam encontrados com facilidade nas mais diversas lojas especializadas em componentes eletrônicos. Além de ter seus componentes dispostos em apenas um dos lados da placa de circuito impresso, configuração que permite que seja montada com maior facilidade por qualquer empresa que realiza este tipo de serviço, ou mesmo montagem manual.

5.3.1 Resumo das Características da Placa

A Tabela 10 abaixo exhibe as principais especificações da placa de desenvolvimento ESP32 *Flight Controller* v2.0.

Tabela 10: Especificações da *ESP32 Flight Controller v2.0*.

Categoria	Item	Especificação
Certificação	RF	FCC/CE-RED/IC/TELEC/KCC/SRRC/NCC
	<i>Wi-Fi</i>	<i>Wi-Fi Alliance</i>
	<i>Bluetooth</i>	BQB
	<i>Green certification</i>	RoHS/REACH
<i>Wi-Fi</i>	Protocolo	802.11 b/g/n (802.11n até 150 Mbps)
		A-MPDU e A-MSDU
	Alcance em frequência	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
<i>Bluetooth</i>	Protocolo	<i>Bluetooth</i> v4.2 BR/EDR e especificação BLE
	Rádio	Receptor NZIF com -97 dBm de sensibilidade
		Transmissor classe - 1, classe - 2 e classe - 3
		AFH
	Áudio	CVSD e SBC
<i>Hardware</i>	Microcontrolador	Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6 (448 kB de ROM e 520 kB de SRAM)
		Frequência de clock ajustável de 80 MHz a 240 MHz
		Coprocessador de baixo consumo
	Interfaces	UART, I2C, LED PWM, Motor PWM, <i>pulse counter</i> , GPIO, ADC, DAC, <i>Two-Wire Automotive Interface</i> (TWAI®), compatível com a ISO11898-1)
	Sensores embarcados	Acelerômetro, Giroscópio, Magnetômetro, Barômetro, Temperatura e sensor Hall
	Memória FLASH	4 MB
	Alimentação	3 - 6 VDC
	4 ESCs escovados embutidos	Cada ESC escovado pode suportar corrente de até 6 A
	Faixa de temperatura operacional recomendada	-40 °C ~ +85 °C
	Tamanho do pacote	(40.00±0.10) mm × (47.00±0.10) mm × (10.00±0.10) mm

Fonte: Autor.

Encerrado este tópico, nota-se que todos os requisitos levantados na etapa 4.2, tanto os obrigatórios quanto os opcionais para este projeto foram atendidos. Bastando realizar uma comparação com os seus principais concorrentes, tópico abordado a seguir.

5.4 COMPARAÇÃO COM OS CONCORRENTES

Neste tópico a comparação será mediante as características das placas de desenvolvimento dos principais concorrentes do mercado e já abordados, *Crazyflie 2.1* e o *ESPcopter*. Para facilitar a comparação foi elaborado a Tabela 11 contendo as principais

características de cada e algumas informações que são relevantes para serem utilizados como ferramenta de pesquisa e educacional.

Tabela 11: Comparativo entre as placas de desenvolvimento.

Categoria	Item	ESP32 <i>Flight Controller</i> v2.0	<i>Crazyflie 2.1</i>	<i>ESPcopter</i>
MCU	Núcleos	2	1	1
	Frequência de operação	240 MHz	168 MHz	160 MHz
	Memória ROM	448 kB (expansível)	1 MB	Sem informação
	Memória SRAM	520 kB (expansível)	192 kB	80 kB
	Interfaces	UART, I2C, PWM, GPIO, ADC e DAC	UART, I2C, SPI, PWM, ADC e GPIO	UART, ADC e GPIO
Comunicação	<i>Wi-Fi</i>	Suporte	Sem suporte	Suporte
	<i>Bluetooth</i>	Suporte	* Suporte com PA	Sem suporte
	Rádio	Suporte a rádio externo	Suporte à rádio proprietário integrado	Suporte a rádio externo
	USB	Suporte	Suporte	Suporte
Hardware	Sensores	Acelerômetro, Giroscópio, Magnetômetro, Barômetro, Temperatura e sensor Hall	Acelerômetro, Giroscópio e Barômetro	Acelerômetro, Giroscópio e Magnetômetro
	Memória FLASH externa	4 MB (integrado)	Suporte	4 MB
	Número de GPIOs	6	13	6
	Carregamento de bateria integrado	Sem suporte	Suporte	Sem suporte
	Alimentação	3 - 6 VDC	3 - 6 VDC	3 - 6 VDC
	Unidade de potência	4 ESCs escovados embutidos com corrente máxima de 6 A cada	4 ESCs escovados embutidos com corrente máxima de 3 A cada	4 ESCs escovados embutidos (potência não encontrada)
	Tamanho do pacote	40 mm × 47 mm × 10 mm	80 mm × 80 mm × 8 mm	90 mm × 90 mm × 10 mm
	Módulos de expansão	Suporte	Suporte	Suporte

Fonte: Autor.

* Suporte com PA: Possui o suporte e conta com um *power amplifier* – PA para elevar o alcance da comunicação.

Ao colocar as principais especificações do projeto junto a de seus principais concorrentes, nota-se com clareza os pontos em que o projeto teve como foco, se sobressaindo perante aos demais em alguns quesitos, tais como: poder de processamento, memórias, sensores, interfaces de comunicação com fio e sem fio, e na unidade potência. Além disso, o tamanho da placa diminuiu consideravelmente, com a estratégia adotada de não a utilizar como estrutura mecânica/*frame*.

No projeto *ESP32 flight controller* v2.0 houve uma perda quanto aos quesitos de quantidade de GPIOs, comunicação SPI e carregador de bateria integrado, seja na quantidade

ou mesmo por não oferecer o suporte. Com relação a quantidade de GPIOs, o projeto ao menos ficou no mesmo patamar que o *ESPcopter*, provendo 6 pinos de GPIOs. Entretanto, os pinos do ESP32 *flight controller* v2.0 oferece um maior número de interfaces disponíveis tais como o suporte em todos os pinos a interface de comunicação I2C e PWM e em alguns o suporte a DAC e ADC.

Apesar de possuir mais interfaces que o *ESPcopter* o ESP32 *flight controller* v2.0, consta com uma a menos que o *Crazyflie* 2.1, a interface de comunicação SPI. No entanto, a grande maioria dos circuitos integrados que operam com interface SPI, possui uma variante que trabalha com I2C ou mesmo as duas interfaces são suportadas pelo mesmo CI. Desta forma, a falta desta interface pode não ser tão relevante, porém pode limitar se para um módulo de expansão a interface SPI for obrigatória.

Dentre os dois concorrentes do mesmo nicho, o ESP32 *flight controller* v2.0 não consta com um circuito dedicado ao carregamento de bateria, uma vez que não fazia parte dos requisitos levantados. Característica essa não julgada como algo importante, visto que não aumentaria as possibilidades de uso e que só elevaria o custo do projeto. Além disso, é possível encontrar na internet *decks* de carregamento com suporte ao carregamento de várias baterias de maneira simultânea e num preço acessível.

Entrando no assunto de custos o próximo tópico, 5.4.1, aborda num rápido comparativo a previsão de custos do projeto ESP32 *flight controller* v2.0 com o valor de aquisição dos seus concorrentes.

5.4.1 Previsão de Custo e Comparação

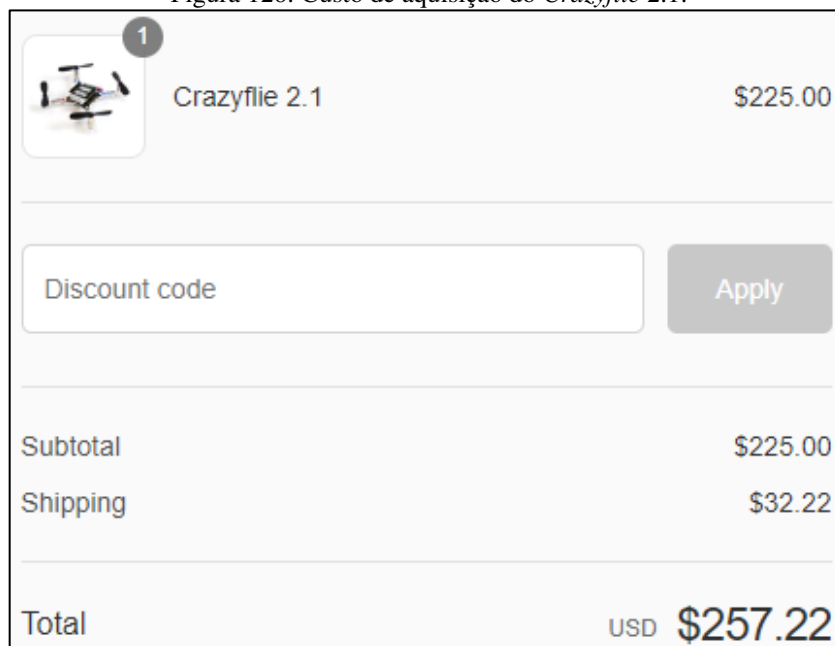
Como este trabalho conclui apenas a primeira parte do processo de desenvolvimento, englobando apenas a parte de elaboração do projeto elétrico e projeto de *design* da PCI, não chegando de fato a sua confecção e montagem. Foi elaborado uma tabela contendo uma previsão do valor de custo para se produzir 5 placas de circuito impresso, das quais duas com montagem, quantidades essas a mínima para realizar um pedido na JLCPCB e com o preço já abordado anteriormente na Figura 122. Além disso, para obter-se a previsão do custo estimado do projeto, foram incluídos no cálculo as peças restantes tais como os motores, hélices, *frame*, bateria, carregador de bateria e conector de bateria. Este levantamento pode ser visto na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12: Custo estimado do projeto ao final.

Item	Quantidade	Frete	Preço unitário	Valor
Fabricação e montagem da PCI	1	R\$ 123,47	R\$ 807,30	R\$ 930,77
Par de motor <i>brushed</i> 8520 58000 rpm	2	R\$ 31,71	R\$ 7,03	R\$ 45,77
Jogo de 4 hélices bi pás de 65 mm DJI Tello	1	R\$ 39,65	R\$ 14,01	R\$ 53,66
Frame 120 mm fibra de carbono	1	R\$ 29,67	R\$ 24,96	R\$ 54,63
Bateria Gaoneng 1S 650 mAh 60c/120c 3,8 V	1	R\$ 34,83	R\$ 34,72	R\$ 69,55
Carregador de bateria 1S	1	R\$ 34,83	R\$ 10,61	R\$ 45,44
Par conector PH2.0 para bateria	1	R\$ 30,57	R\$ 2,95	R\$ 33,52
Total				R\$ 1.233,34

Fonte: Autor.

Para o *Crazyflie 2.1*, o custo foi obtido através de seu próprio site, onde existe a opção de compra e com envio para o Brasil. Na Figura 126 abaixo é possível ver o preço para a aquisição de um *Crazyflie 2.1* e seu frete para uma cidade qualquer do estado de Minas Gerais.

Figura 126: Custo de aquisição do *Crazyflie 2.1*.


The screenshot shows a product listing for the Crazyflie 2.1 drone. The price is listed as \$225.00. Below the price, there is a section for a discount code with an 'Apply' button. At the bottom, a summary table shows the subtotal as \$225.00, shipping as \$32.22, and a total of USD \$257.22.

Subtotal	\$225.00
Shipping	\$32.22
Total	USD \$257.22

Fonte: Autor.

Note que por se tratar de um produto importado o seu preço é cotado em dólar americano, sendo a cotação tomada, a do dia 18/11/2022, tendo um dólar americano valendo R\$ 5,375 reais. Desta forma, o preço do *Crazyflie 2.1* convertido em reais é R\$ 1.382,56.

O preço para o *ESPcopter*, este também obtido de seu próprio site, pode ser visto abaixo na Figura 127, cuja cotação também dada em dólar americano. A sua conversão para reais tendo seu custo somado com o frete para o Brasil e para qualquer cidade do estado de Minas Gerais está R\$ 553,66.

Figura 127: Custo de aquisição do *ESPcopter*.

Your order	
Product	Subtotal
ESPcopter Maker Kit × 1	\$79.00
Subtotal	\$79.00
Shipping	☒ Standard Shipping (15-30 days): \$24.00 ☐ DHL Express Shipping (3-5 days) Battery not included: \$49.00
Total	\$103.00

Fonte: Autor.

Os custos de aquisição abordados acima estão relacionados aos seus kits básicos e sem nenhum módulo externo incluso, nem a inclusão de taxas alfandegárias. Estando todos sujeitos a tributações ao chegar no Brasil, taxas que podem elevar consideravelmente esse custo.

A alíquota do imposto de importação é de 60 % do valor do produto acrescido de frete e seguro, conforme dispõe a Portaria MF 156/99 em seu artigo 1º. O valor da tributação não pode ser maior que 60 % do valor, nem ultrapassar US\$ 3.000,00. Além disso, também poderá ser cobrado o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços), este que varia com o estado do destinatário. Para o caso do envio para o estado de MG, o valor do imposto a ser cobrado é de 18 %. Para bens importados cujo valor não ultrapasse o limite de cem dólares americanos, estes serão desembarcados com isenção do imposto de importação de 60 %, desde que quando destinados a pessoas físicas, Decreto-Lei Nº 1.804, de 3 de setembro de 1980, artigo 2º, inciso II.

Desta forma, a tabela abaixo mostra os valores convertidos em reais, bem como o valor final incluindo os impostos. Note que para o projeto ESP32 *flight controller* v2.0 o único item de sua cotação que pode ser taxado é o pedido da JLCPCB, que neste caso poderá ser declarado um valor maior que cem dólares e, portanto, foi levado em consideração a adição dos impostos. Demais itens presentes na Tabela 12 enquadram-se dentro do valor limite de isenção e estão isentos de impostos.

Tabela 13: Cálculo de tributação de importação.

Item	Valor isento de tributação	Valor sujeito a tributação	Imposto sobre importação (60%)	ICMS (18%)	Total
ESP32 <i>flight controller</i> v2.0	R\$ 302,57	R\$ 930,77	R\$ 558,46	R\$ 268,06	R\$ 2.059,86
<i>Crazyflie</i> 2.1	R\$ -	R\$ 1.382,56	R\$ 829,54	R\$ 398,18	R\$ 2.610,27
<i>ESPcopter</i>	R\$ -	R\$ 553,66	R\$ 332,20	R\$ 159,45	R\$ 1.045,31

Fonte: Autor.

Como pode-se notar, ambas as placas de desenvolvimento tiveram um enorme aumento em seu valor final que quase alcançou o dobro do custo inicial sem tributação. Vale ressaltar que o valor sujeito a tributação referente ao projeto do ESP32 *flight controller* v2.0 pode não ser este valor, uma vez que é estipulado pela JLCPCB na hora do envio. Onde ao final o preço declarado costuma ser inferior quando o pedido é realizado por pessoa física, contornando na grande maioria dos países inclusive o Brasil os impostos sobre importação. No entanto, foi inserido o valor total do serviço prestado pela JLCPCB simulando o pior dos casos e com o devido imposto de importação.

Ainda analisando a Tabela 13, pode-se notar que o *ESPcopter* é placa com o menor custo de aquisição, ficando próximo a metade dos custos das demais placas de desenvolvimento. Entretanto, como visto em 2.4.2 o *ESPcopter* é a placa de desenvolvimento que possui menos recursos, limitando a quantidade de possibilidades de uso. Já a placa de desenvolvimento *Crazyflie 2.1* está noutro extremo, sendo a de maior custo de aquisição, e por último o projeto desenvolvido neste trabalho, o ESP32 *flight controller* v2.0. Projeto este que possui custo intermediário quando comparados aos seus concorrentes, apenas se for contabilizado os impostos sobre importação. Note que neste valor sujeito a tributação inclui a fabricação de 5 PCIs e a montagem de 2 placas do ESP32 *flight controller* v2.0, logo tem-se uma placa sobressalente para uso.

Observe que, se dobrar a quantidade de peças para a conclusão de uma segunda placa de desenvolvimento e contabilizar o imposto de importação temos o resultado da Tabela 14 abaixo. Tabela que demonstra o comparativo para o custo de aquisição de duas unidades para cada modelo, onde o custo de aquisição de duas unidades do projeto ESP32 *flight controller* v2.0 torna-se R\$ 2.362,43, valor este menor que a metade do custo de aquisição de seu principal concorrente, o *Crazyflie 2.1*. Em contra partida, o *ESPcopter* ainda continua sendo a placa de desenvolvimento de menor custo de aquisição.

Tabela 14: Comparativo do custo de aquisição para dois mini drones.

Item	Valor isento de tributação	Valor sujeito a tributação	Imposto sobre importação (60%)	ICMS (18%)	Total
ESP32 <i>flight controller</i> v2.0	R\$ 605,14	R\$ 930,77	R\$ 558,46	R\$ 268,06	R\$ 2.362,43
<i>Crazyflie 2.1</i>	R\$ -	R\$ 2.765,12	R\$ 1.659,07	R\$ 796,36	R\$ 5.220,56
<i>ESPcopter</i>	R\$ -	R\$ 1.107,32	R\$ 664,39	R\$ 318,91	R\$ 2.090,62

Fonte: Autor.

Ao analisar para uma quantidade superior a 2 unidades, o projeto desenvolvido neste trabalho começa a mostrar o seu potencial, visto que há um maior desconto ao confeccionar

quantidades maiores na JLCPCB. Assim, foi realizado mais uma comparação, porém desta vez para o custo de aquisição de 5 unidades, comparação que pode ser vista na Tabela 15 abaixo.

Tabela 15: Comparação do custo de aquisição para 5 mini drones

Item	Valor isento de tributação	Valor sujeito a tributação	Imposto sobre importação (60%)	ICMS (18%)	Total
ESP32 <i>flight controller</i> v2.0	R\$ 1.512,85	R\$ 1.146,09	R\$ 687,65	R\$ 330,07	R\$ 3.676,67
<i>Crazyfly</i> 2.1	R\$ -	R\$ 6.912,80	R\$ 4.147,68	R\$ 1.990,89	R\$ 13.051,37
<i>ESPcopter</i>	R\$ -	R\$ 2.768,30	R\$ 1.660,98	R\$ 797,27	R\$ 5.226,55

Fonte: Autor.

Como pode ser visto, para quantidades iguais ou superiores a 5, o projeto apresenta uma ótima relação custo/benefício, superando até o *ESPcopter*, que nas comparações anteriores era o que contava com o menor custo de aquisição. Desta forma, pode-se concluir que o projeto desenvolvido neste trabalho possui um grande potencial, principalmente quando a proposta é a aquisição de um número maior que 1 unidade. Chegando a superar em 354,9 % o seu principal concorrente, o *Crazyfly* 2.1 para a aquisição de 5 unidades.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi abordado os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, passando pela etapa de testes e avaliação, experiências adquiridas, características e comparação com os seus demais concorrentes do nicho, bem como, um breve comparativo de custo de aquisição. Na qual mostrou-se que é possível o desenvolvimento de um projeto que proporciona maiores possibilidades de uso, num preço mais acessível que os seus principais concorrentes. No próximo capítulo, será abordado o encerramento deste trabalho, seguido das contribuições e apresentação de possíveis melhorias para trabalho futuro.

6 CONCLUSÃO, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho possuiu como tema o projeto de uma placa de desenvolvimento para mini *drone* com a finalidade de ser utilizado como ferramenta de pesquisa e educacional pela própria universidade. Ao longo do trabalho foram descritos os principais conceitos teóricos dando ao leitor a base para um bom entendimento e logo após aprofundando de forma mais específica no processo de desenvolvimento do projeto. Com o levantamento de requisitos, desenvolvimento do esquema elétrico, layout da PCI, geração dos arquivos de fabricação e finalizando com a criação de um pedido de confecção e montagem no site da JLCPCB.

Onde além de guiar o leitor pelo processo de desenvolvimento, foram relatados alguns problemas que aconteceram no decorrer do projeto, muitos deles relacionados a parte de DFM. Esta que cabe aqui ressaltar mais uma vez de manter sempre o projeto alinhado com as regras de *design* da empresa escolhida para realizar o trabalho de confecção e montagem. E também destacar a grande dificuldade de encontrar empresas com tecnologia e capacitação para a fabricação e montagem de placas de circuito impresso no nosso país, este que precisa ainda de muita evolução.

Como contribuição todo o projeto estará disponível para uso, bem como para modificações e melhorias pela comunidade acadêmica da UFU campus Patos de Minas. O desenvolvimento de um *drone* é por si só bastante complexo e deve ser quebrado em algumas etapas, sendo esta etapa dada como o ponta pé inicial para que as outras etapas do desenvolvimento sejam concluídas. Desta forma, têm-se como trabalhos futuros:

- Realizar a confecção da placa de circuito impresso, montagem e validação de seu funcionamento: Etapa que ainda não foi executada, até a publicação deste trabalho.
- Adquirir peças: Motores, baterias, hélices, *frame*, carregadores de bateria.
- Modelagem do algoritmo de controle: Modelagem matemática do sistema de controle.
- Desenvolvimento e implementação do *firmware*: Etapa que irá implementar o controle PID realimentando-o com os dados dos sensores e possibilitando o seu controle por algum meio de comunicação sem fio.
- Desenvolvimento de módulos de expansão: Criação de módulos de expansão para serem acoplados no projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] D. F. Wolf, F. S. Osório, E. Simões, and J. J. S. J. d. A. e. I. Trindade, "*Intelligent Robotics: From Simulation to Real World Applications*, SBC-JAI 2009-Congresso da SBC–Sociedade Brasileira de Computação (Brasil)," pp. 279-330, 2009.
- [2] S. Kim and D. Tilbury, "*Mathematical modeling and experimental identification of a model helicopter*," in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and EXhibit*, 1998, p. 4357.
- [3] A. Dzul, P. Castillo, and R. Lozano, "*Modelling and Control of Mini-Flying Machines. AIC Advances in Industrial Control*," ed: Springer, 2005.
- [4] D. Floreano and R. J. J. N. Wood, "*Science, technology and the future of small autonomous drones*," vol. 521, no. 7553, p. 460, 2015.
- [5] L. L. Lopes, A. S. Brandao, M. Sarcinelli Filho, and R. Carelli, "Modelagem e validação de um quadrimotor ar. drone parrot," in *International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition*, 2013.
- [6] D. Mellinger, N. Michael, M. Shomin, e V. Kumar, "*Recent advances in quadrotor capabilities*," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 2964-2965: IEEE.
- [7] S. Lupashin, A. Schöllig, M. Sherback, and R. D'Andrea, "*A simple learning strategy for high-speed quadrocopter multi-flips*," em *2010 IEEE international conference on robotics and automation*, 2010, pp. 1642-1648: IEEE.
- [8] A. Technologies. *AscTec Hummingbird*. Disponível em: <http://www.asctec.de/en/uav-uas-drones-rpas-roav/asctec-hummingbird/>
- [9] iRobot. *iRobot Roomba 614*. Disponível em: <https://www.irobotloja.com.br/roomba-614-robo-aspirador-de-po-inteligente-bivolt-irobot-p/p?idsku=397>
- [10] Honda. (23/09/2019). *Honda Asimo*. Disponível em: <https://asimo.honda.com/default.aspx>
- [11] B. Dynamics. (23/09/2019). *BigDog*. Disponível em: <https://www.bostondynamics.com/bigdog>
- [12] M. Müller, S. Lupashin, and R. D'Andrea, "*Quadrocopter ball juggling*," em *2011 IEEE/RSJ international conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 5113-5120: IEEE.
- [13] R. J. C. L. Clarke and S. Review, "*Understanding the drone epidemic*," vol. 30, no. 3, pp. 230-246, 2014.
- [14] R. N. Abutalipov, Y. V. Bolgov, e H. M. Senov, "*Flowering plants pollination robotic system for greenhouses by means of nano copter (drone aircraft)*," em *2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS)*, 2016, pp. 7-9: IEEE.
- [15] P. Neumann, M. Bartholmai, J. H. Schiller, B. Wiggerich, e M. Manolov, "*Micro-drone for the characterization and self-optimizing search of hazardous gaseous substance sources: A new approach to determine wind speed and direction*," em *2010 IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments*, 2010, pp. 1-6: IEEE.
- [16] J. A. Preiss, W. Honig, G. S. Sukhatme, e N. Ayanian, "*Crazyswarm: A large nano-quadcopter swarm*," em *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 3299-3304: IEEE.
- [17] BitCraze. (23/09/2019). *Crazyflie 2.1*. Disponível em: <https://www.bitcraze.io/crazyflie-2-1/>
- [18] A. A. Santos, V. C. Cardoso, and L. P. J. S. I. da Silva Carvalho, "Automação de vôo e calibração de sensores e controladores para um drone de baixo custo," 2015.

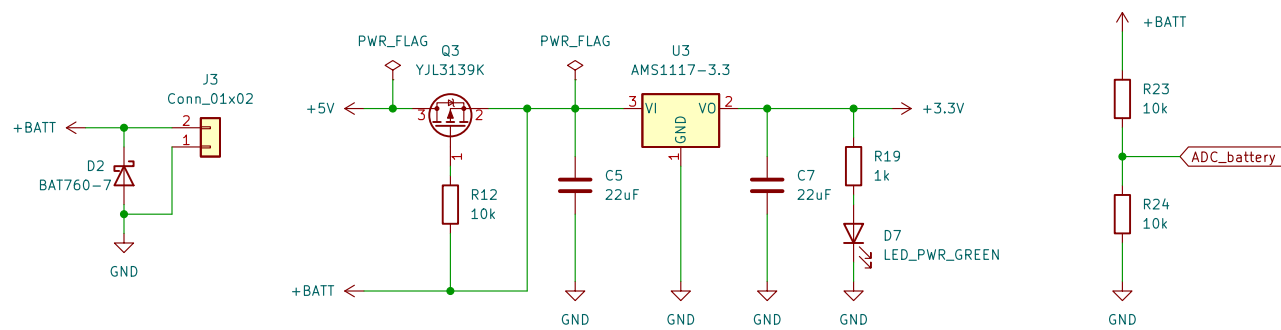
- [19] D. M. d. Conceição, "Uso de Drone autônomo para auxílio na comprovação de alarmes," 2019.
- [20] A. Kushleyev, D. Mellinger, C. Powers, e V. J. A. R. Kumar, "Towards a swarm of agile micro quadrotors," vol. 35, no. 4, pp. 287-300, 2013.
- [21] R. Robotics. (27/10/2019). *Tello-EDU*. Disponível em: <https://www.ryzero.com/tello-edu>
- [22] ESPcopter. (2019, 27/10/2019). *Micro drone baseado no ESP*. Disponível em: <https://espcopter.com/>
- [23] J. G. J. s. U. o. M. Leishman, Disponível em: <http://terpconnect.umd.edu/~leishman/Aero/history.html>, "A history of helicopter flight," 2000.
- [24] Aviastar. (1956, 29/09). *Convertawings Model A Quadrotor*. Disponível em: http://www.aviastar.org/helicopters_eng/convertawings.php
- [25] Xdrones. (29/09). *Classificação de drones*. Disponível em: <https://www.xdrones.es/tipos-de-drones-clasificacion-de-drones-categorias-de-drones/>
- [26] A. Juniper, *The complete guide to drones*. Hachette UK, 2018.
- [27] D. McGriffy, *Make: drones: teach an Arduino to fly*. Maker Media, Inc., 2016.
- [28] A. S. R. Ferreira, "Modelização, controlo e planeamento de trajetórias para veículos aquáticos," 2009.
- [29] E. J. L. d. S. OLIVEIRA, Flávio Rogério da; BARBOSA, Luis Filipe Wiltgen, "Dispositivo inercial baseado em giroscópio para aplicação em robótica," 2008.
- [30] J. B. Scarborough, *The Gyroscope*. Interscience Publishers Limited, 1958.
- [31] F. G. d. Silva, "Reconhecimento de movimentos humanos utilizando um acelerômetro e inteligência computacional," Universidade de São Paulo, 2013.
- [32] E. BRASILEIRO e T. A. R. GABRIEL, "DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE NAVEGAÇÃO DE BAIXO CUSTO DE VEÍCULO TERRESTRE NÃO TRIPULADO."
- [33] T. R. S. DOS SANTOS, "INTEGRAÇÃO DE UM VANT," 2015.
- [34] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, e J. Collins, *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [35] Beitian. (2019, 27/10/2019). *Micro module GPS BS-180* Disponível em: <http://www.sz-beitian.com/welcomeEng>
- [36] F. K. I. All. (2019, 01/11/2019). *FREESTYLE FRAMES RACING FRAMES*. Disponível em: <https://www.fpvknowitall.com/ultimate-fpv-shopping-list-frame>
- [37] AstroX. (2019, 03/11/2019). *The New AstroX TrueXS*. Disponível em: http://astrox.kr/product/the-new-astrox-truexs-stretched-x-wo-pdb/417/?cate_no=31&display_group=1
- [38] L. S. B. de Moura, "Drone de combate aos incêndios florestais," 2019.
- [39] R. E. Ribeiro, "STT-um Sistema para Telemetria e Telecomando de aeronaves do projeto ARARA," Universidade de São Paulo, 2000.
- [40] D.-F.-. RACER. (2019, 03/11/2019). *Radio FrSky Taranis QX7*. Disponível em: <https://www.drone-fpv-racer.com/en/radio-frsky-taranis-q-x7-1600.html>
- [41] G. Basso, "Proposta para fornecimento de potência a um drone multirotor através de motor a combustão interna," 2017.
- [42] P. Bimbhra, *Generalized theory of electrical machines*. Khanna, 1987.
- [43] H. C. Demolinari, "Projeto de construção um drone hexacóptero," 2016.
- [44] F. C. I. Ferreira, "Riscos de incêndio associado a baterias," 2017.
- [45] (2022, 26/06/2022). *Placas de Desenvolvimento*. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/categoria/placas-de-desenvolvimento/>

- [46] M. Banzhi and M. Shiloh, *Getting started with Arduino: the open source electronics prototyping platform*. Maker Media, Inc., 2014.
- [47] Arduino. (2019, 03/11/2019). *O que é arduino?* Disponível em: <https://www.arduino.cc/>
- [48] (23/07/2022). *Arduino Pro Mini*. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/retired/boards/arduino-pro-mini>
- [49] (26/06/2022). As Melhores Placas De Desenvolvimento Eletrônico Para Criar Seu Primeiro Projeto Sozinho. Disponível em: <https://www.dz-techs.com/pt/best-development-boards>
- [50] (2022, 26/06/2022). *Nodemcu-32s Development Board*. Disponível em: https://docs.ai-thinker.com/en/esp32-s_development_board
- [51] Bitcraze. (23/07/2022). *Datasheet Crazyflie 2.1 - Rev 3*. Disponível em: https://www.bitcraze.io/documentation/hardware/crazyflie_2_1/crazyflie_2_1-datasheet.pdf
- [52] BitCraze. (23/07/2022). *AI deck 1.1*. Disponível em: <https://www.bitcraze.io/products/ai-deck/>
- [53] (25/07/2022). *Wi-Fi Module Pinouts*. Disponível em: <https://tasmota.github.io/docs/Pinouts/>
- [54] C. A. Rigo, "Projeto de placas de circuito impresso com FPGAs para uso em ambiente espacial," 2019.
- [55] (06/07/2022). *PCB Basics*. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pcb-basics/all>
- [56] (2021, 06/07/2022). *What is a PCB Stencil?* Disponível em: <https://www.pcbdirectory.com/community/what-is-a-pcb-stencil>
- [57] (06/07/2022). *PCB Panelization*. Disponível em: <https://support.jlcpb.com/article/49-pcb-panelization>
- [58] C. B. J. E. d. a.-C. d. A. LIMA, "Técnicas de projetos eletrônicos com os microcontroladores avr," 2010.
- [59] A. C. d. O. P. Jr, F. L. de Sousa, e V. Vlassov, "UM ESTUDO PARA A SELEÇÃO E POSICIONAMENTO ÓTIMO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO PARA APLICAÇÃO ESPACIAL UTILIZANDO ALGORITMOS EVOLUTIVOS."
- [60] D. L. J. J. t. Jones, "*PCB design tutorial*," vol. 3, p. 25, 2004.
- [61] F. Sacco. (2015, 10/07/2022). *Os 10 mandamentos da PCB*. Disponível em: <https://embarcados.com.br/10-mandamentos-da-pcb/>
- [62] (16/06/2022). *MultiWii*. Available: <http://www.mutiwii.com/>
- [63] (26/07/2022). *PCB Manufacturing & Assembly Capabilities*. Disponível em: <https://jlcpb.com/capabilities/pcb-capabilities>
- [64] Espressif. (2022, 09/08/2022). *ESP32-Core-Board-V2_sch*. Disponível em: https://dl.espressif.com/dl/schematics/ESP32-Core-Board-V2_sch.pdf
- [65] (2020, 11/08/2022). *KiCad 5.99 ERC: Library symbol "xxxx" has been modified. How to solve*. Disponível em: <https://forum.kicad.info/t/kicad-5-99-erc-library-symbol-xxxx-has-been-modified-how-to-solve/25356>
- [66] Espressif. (2022, 22/11/2022). *Hardware Design Guidelines*. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_hardware_design_guidelines_en.pdf
- [67] JLCPCB. (2022, 18/08/2022). *How to generate Gerber and Drill files in KiCad 6*. Disponível em: <https://support.jlcpb.com/article/194-how-to-generate-gerber-and-drill-files-in-kicad-6>

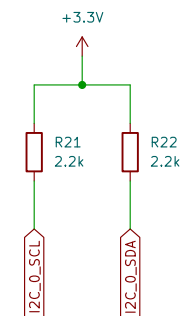
- [68] JLCPCB. (2020, 17/08/2022). *How to generate the BOM and Centroid file from KiCAD*. Disponível em: <https://support.jlpcb.com/article/84-how-to-generate-the-bom-and-centroid-file-from-kicad>
- [69] S. Labs. (2022, 09/08/2022). *USBXpress™ Family CP2102N Data Sheet*. Disponível em: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/cp2102n-datasheet.pdf>

APÊNDICE A

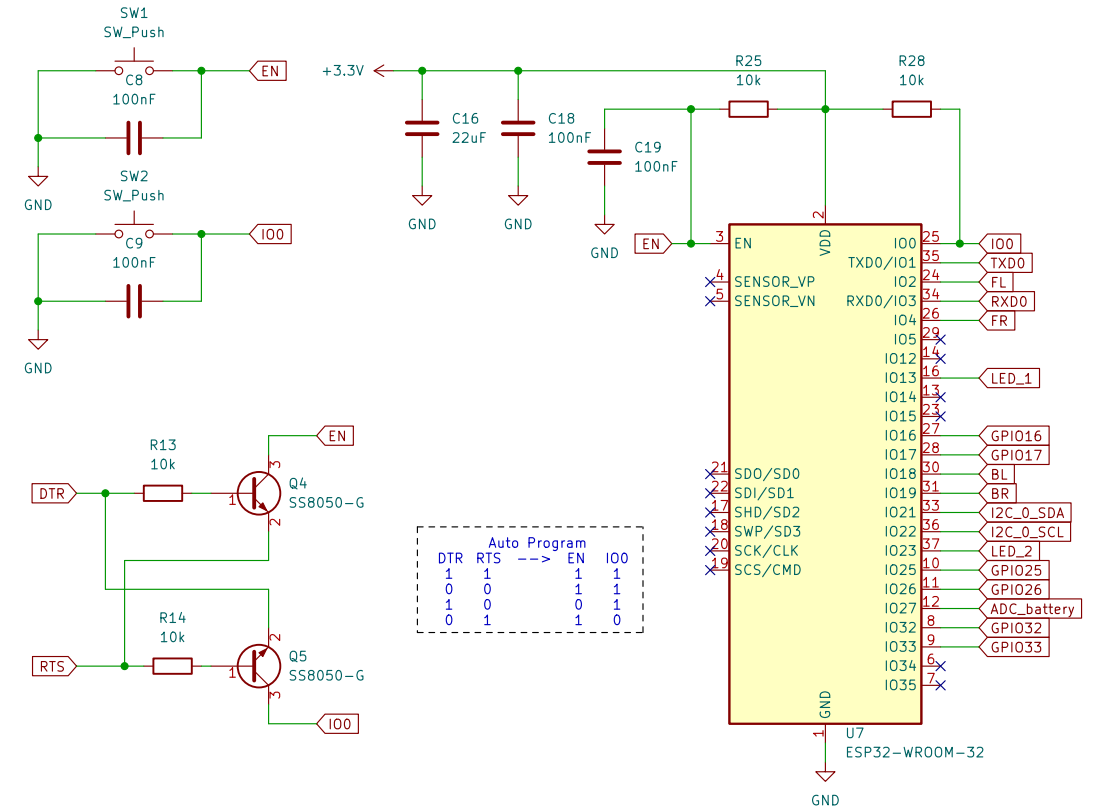
Alimentação



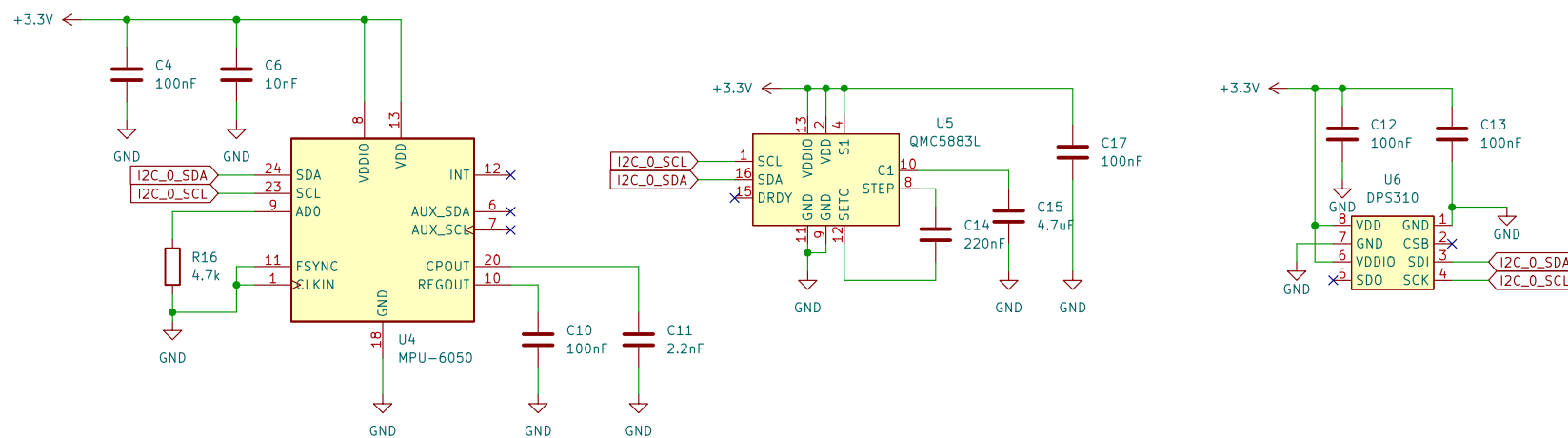
I2C BUS



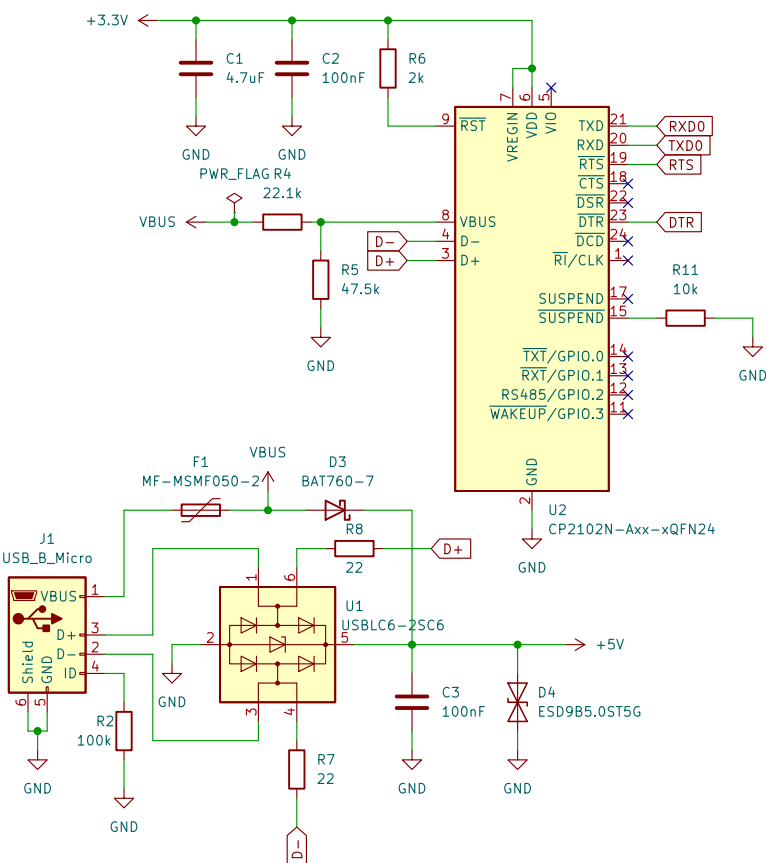
ESP32



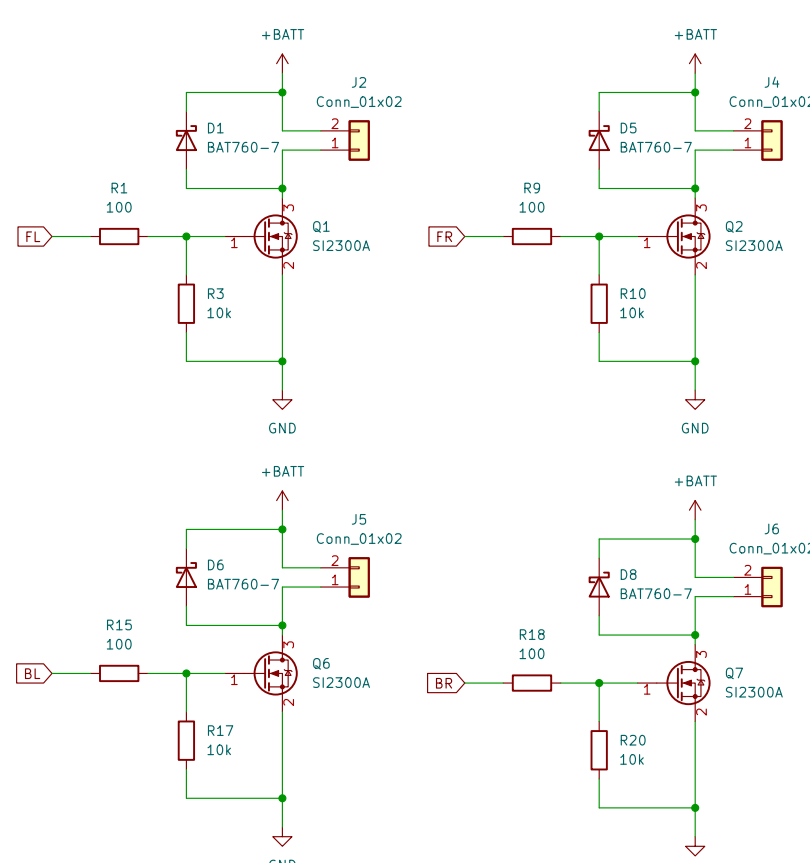
Sensores



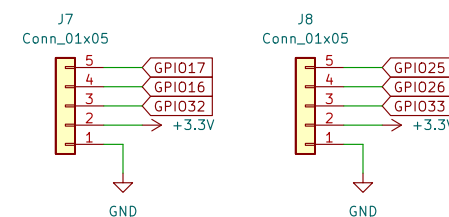
USB



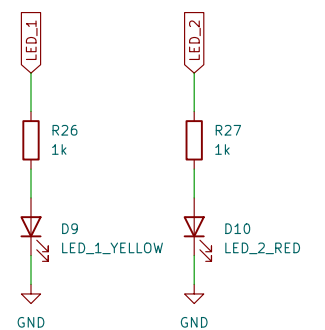
Circ. de Potência



Deck de Expansão



LEDs



Apêndice B

Comment	Designator	Footprint	JLCPCB Part #
4.7uF	C1, C15	Capacitor_SMD:C_0603_1608Metric	C2918512
100nF	C2, C3, C4, C8, C9, C10, C12, C13, C17, C18, C19	Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric	C513772
22uF	C5, C7, C16	Capacitor_SMD:C_0805_2012Metric	C513764
10nF	C6	Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric	C60133
2.2nF	C11	Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric	C106861
220nF	C14	Capacitor_SMD:C_0402_1005Metric	C326836
BAT760-7	D1, D2, D3, D5, D6, D8	Diode_SMD:D_SOD-323	C124187
ESD9B5.0ST5G	D4	Diode_SMD:D_SOD-923	C316040
LED_PWR_GREEN	D7	LED_SMD:LED_0402_1005Metric	C50950
LED_1_YELLOW	D9	LED_SMD:LED_0402_1005Metric	C50950
LED_2_RED	D10	LED_SMD:LED_0402_1005Metric	C397045
MF-MSMF050-2	F1	Fuse:Fuse_1812_4532Metric	C17313
USB_B_Micro	J1	Connector_USB:USB_Micro-B_Molex_47346-0001	C132560
Conn_01x02	J2, J3, J4, J5, J6	Connector_Wire:SolderWire-0.5sqmm_1x02_P4.8mm_D0.9mm_OD2.3mm	
Conn_01x05	J7, J8	Connector_PinSocket_2.54mm:PinSocket_1x05_P2.54mm_Vertical	C50950
SI2300A	Q1, Q2, Q6, Q7	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	C347480
YJL3139K	Q3	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	C919404
SS8050-G	Q4, Q5	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23	C164885
100	R1, R9, R15, R18	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C106232
100k	R2	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C60491
10k	R3, R10, R11, R12, R13, R14, R17, R20, R23, R24, R25	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C144807
22.1k	R4	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C226356
47.5k	R5	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C227098
2k	R6	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C60488
22	R7, R8	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C114765
4.7k	R16	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C105871
1k	R19, R26, R27	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C144789
2.2k	R21, R22	Resistor_SMD:R_0402_1005Metric	C114762
SW_Push	SW1, SW2	Button_Switch_SMD:SW_Push_SPST_NO_Alps_SKRK	C843669
USBL6-2SC6	U1	Package_TO_SOT_SMD:SOT-23-6	C7519
CP2102N-Axx-xQFN24	U2	Package_DFN_QFN:QFN-24-1EP_4x4mm_P0.5mm_EP2.6x2.6mm	C969151
AMS1117-3.3	U3	Package_TO_SOT_SMD:SOT-223-3_TabPin2	C351784
MPU-6050	U4	Sensor_Motion:InvenSense_QFN-24_4x4mm_P0.5mm	C24112
QMC5883L	U5	Package_LGA:LGA-16_3x3mm_P0.5mm	C976032
DPS310	U6	Package_LGA:Bosch_LGA-8_2x2.5mm_P0.65mm_ClockwisePinNumbering	C130156
ESP32-WROOM-32	U7	RF_Module:ESP32-WROOM-32	C82899

Apêndice C

Designator	Mid X	Mid Y	Layer	Rotation
C1	156,970000	-103,660000	top	-90
C2	154,580000	-104,230000	top	-90
C3	153,720000	-102,120000	top	90
C4	147,640000	-96,520000	top	90
C5	138,140000	-101,640000	top	90
C6	146,580000	-96,520000	top	90
C7	140,230000	-101,630000	top	90
C8	132,225000	-87,020000	top	90
C9	156,600000	-85,920000	top	-90
C10	144,470000	-96,530000	top	90
C11	141,740000	-101,940000	top	90
C12	141,720000	-98,980000	top	-90
C13	142,560000	-96,590000	top	0
C14	130,575000	-96,275000	top	-90
C15	135,900000	-101,550000	top	-90
C16	133,800000	-86,250000	top	-90
C17	134,005000	-102,475000	top	0
C18	132,639411	-78,560589	top	-135
C19	134,160589	-80,139411	top	-135
D1	163,000000	-113,000000	top	-135
D2	135,800000	-110,240000	top	180
D3	152,410000	-104,170000	top	180
D4	154,700000	-102,270000	top	-90
D5	127,000000	-113,000000	top	-45
D6	163,000000	-77,000000	top	135
D7	128,800000	-104,600000	top	180
D8	127,000000	-77,000000	top	45
D9	161,100000	-94,200000	top	0
D10	161,117500	-91,025000	top	0
F1	148,760000	-106,352500	top	90
J1	151,150000	-112,300000	top	0
Q1	158,337087	-108,500000	top	-45
Q2	131,552913	-108,377087	top	-135
Q3	135,710000	-106,062500	top	90
Q4	129,137500	-100,150000	top	0
Q5	160,772500	-99,050000	top	180
Q6	158,460000	-81,510000	top	45
Q7	131,572913	-81,592913	top	135
R1	160,490624	-106,759376	top	-135
R2	156,680000	-111,020000	top	90
R3	161,220000	-107,510000	top	45
R4	150,530000	-102,120000	top	90
R5	149,450000	-102,110000	top	-90
R6	155,650000	-104,210000	top	-90
R7	152,670000	-102,110000	top	-90
R8	151,580000	-102,110000	top	90
R9	132,889376	-104,389376	top	-45
R10	132,764376	-105,839376	top	135
R11	148,370000	-102,110000	top	90
R12	135,680000	-108,620000	top	180
R13	130,110000	-97,900000	top	0
R14	159,810000	-101,400000	top	180
R15	155,954000	-80,624624	top	45
R16	145,530000	-96,520000	top	90
R17	155,956000	-78,994000	top	45
R18	130,039376	-83,339376	top	-45
R19	128,800000	-103,500000	top	0
R20	128,460624	-83,360624	top	135
R21	148,760000	-97,890000	top	90
R22	148,740000	-99,900000	top	-90
R23	129,110000	-90,000000	top	0
R24	129,100000	-88,900000	top	180
R25	133,939376	-78,760624	top	45
R26	161,115000	-93,125000	top	180
R27	161,110000	-92,075000	top	180
SW1	128,900000	-86,200000	top	0
SW2	161,200000	-86,300000	top	180
U1	153,000000	-107,262500	top	90
U2	152,380000	-98,350000	top	90
U3	141,920000	-107,060000	top	180
U4	145,000000	-100,200000	top	180
U5	136,675000	-97,825000	top	180
U6	139,790000	-97,375000	top	90
U7	145,000000	-85,000000	top	0