

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**ANDRESSA PRATS DA SILVA
JEFERSON HENRIQUE FIORINDO**

RETROFIT DE IMPRESSORA 3D: MODERNIZAÇÃO DE UMA CUBEX DUO

**CURITIBA
2020**

**ANDRESSA PRATS DA SILVA
JEFERSON HENRIQUE FIORINDO**

RETROFIT DE IMPRESSORA 3D: MODERNIZAÇÃO DE UMA CUBEX DUO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Valter Klein Junior

Coorientadora: Eng. Tyene Zoraski Zanella

**CURITIBA
2020**

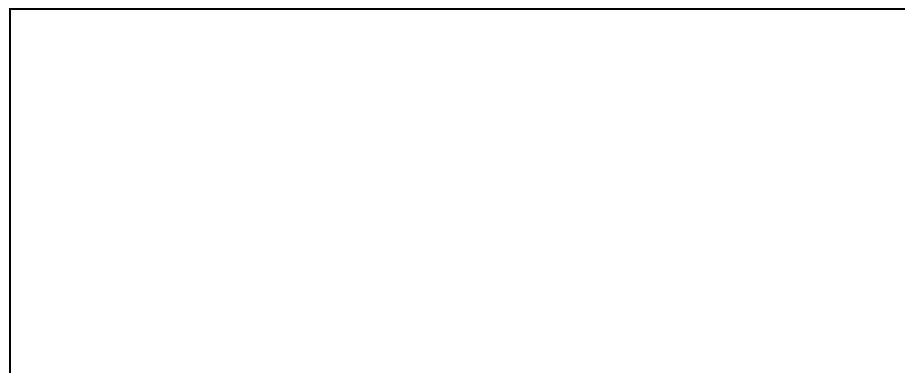
**Página reservada para ficha catalográfica que deve ser confeccionada após
apresentação e alterações sugeridas pela banca examinadora.
Deve ser impressa no verso da folha de rosto.**

A Biblioteca da PUCPR oferece o serviço gratuitamente.

Para solicitar, necessário enviar o trabalho para o email

biblioteca.processamento@pucpr.br

Em até 48h a ficha será encaminhada para o email do solicitante.



**ANDRESSA PRATS DA SILVA
JEFERSON HENRIQUE FIORINDO**

RETROFIT DE IMPRESSORA 3D: MODERNIZAÇÃO DE UMA CUBEX DUO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Me. Valter Klein Junior
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Professor Dr. Gilberto Reynoso Meza
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Professor Dr. Roberto Zanetti Freire
Pontifícia Universidade Católica do Paraná

Curitiba, ____ de _____ de 2020.

Dedicamos este trabalho aos nossos
familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos nossos familiares pelo apoio, paciência, compreensão e carinho durante todo o período que percorremos durante a graduação.

Aos nossos amigos pela ajuda, apoio, risadas, companheirismo e paciência durante todas as dificuldades enfrentadas.

Aos professores que de alguma forma participaram deste percurso, por todo conhecimento, auxílio e paciência.

Ao curso de Engenharia de Controle e Automação, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas e a Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pelo auxílio na aquisição dos equipamentos e disponibilização da impressora 3D CubeX Duo para o projeto.

A mudança é um processo
essencial a toda existência.

(Jornada nas Estrelas, 1969)

RESUMO

Com a quarta revolução industrial, também conhecida como indústria 4.0, muitos equipamentos tornaram-se obsoletos, deixando de atender as demandas de mercado, embutindo grandes despesas em sua manutenção e funcionamento, causando atraso na evolução das empresas e indústrias. Com o mercado composto em sua maioria por pequenas e médias empresas, a aquisição de equipamentos novos torna-se inviável financeiramente, pois muitas vezes possuem capital limitado para investimentos. A Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR) possui uma impressora 3D CubeX Duo inutilizada por conta de sua tecnologia obsoleta, que fornece uma qualidade inferior de impressão quando comparada a impressoras atuais do mercado e ainda possui limitações quanto a utilização de matéria prima, agregando alto custo unitário na peça. Com base nesse cenário, este trabalho propõe a aplicação da técnica *retrofit*, que visa atualizar o equipamento, buscando otimização e aumento de sua vida útil com custo reduzido. Além da aplicação do conceito de RepRap (*Replicating Rapid-Prototyper*), que consiste na auto replicação, isso é, o equipamento deve ser capaz de replicar as próprias peças, para a avaliação e seleção de componentes necessários para sua reformulação. Portanto, o projeto visa entregar para uso acadêmico uma impressora 3D atualizada, com alta confiabilidade, de fácil manutenção e possibilidade de trabalhar com filamentos convencionais disponíveis no mercado, diminuindo o gasto atrelado. A inclusão de um novo equipamento de prototipagem rápida, de uso comum, possibilitará o aumento da capacidade de atendimento às demandas de projeto, reduzindo o tempo de espera para a confecção de protótipos e no desenvolvimento de modelos para validações de estudos e pesquisas científicas. Além disso, o projeto visa a criação de um material para futuras consultas, que poderá servir de auxílio para implementação do *retrofit* em outras impressoras.

Palavras-chave: *Retrofit*. RepRap. Impressora 3D. Industria 4.0. Manufatura Aditiva.

ABSTRACT

With the fourth industrial revolution, also known as industry 4.0, machines have become obsolete, failing to meet the demands of the market by embedding large expenses in their maintenance and operation, causing delays in the evolution of companies and industries. With the market composed mostly of small and medium-sized companies, the acquisition of new equipment becomes financially unfeasible, as they often have limited capital for investments. The Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR) has an unused CubeX Duo 3D printer due to its obsolete technology, which provides lower print quality when compared to current printers on the market and still has limitations regarding the use of raw materials, adding a high unit cost. Based on this scenario, this work proposes the application of the retrofit technique, which aims to update the equipment, seeking optimization, and increasing its useful life at a reduced cost. In addition to the application of the RepRap (Replicating Rapid-Prototyper) concept, which consists of self-replication, that is, the equipment must be able to replicate its parts, for the evaluation and selection of components necessary for its reformulation. Therefore, the project aims to deliver for academic use an updated 3D printer, with high reliability, easy maintenance, and the possibility of working with conventional filaments available on the market, reducing the aggregate cost. The inclusion of new rapid prototyping equipment, in common use, will make it possible to increase the capacity to meet project demands, reducing the waiting time for making prototypes and developing models to validate studies and scientific researches. Besides that, the project aims to create material for future consultations, which can serve as an aid for implementing the retrofit on other printers.

Key-words: *Retrofit. RepRap. 3D Printer. Industry 4.0. Additive Manufacturing.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Etapas da metodologia aplicada.	21
Figura 2: Integração dos marcos com as etapas do cronograma.	22
Figura 3: Representação genérica do princípio de funcionamento do processo da manufatura.	28
Figura 4: Esquemático do processo FDM.	32
Figura 5: Movimento plano x – y.	32
Figura 6: Movimento eixo z.	33
Figura 7: Primeira impressora RepRap, Darwin.	36
Figura 8: Modelo de extrusor do tipo Bowden versus modelo extrusão direta.	37
Figura 9: Diferentes modelos de <i>hotends</i> , indicados para projetos RepRap.	38
Figura 10: <i>Display LCD2004</i> .	51
Figura 11: <i>Display LCD12864</i> da Makerbase.	52
Figura 12: Modelo TFT24 da BigtreeTech.	52
Figura 13: <i>Display</i> <td>53</td>	53
Figura 14: Cubo de calibração XYZ.	55
Figura 15: Torre de calibração de temperatura.	55
Figura 16: Teste de nivelamento da mesa.	56
Figura 17: Modelo teste Benchy.	56
Figura 18: Primeiro teste de impressão utilizando <i>software</i> CubeX.	57
Figura 19: Tela configuração do código inicial.	58
Figura 20: Tela configuração do código final.	59
Figura 21: Tela de configuração das velocidades.	59
Figura 22: Segundo teste utilizando o <i>software</i> de terceiros.	60
Figura 23: Modelo CAD da impressora original completa.	61
Figura 24: Modelo CAD da impressora original, sem proteção exterior.	61
Figura 25: Vista explodida, carro de impressão.	62
Figura 26: <i>Hotends</i> da impressora CubeX Duo.	63
Figura 27: <i>Display</i> impressora CubeX Duo.	63
Figura 28: Posição cartuchos.	64
Figura 29: Posicionamento Coolers.	65
Figura 30: Vista isométrica dos adaptadores de fixação para o hotend.	67

Figura 31: Vista isométrica do suporte projetado para a fixação da fonte de alimentação.....	67
Figura 32: Vista isométrica suporte para controladora Rumba.	68
Figura 33: Vista isométrica do suporte projetado para o display.....	68
Figura 34: Vista isométrica das peças projetadas para o suporte do filamento.	68
Figura 35: Vista isométrica do suporte projetado para o relé de estado sólido.	69
Figura 36: Vista Isométrica suporte projetado para o BLTouch.....	69
Figura 37: Vista isométrica do suporte ao conector de energia.	70
Figura 38: Vista isométrica do suporte para o <i>cooler</i> de resfriamento da peça.....	70
Figura 39: Vista isométrica das guias de posicionamento da mesa.	70
Figura 40: Vista isométrica do logo da PUCPR.....	71
Figura 41: Rumba Plus.....	71
Figura 42: <i>Driver</i> DRV8825.	72
Figura 43: Manta de aquecimento de silicone.....	72
Figura 44: Placa de cortiça.....	72
Figura 45: Espelho.	73
Figura 46: Relé de estado sólido.....	73
Figura 47: Peças que compõe o <i>hotend</i>	73
Figura 48: <i>Hotend</i>	74
Figura 49: Fonte.....	74
Figura 50: Sensor de nivelamento BLTouch.	74
Figura 51: Display Bigtreetech modelo TFT24.	75
Figura 52: Layout Rumba.....	77
Figura 53: Pontos de verificação da tensão de referência do drive DRV8825.	78
Figura 54: Gráfico dos ciclos de aquecimento.....	81
Figura 55: Gráfico do ciclo de aquecimento da mesa.	82
Figura 56: Tela para inclusão da impressora ao fatiador.	83
Figura 57: Configuração da impressora no fatiador.	84
Figura 58: Configuração extrusora no fatiador.	84
Figura 59: Menu fatiador Cura.....	85
Figura 60: Primeiro teste do cubo de calibração.	86
Figura 61: Segundo teste do cubo de calibração.	86
Figura 62: Terceiro teste do cubo calibração.	87
Figura 63: Dimensões físicas do cubo de calibração.	87

Figura 64: Primeiro teste de nivelamento da mesa	88
Figura 65: Segundo teste de nivelamento da mesa.	88
Figura 66: Primeira impressão teste Benchy.....	89
Figura 67: Segunda impressão teste Benchy.....	89
Figura 68: Impressão cancelada.	90
Figura 69: Extrusora original obstruída.	91
Figura 70: Impressão com erro por falta de aderência na base.	91
Figura 71: Primeiro protótipo adaptador do <i>hotend</i>	91
Figura 72: Protótipo inicial suporte BLTouch.....	92
Figura 73: Peça do suporte de filamento quebrado.....	92
Figura 74: Componentes <i>hotend</i>	93
Figura 75: Suporte final da fonte.	94
Figura 76: Suporte final relé térmico de estado sólido.	94
Figura 77: Suporte final display.....	95
Figura 78: Suporte final para a controladora Rumba.....	95
Figura 79: Suporte final conector elétrico.	95
Figura 80:Suporte para o <i>cooler</i> de resfriamento da peça.	96
Figura 81: Guias de posicionamento da mesa.	96
Figura 82: Suporte para o filamento.	96
Figura 83: Suporte final BLTouch.....	97
Figura 84: Vista isométrica suporte final BLTouch.	97
Figura 85: Disposição final dos componentes de controle e alimentação.	97
Figura 86: seleção modo display.....	98
Figura 87: Tela de inicialização do display modo Marlin.	98
Figura 88: Tela display desempenho da impressora.	99
Figura 89: Tela do display menu de movimento.	99
Figura 90: Tela display menu ajustes.....	99
Figura 91: Tela de inicialização modo display Touch.	100
Figura 92: Tela inicial.	100
Figura 93: Tela Menu.	101
Figura 94: Modo display Touch durante a impressão.....	102
Figura 95: Tela BabyStep.....	102
Figura 96: Tela "Mais".	102
Figura 97: Tela Octoprint.....	103

Figura 98: Resultado final da impressora.....	104
Figura 99: Resultado final da impressora sem caixa externa.....	105
Figura 100: Peça reimpressa.....	105
Figura 101: Comparação entre antes e depois, vista frontal, primeira peça impressa à esquerda, peça impressa após as modificações à direita.	105
Figura 102: Base das peças impressas, à esquerda primeira peça impressa, à direita peça impressa após as modificações na impressora.	106
Figura 103: Vista superior e exemplo de uso da primeira peça impressa.	106
Figura 104: Vista superior e exemplo de uso da peça impressa após implementação do retrofit.	106
Figura 105: Impressão de comparação entre materiais PLA (Branco) e ABS (Vermelho).....	107
 Quadro 1: Etapas do cronograma	22
 Equação 1: Cálculo da corrente de pico que drive DRV8825 fornecerá para o motor	77
Equação 2: Relação de passos por milímetro.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades térmicas dos termoplásticos mais usuais.....	34
Tabela 2: Custo aproximado controladoras.....	48
Tabela 3: Custo aproximado sensores de nivelamento.....	49
Tabela 4: Custo aproximado driver de motor	50
Tabela 5: Custo aproximado extrusora	51
Tabela 6: Custo aproximado display	53
Tabela 7: Ganhos PID do <i>hotend</i>	82
Tabela 8: Ganhos PID da mesa aquecida.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i>
EBM	<i>Electron-Beam Melting</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HDMI	<i>High-Definition Multimedia Interface</i>
IA	Inteligência Artificial
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
ME.	Mestre
MJM	<i>Multi-jet Modelling</i>
Mm	Milímetros
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NC	<i>Numeric Control</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PA	<i>Poliamida</i>
PBIH	<i>Powder Bed and Inkjet Head</i>
PC	Policarbonato
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>
PETG	<i>Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PP	<i>Plaster Powder</i>
PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná

RepRap	<i>Replicating Rapid-Prototyper</i>
Rx	Recepção
SHS	<i>Selective Heat Sintering</i>
SLA	<i>Stereo Lihography Apparatus</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
SSH	<i>Security Socket Shell</i>
TM	Temperatura de fusão
Tg	Temperatura Vítreia
TPU	<i>Thermoplastic Polyurethane</i>
Tx	Transmissão
UC	<i>Ultrasonic Consolidation</i>
USB	Universal Serial Bus
WIFI	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	MÉTODO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1	INDUSTRIA 4.0	24
2.2	MANUFATURA ADITIVA.....	27
2.3	MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)	31
2.4	IMPRESSORAS REPRAP	35
2.4.1	Componentes projeto RepRap.....	37
2.4.1.1	Extrusora	37
2.4.1.2	Placa de construção	38
2.4.1.3	Componentes eletrônicos	39
2.4.1.3.1	<i>Controladora.....</i>	39
2.4.1.3.2	<i>Motor de Passo</i>	40
2.4.1.3.3	<i>Driver para motor de passo</i>	40
2.4.1.3.4	<i>Sensor de Fim de Curso.....</i>	41
2.4.1.4	Software	42
2.4.1.4.1	Software CAD.....	42
2.4.1.4.2	Software CAM	43
2.4.1.4.3	Software de Controle.....	43
2.4.1.5	Firmware	43
3	METODOLOGIA	45
3.1	RETROFIT	45
3.1.1	Metodologia para a avaliação da impressora CubeX Duo	46
3.1.2	Metodologia para o desenvolvimento do projeto	46
3.1.3	Metodologia da implementação do projeto.....	54
3.1.4	Metodologia dos testes.....	54
4	APLICAÇÃO DO RETROFIT	57

4.1	AVALIAÇÃO DA IMPRESSORA CUBEX DUO	57
4.1.1	Avaliação de Software	57
4.1.2	Avaliação de Hardware	60
4.1.2.1	Main Board	62
4.1.2.2	Drivers para motores de passo.....	62
4.1.2.3	Hotend	62
4.1.2.4	Display.....	63
4.1.2.5	Mesa de impressão	64
4.1.2.6	Sensor de nivelamento.....	64
4.1.2.7	Cartuchos	64
4.1.2.8	Resfriamento da peça	65
4.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	65
4.3	COMPRA DE MATERIAIS	71
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	75
4.5	TESTES	85
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	90
5.1	DIFÍCULDADES ENCONTRADAS DURANTE A EXECUÇÃO DO PROJETO	90
5.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CONCEITO REPRAP	94
5.3	FUNCIONALIDADES DO DISPLAY	98
5.3.1	Modo display Marlin	98
5.3.2	Modo display Touch.....	100
5.4	FUNCIONALIDADES DO HOST	103
5.5	VANTAGEM DO USO DO FATIADOR CURA.....	104
5.6	ANÁLISE FINAL	104
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE A – CUSTOS	116
	APÊNDICE B – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE FIXAÇÃO HOTEND	118
	APÊNDICE C – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE DE FIXAÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO	122
	APÊNDICE D – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE CONTROLADORA RUMBA	123

APÊNDICE E – FOLHAS DESENHO TÉCNICO BASE INFERIOR SUPORTE DISPLAY	125
APÊNDICE F – FOLHAS DESENHO TÉCNICO PEÇA FRONTAL DISPLAY.....	127
APÊNDICE G – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE FILAMENTO	128
APÊNDICE H – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE DE FIXAÇÃO DO RELÉ DE ESTADO SOLIDO.....	129
APÊNDICE I – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE DO SENSOR DE NIVELAMENTO BLTOUCH MODELO FINAL.....	130
APÊNDICE J – FOLHA DESENHO TÉCNICO BASE INFERIOR SUPORTE CONECTOR DE ENERGIA.....	132
APÊNDICE K – FOLHA DESENHO TÉCNICO BASE SUPERIOR SUPORTE CONECTOR ENERGIA.....	133
APÊNDICE L – FOLHA DESENHO TÉCNICO TAMPA EXTERNA SUPORTE CONECTOR DE ENERGIA.....	134
APÊNDICE M – FOLHA DESENHO TÉCNICO DIRECIONADOR CENTRAL DO COOLER	135
APÊNDICE N – FOLHAS DESENHO TÉCNICO DIRECIONADORES COOLER..	136
APÊNDICE O – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE COOLER	137
APÊNDICE P – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA FRONTAL DIREITO	138
APÊNDICE Q – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA FRONTAL ESQUERDO	139
APÊNDICE R – FOLHAS DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA POSTERIOR DIREITO	140
APÊNDICE S – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA POSTERIOR ESQUERDO	141

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM – *Additive Manufacturing*) é baseada na construção do objeto através da inserção de material, tendo a quantidade e posição pré determinada por um modelo digital de um arquivo do tipo CAD (*Computer Aided Design, Desenho Assistido por Computador*).

De acordo com Javaid e Haleem (2018), há um crescente aumento em artigos publicados quanto ao uso de manufatura aditiva na área de saúde, onde em 2004 eram apenas 3 e em 2016 foram 133, o que indica o aumento desta aplicação, Nakasone (2017) afirma que a AM está auxiliando na produção de instrumentos utilizados para inclusão de deficientes visuais no ensino básico, mas especialmente no ensino técnico, Lopes (2018) complementa que a AM vem sendo utilizada no setor alimentício, médico, protético e acadêmico.

Um outro exemplo que pode ser destacado é o uso da impressão 3D pela Agência Espacial americana (NASA, *National Aeronautics and Space Administration*), no auxílio da construção do injetor de um motor de foguete, onde o administrador em uma entrevista com o Globo.com, informou que na terra e no espaço, a manufatura aditiva pode ser o que irá alavancar o surgimento de novas missões, reduzir tempo de produção e custo dos componentes tanto do motor como de uma espaçonave inteira (G1, 2013). O uso da AM destaca-se por não se restringir somente ao setor industrial, mas a uma vasta gama de setores e de maneiras diversas.

De acordo com Alcalde e Wiltgen (2018) a utilização da manufatura aditiva se mostra uma ferramenta importante no auxílio do desenvolvimento de novos produtos. Um exemplo recente da utilização da manufatura aditiva está atrelado ao auxílio contra o COVID-19, na produção de máscaras escudos faciais. A BioPrint, uma *startup* gerada no Programa Institucional de Bolsas de Empreendedorismo e Pesquisa (Pibep) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR), vem produzindo em média 10 destas máscaras faciais por dia, utilizando uma única impressora 3D.

A quarta revolução industrial vem modificando o modo de fabricação, gerando novos processos e novas probabilidades de aplicações da manufatura aditiva. Entretanto com esta evolução rápida, um dos desafios enfrentados é a atualização dos sistemas, pois muitos equipamentos estão se tornando obsoletos, não conseguindo acompanhar o avanço tecnológico.

Segundo os dados retirados da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2019), 99,5% das indústrias nacionais são formadas por empresas de pequeno e médio porte, para estas indústrias o processo de investimento é gradativo, (SEBRAE, 2017). Com isso, pode-se ressaltar que essas indústrias possuem capital limitado para aquisição de novos equipamentos, o que gera uma dificuldade em acompanhar as mudanças geradas pela revolução.

Uma alternativa para auxiliá-los é a utilização do *retrofit*, essa é uma técnica que proporciona uma modernização no produto ou equipamento, aumentando a vida útil e uma melhora no desempenho (SCHREIBER e FRANCO, 2017), auxiliando as fábricas, a continuarem competitivas, com baixo investimento. De acordo com a empresa alemã Bosch (2020), o mercado mundial de soluções de *retrofit* para a implementação da indústria 4.0 pode valer bilhões e Middleton (2017) pontua que este é o caminho ideal para a obtenção rápida de lucros com a quarta revolução industrial.

Neste contexto, o presente projeto visa a entrega de um material de auxílio para a implementação da técnica de *retrofit* em impressoras 3D, com a aplicação em conjunto do conceito RepRap, propondo melhoria e modernização nas impressoras para que essas voltem a ser utilizadas com maior qualidade na impressão e mais funcionalidades. Como forma de validação o projeto será executado em uma impressora 3D CubeX DUO propriedade da PUCPR, adquirida através de um projeto patrocinado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), que atualmente está sem uso devido sua tecnologia obsoleta.

Na impressora da PUCPR, para seu correto funcionamento, serão substituídos os equipamentos eletrônicos e de controle da impressora, como a fonte, placa principal, placas de controle dos motores, *hotends* e sensores de posição. Será ainda adicionado uma base aquecida. Todas estas modificações serão realizadas visando a prototipação com qualidade e possibilidade de utilização de diversos tipos de materiais, como *Polylactic Acid* (PLA), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS), Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol (PETG) e *Thermoplastic Polyurethane* (TPU).

Para realizar as configurações necessárias para cada tipo de material, será utilizado um novo *firmware* que possibilita a utilização de softwares de fatiamento que já são utilizados em outras impressoras disponíveis na universidade, facilitando sua operação.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

A indústria 4.0 vem implementando diversas transformações em nossa sociedade, principalmente nas tecnologias tornando-as essenciais, não somente dentro das indústrias, mas em todo o cotidiano. Desta maneira, máquinas mais eficientes tornam-se fundamentais, porém o custo desta mudança é inviável para muitas empresas.

A técnica de *retrofit* vem sendo utilizada para proporcionar a modernização de maquinário desatualizado, aumentando a vida útil e melhorando o desempenho, com um custo menor e ainda gerando um menor índice de lixo eletrônico.

Atualmente a PUCPR possui uma impressora 3D CubeX Duo sem uso, pois possui problemas de funcionamento e uma tecnologia obsoleta. A impressora faz a utilização de um software proprietário para o fatiamento, que possui limitações em sua configuração, além de permitir somente o uso de cartuchos de filamentos originais, com custos proibitivos em relação a filamentos genéricos. Além disso a impressora não dispõe de mesa aquecida, o que compromete a adesão das peças à mesa, e consequentemente afeta a qualidade da impressão. A calibração é complexa, demandando muito conhecimento e testes para obtenção de resultados satisfatórios. O filamento original não possui uma boa confiabilidade, e constantemente se rompe dentro do tubo que alimenta a impressora, o que causa o cancelamento da impressão e gera um grande descarte de material, dificultando seu uso para realização de prototipagem rápida.

De acordo com o professor orientador Me. Valter Klein Junior, a impressora 3D CubeX Duo foi adquirida para uso em um projeto de mestrado no ano de 2013, com o custo de R\$16.000,00, e foi utilizada somente durante o seu desenvolvimento. No contexto contábil, o equipamento é considerado um ativo que sofre depreciação, portanto, é um investimento que está gerando uma perda financeira à instituição.

Com base nisto este trabalho tem como problematização o estudo e a implementação da técnica de *retrofit*, para atualização e modernização da impressora 3D CubeX Duo e através disso, entregar um documento que possa ser utilizado como material de auxílio para aplicação desta técnica em outras impressoras 3D.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O propósito deste trabalho é criar um modelo de aplicação da técnica de *retrofit* em impressoras 3D, utilizando como exemplo a realização do *retrofiting* na impressora 3D CubeX DUO, presente na PUCPR, que atualmente está sem uso devido sua tecnologia obsoleta, proporcionando a atualização de sua tecnologia, com baixo custo e alta confiabilidade, além da possibilidade de trabalhar com filamentos convencionais disponíveis no mercado.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho visa desenvolver e avaliar os seguintes itens:

- a) apresentar os principais conceitos sobre a manufatura aditiva e o *retrofit*;
- b) avaliar o estado atual da impressora 3D CubeX Duo e identificar os elementos passíveis de modificação;
- c) definir os componentes para a atualização da impressora baseado nos conceitos da indústria 4.0;
- d) implementação da atualização;
- e) realização de impressões de testes Benchmark¹, para avaliação da qualidade e correta configuração.

1.3 JUSTIFICATIVA

A geração de representações físicas de projetos, denominados de protótipos, vêm sendo utilizados desde a antiguidade, sendo essa uma das tarefas de maior importância no desenvolvimento de um projeto, pois através dela são realizados testes e ensaios para verificar se o comportamento e/ou design atendem as funcionalidades desejadas.

¹ De acordo com SIM et al (2003) Benchmark é um teste ou conjunto de testes utilizados para comparação do desempenho de técnicas ou ferramentas.

A área da prototipagem está em constante evolução, a partir dos anos 80 foi de manuais para protótipos virtuais, não sendo deixado de utilizar os manuais. Atualmente a técnica mais utilizada é a prototipagem rápida, também definida pela manufatura por camada, isto é, seu processo é realizado por meio da adição de materiais sobrepostos camada por camada (VOLPATO, 2007). De acordo com Canciglieri *et al.* (2015), é de suma importância a fabricação de protótipos rápidos fisicamente para melhor análise do produto final, além do uso das tecnologias de prototipagem rápida entregarem maior flexibilidade e de reduzir o tempo de execução.

De acordo com Oliveira (2008), a prototipagem rápida vem aumentando sua importância, com aplicações em diversas áreas acadêmicas e seu uso é benéfico, principalmente para a construção de peças, onde independe da complexidade geométrica. Alcalde e Wiltgen (2018) afirmam que a utilização de prototipagem rápida, na área acadêmica científica, é uma ferramenta que acelera as pesquisas, o que acarreta atualmente em algo essencial, principalmente no âmbito de pesquisa de mestrado, tendo em vista que o tempo de desenvolvimento do mesmo é reduzido.

O laboratório de Engenharia de Controle e Automação da PUCPR, possui atualmente duas impressoras 3D, sendo uma Ultimaker 2 Extended + e uma Ultimaker 3. Estes equipamentos estão à disposição para uso dentro da escola politécnica, para projetos de graduação, pós graduação, mestrado e doutorado. Neste contexto, o projeto visa entregar para uso acadêmico uma impressora 3D atualizada, com alta confiabilidade, com um baixo custo e possibilidade de trabalhar com filamentos convencionais disponíveis no mercado. O que agregará em mais uma ferramenta para auxiliar e acelerar as pesquisas e projetos desenvolvidos na PUCPR, pois a inclusão de um novo equipamento de prototipagem rápida nos laboratórios, possibilita o aumento da capacidade de atendimento às demandas de projeto, reduzindo o tempo de espera para a confecção de protótipos.

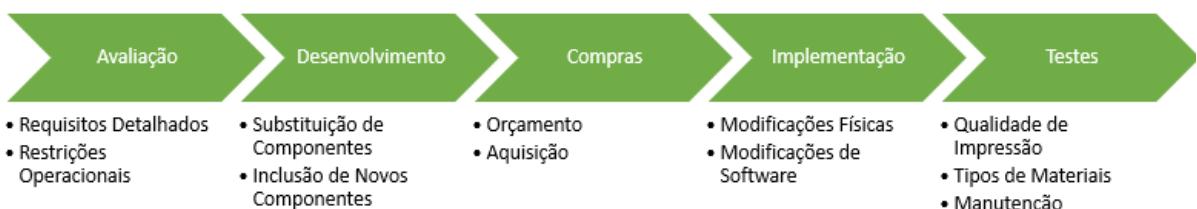
Este trabalho também visa a entrega de um modelo de aplicação de *retrofit* com utilização do conceito RepRap, para ser utilizado como auxílio para implementação em outras impressoras, gerando assim a possibilidade de redução de descarte de impressoras ultrapassadas, assim como a renovação das mesmas com custo reduzido.

1.4 MÉTODO

De acordo com Plotegher (2012), um processo de retrofit difere de um processo de desenvolvimento de produto, visto que o produto é concebido a partir das definições de projeto, tais como planejar, desenvolver o princípio de solução, definir a estrutura, preparar a documentação, dentre outros. A técnica de retrofit parte de uma máquina já existente, o autor afirma que por conta disso ocorrem várias incertezas, o que sugere um processo mais complexo.

Para realização do *retrofit*, neste projeto será adotada a metodologia definida por Grams e Cetnarowski (2014), constituída de cinco etapas, sendo elas: avaliação do equipamento, desenvolvimento do projeto, compra, implementação do projeto e testes (Figura 1).

Figura 1: Etapas da metodologia aplicada.



Fonte: Autores, 2020.

O primeiro passo foi o levantamento detalhado dos requisitos e restrições operacionais da impressora. Foi observado que não dispõe de mesa aquecida, possui uma calibração complexa, um software proprietário para o fatiamento com limitações em sua configuração, bloqueia o uso de filamentos genéricos, e seu filamento original possui um alto custo e não tem uma boa confiabilidade.

A segunda etapa consiste no desenvolvimento do projeto, tendo como objetivo a obtenção de uma impressora 3D atualizada com custo reduzido. Portanto, se fez necessário a realização de uma pesquisa bibliográfica que embasasse os argumentos para a realização deste trabalho. Para isto foram utilizados artigos científicos publicados em revistas, teses e dissertações publicadas na Capes ou em bancos de dados de universidades, além de livros tais como *The Fourth Industrial Revolution* (SCHWAB, 2017), *Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital Manufacturing* (GIBSON et al., 2010), entre outros, datasheets e pesquisa na

comunidade *Replicating Rapid-Prototyper* (RepRap), detalhada no capítulo 2. Foi então definido o desenvolvimento do projeto, realizado através da troca de alguns dos componentes eletrônicos e de controle tais como a fonte de alimentação, a placa principal, *hotends*, os sensores de posição e as placas de controle. A terceira etapa consiste na cotação e compras dos componentes para realização do *retrofit*.

No quarto passo, a implementação das modificações físicas e de software na impressora.

E por fim a realização de testes, onde são avaliados diversos requisitos de qualidade de impressão, desempenho da utilização de diferentes materiais e confiabilidade geral de funcionamento, onde, caso seja constatado alguma não-conformidade com os padrões definidos, são realizados os ajustes necessários.

No Quadro 1 são listadas as principais etapas do cronograma, que se enquadram dentro das cinco macros etapas da metodologia.

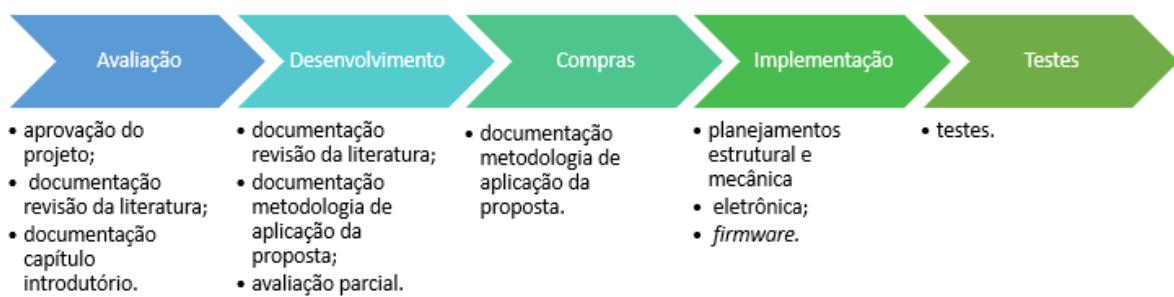
Quadro 1: Etapas do cronograma

Etapas	Período
Aprovação do projeto	17/02/2020 até 22/03/2020
Documentação capítulo introdutório	02/03/2020 até 24/05/2020
Documentação revisão da literatura	02/03/2020 até 24/05/2020
Documentação metodologia de aplicação da proposta	17/02/2020 até 07/06/2020
Avaliação parcial	25/05/2020 até 19/06/2020
Estrutural e mecânica	03/08/2020 até 25/09/2020
Eletrônica e firmware	15/05/2020 até 30/10/2020
Testes	30/08/2020 até 30/10/2020
Documentação	03/08/2020 até 06/11/2020

Fonte: Autores, 2020.

Para uma melhor visualização é possível integrar etapas do cronograma com os marcos do projeto conforme Figura 2.

Figura 2: Integração dos marcos com as etapas do cronograma.



Fonte: Autores, 2020.

O custo final total para a implementação do retrofit na impressora 3D CubeX Duo ficou em 2.325,47 reais. A maioria dos componentes foram importados, pois mesmo com as taxas o custo ficou reduzido, comparado com um orçamento realizado totalmente no Brasil, os valores unitários podem ser visualizados no Apêndice A.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados tópicos acerca dos principais fundamentos necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 INDUSTRIA 4.0

O termo indústria 4.0 foi apresentado inicialmente na Alemanha durante a feira de Hannover, em 2011. O governo alemão então apoiando a ideia, criou o programa Industria 4.0, o que chamou a atenção de empresas, meio científico e acadêmicos em todo o mundo, pois o cenário demonstrava ser o início da quarta revolução industrial (HERMANN *et al.*, 2016).

Schwab (2017) defende que a indústria 4.0 é algo diferente de tudo que já foi experimentado pela humanidade, onde modificará o modo de viver, trabalhar e de se relacionar no mundo atual. Segundo Sugayama e Negrelli (2016), a quarta revolução industrial, será definida pelo uso de sistemas industriais inteligentes e a integração de sistemas de produção, além disso Idrisov *et al.* (2018) apud Popkova *et al.* (2019) complementam o conceito da integração com a interatividade, isto é, a adaptação da produção em tempo real utilizando meio digitais, Schwab (op. cit.) acrescenta que a digitalização tem o mesmo significado que a automação.

A quarta revolução industrial é caracterizada pela fusão do meio físico com o meio digital e biológico (LOSHKAREVA *et al.* 2015), esta revolução ainda não tem uma definição objetiva, tendo em vista que ainda está em processo de desenvolvimento, através do avanço tecnológico, o que de acordo com Magalhães e Vendramini (2018), está influenciando na alteração da organização econômica, política e social das sociedades no mundo.

Segundo Loshkareva *et al.* (op. cit.), os avanços tecnológicos que são necessários para a base do novo modelo industrial podem ser divididos em cinco elementos:

- a) desenvolvimento robótico;
- b) expansão de veículos autônomos;
- c) manufatura aditiva e novos materiais;
- d) comunicação entre dispositivos em tempo real;
- e) auto gerenciamento do processo produtivo.

Esses elementos utilizam os pilares da indústria 4.0 para sua implementação, Souza *et al.* (2017) lista os seguintes itens como pilares da quarta revolução industrial:

- a) Internet das coisas (IoT);
- b) *Big data e Analytics*;
- c) *Cyber Security*;
- d) *Cloud computing*;
- e) Inteligência artificial (IA);
- f) Robôs autônomos;
- g) Simulação;
- h) Realidade aumentada;
- i) Manufatura aditiva.

Internet das coisas, mais conhecido como IoT (*Internet of Things*), segundo Santos *et al.* (2016) é uma extensão da internet atual, onde através desta ocorre a comunicação e conexão entre os objetos do dia-a-dia. Schwab (2017) afirma que a IoT é o elemento central da quarta revolução e a define como uma gama de sensores inteligentes e conectados que coletam, processam e transformam os dados de acordo com sua necessidade e os transmitem para outros dispositivos ou pessoas.

Coelho (2016) trata *Big Data* como um termo referente as grandes quantidades de informações armazenadas em tempo real. Baccarin (2018) afirma que os dados são um fator essencial, pois através deles é possível gerar novas ideias para alavancar os negócios. Na internet industrial das coisas (IIoT), há geração de grande fluxo de dados, estes são analisados utilizando técnicas chamadas de *Data Analytics* (GILCHIRST, 2016).

Com o crescente aumento do fluxo de dados na nuvem, gera-se um aumento na tentativa de obtenção de informações sigilosas, e acesso não autorizado em sistemas. Para proteger os sistemas destas tentativas é desenvolvido a *Cyber Security*, de acordo com Abomhara e Køien (2015) para garantir uma segurança eficiente, deve-se estar ciente dos objetivos primários da segurança cibernética, estes objetivos podem ser denotados como:

- a) confidencialidade;
- b) integridade;
- c) autenticação e autorização;
- d) disponibilidade;
- e) responsabilidade;

- f) auditoria;
- g) não repúdio;
- h) privacidade.

A *Cloud Computing* tem como objetivo proporcionar variados tipos de aplicações, independentemente da plataforma, através da internet. A computação em nuvem pode ser definida como uma evolução da *Utility Computing*², onde este tem como objetivo o fornecimento de armazenamento, processamento, como um serviço, com um custo reduzido (RUSCHEL *et al.* 2010).

Lange e Lin (2015) apud SOUZA *et al.* (2017) definem a inteligência artificial como a capacidade dos sistemas *cyber* físicos de aprenderem, pensar e agir de maneira autônoma, baseadas nas informações obtidas da IoT e analisadas utilizando o *Big Data Analytics*. Schwab (2017) afirma que os objetivos da inteligência artificial incluem, auxiliar as máquinas autônomas a trabalharem no meio físico e a ajudar a relação homem máquina, além disto ele indica que no futuro a IA poderá realizar tarefas complexas, em escalas acima da capacidade humana.

A robotização está presente no meio industrial desde a terceira revolução, atualmente está sendo aperfeiçoada com a implementação da inteligência artificial, possibilitando seu funcionamento de maneira autônoma, isto é, tomam decisões em resposta ao seu ambiente (CORRELL, 2016).

Anteriormente para modificação de processos, era necessário criar protótipos físicos, para encontrar o modelo que fosse eficiente e efetivo, muitas vezes era criado mais de um, o que ocasionava num custo alto, além de um elevado tempo. O uso dos gêmeos digitais para modelagem e teste de simulação, reduz o tempo, custo e o erro, o que ocasiona uma otimização da produção e uma melhor qualidade do produto (GILCHIRST, 2016).

Para reduzir o custo com treinamentos, manutenção e despesas gerais associadas à produção, marketing e suporte pós-venda. As empresas utilizam-se de sistemas baseados em realidade aumentada, onde estes reduzem o custo pois não há necessidade de ter um especialista no local, além de aprimorar os procedimentos de manutenção (GILCHIRST, 2016).

² Computação utilitária.

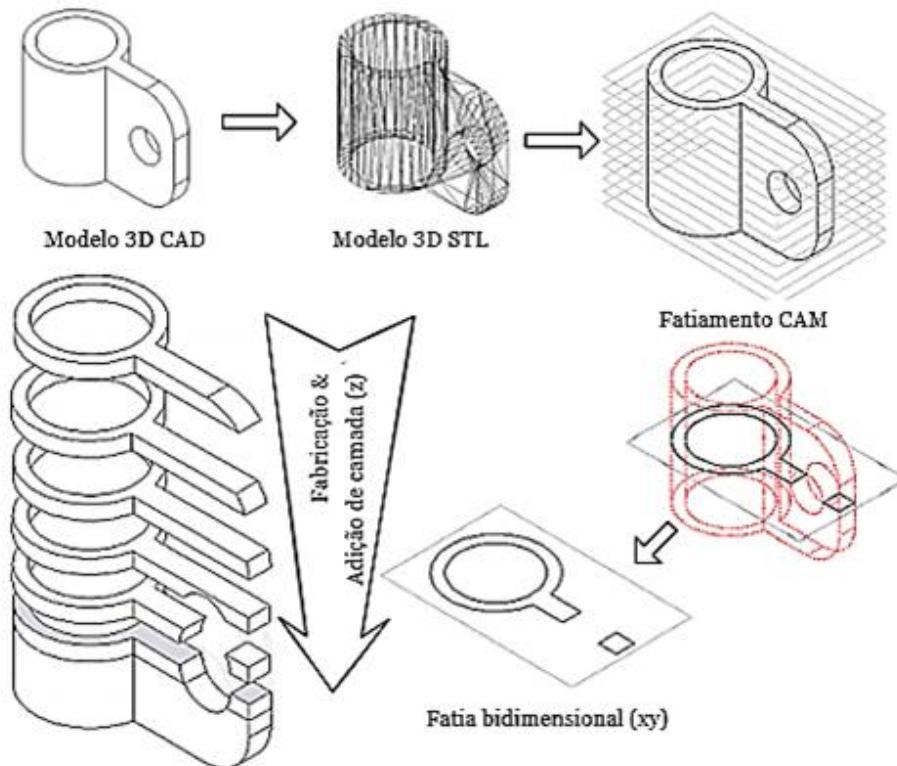
Os autores Lins *et al.* (2018) declaram que muitas indústrias não possuem um alto capital para investimentos, e que ainda a maioria destas não estão adaptadas a terceira revolução industrial, e com isto a migração para indústria 4.0 é um desafio, os autores afirmam que o *retrofit* é uma alternativa para este desafio, pois possui baixo custo e agilidade.

2.2 MANUFATURA ADITIVA

Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing – AM*) também conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, surgiu no final da década 1980, como sendo o novo princípio de fabricação por meio de adição de material. Esta adição ocorre camada por camada, utilizando como base uma representação geométrica 3D computacional, usualmente utilizada o sistema *Computer-Aided Design (CAD)*. Este processo é totalmente automatizado e pode ser utilizado para diversos tipos de materiais e estruturas (VOLPATO e CARVALHO, 2017).

De acordo com Beal (2002), o processo AM segue alguns passos primordiais, sendo inicialmente a geração da representação do objeto tridimensional no sistema CAD, após deve ser enviado o arquivo para um sistema *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, este usualmente é específico para cada modelo/processo, este sistema secciona o objeto tridimensional em finas fatias paralelas entre si e perpendiculares ao eixo z (também conhecido como eixo de construção), após o sistema CAM analisa a trajetória que a ferramenta de adição deve percorrer para cada camada e gera um arquivo para o comando numérico, também conhecido como *Numeric Control (NC)* da máquina, este arquivo é então encaminhado para a máquina, e a mesma inicia o processo de manufatura de adição. Um esquemático do processo da manufatura aditiva pode ser observado na Figura 3.

Figura 3: Representação genérica do princípio de funcionamento do processo da manufatura.



Fonte: Adaptado de Beal, 2002.

Os autores Gibson *et al.* (2010), definem alguns passos a mais na produção utilizando a manufatura aditiva, sendo eles:

- configuração da máquina, esta pode se fazer necessário para definição de alguns parâmetros, tais como tempo de produção, espessura das camadas a serem realizadas, entre outros;
- produção durante este passo deve ser supervisionada, somente para garantir que não ocorrerá falta de material, ou oscilação de energia;
- remoção é a retirada da peça da máquina;
- pós – processamento ocorre ao final da produção, onde algumas vezes se faz necessário a realização de tratamentos adicionais, para garantir a qualidade tanto estética quanto mecânica.

De acordo com Giordano *et al.* (2016), algumas características fundamentais da manufatura aditiva é a redução da quantidade de etapas e processos além da economia de material para a fabricação de um objeto. Um exemplo disto é uma peça que possui uma geometria complexa, onde sem a manufatura aditiva para realizar a

fabricação da mesma, se faz necessário a utilização de várias máquinas, desperdício de matéria prima além de muito tempo empregado.

Ainda pode-se destacar o uso da manufatura aditiva em protótipos, o que proporciona a redução de custo e uma maior agilidade nas tomadas de decisões, pois esta manufatura proporciona uma facilidade na obtenção de peças com características mecânicas que se assemelham com as do processo, e podem ser utilizadas para teste (BEAL, 2002; VOLPATO e CARVALHO, 2017).

E por conta das características mecânicas serem tão próximas, este modelo de manufatura está sendo muito utilizada na área da saúde para prototipagem, um exemplo disto foi dado por Mismetti (2013), o uso da manufatura pelo neurocirurgião Dr. Joel Teixeira, onde ele cria protótipos de colunas, utilizando a manufatura aditiva, a partir de tomografias computadorizadas do paciente, para melhor compreensão e entendimento para gerar o seu diagnóstico.

Os autores Canciglieri *et al.* (2015), denotam que existe diversos equipamentos disponíveis no mercado para manufatura via adição de camadas, mas todos tendo em comum a possibilidade da geração de peças independentemente da geometria complexa, e sem o auxílio de moldes, denominada de *Solid Freeform Fabrication* (Fabricação de Sólidos de Forma livre). E ainda eles concluem que a manufatura aditiva ou prototipagem rápida por adição, oferece ao mercado processos como:

LOM (Laminated Object Manufacturing) – com base em folhas de papel, oferece baixo custo; FDM (Fused Deposition Modeling) – com filamento em ABS (acrilonitrila butadieno estireno), proporcionando durabilidade e resistência; SLA (Stereolithography Apparatus) – oferecendo translucidez e precisão; SLS (Selective Laser Sintering) – com base de material em nylon (poliamida) ou metal, oferecendo resistência mecânica e resistência ao calor; 3Dprint (Three-dimensional Printing) – com base de camada em pó e adesivo líquido, oferecendo rapidez e visualização.

(CANCIGLIERI *et al.* p. 347, 2015).

Cotteleer *et al.* (2014) define sete modos de processos de manufatura aditiva, que são:

- a) fotopolimerização de cuba utiliza-se de um fotopolímero líquido em uma cuba, que é seletivamente curado utilizando luz para realizar a polimerização. As tecnologias que aplicam esse processo são a estereolitografia (SLA) e o processamento digital de luz (DLP);

- b) material *jetting* trabalha com a deposição seletiva de material, onde as gotas do polímero são solidificadas utilizando luz ultravioleta. Normalmente são utilizados materiais de suporte, como cera, durante o processo de deposição. A tecnologia que utiliza esse processo é a *Multi-Jet Modelling* (MJM);
- c) extrusão de materiais é um processo onde um material termoplástico passa por um bico aquecido e é depositado na mesa de impressão. O bico derrete o material e o extruda camada a camada até o objeto estar completo. A tecnologia de impressão que se utiliza desse processo é a Modelagem por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*, FDM);
- d) fusão de cama em pó, neste as partículas de material em pó são fundidas usando algum tipo de fonte de energia térmica, como um laser. Após cada camada fundida, é criada uma nova camada de pó por cima da anterior e fundida novamente, até que a impressão esteja completa. O material não fundido funciona como suporte para os objetos. As tecnologias de impressão que utilizam este processo são: Fusão de Feixe de Elétrons (*Electron-Beam Melting*, EBM), Sinterização Seletiva à Laser (*Selective Laser Sintering*, SLS), Sinterização por Aquecimento Seletivo (*Selective Heat Sintering*, SHS) e Sinterização Direta à Laser de Metal (*Direct Metal Laser Sintering*, DMLS);
- e) *binder jetting* é o processo onde as partículas de material em pó são unidas seletivamente utilizando um agente líquido de ligação. Pode-se ainda adicionar tinta à composição para a fabricação de objetos coloridos. O material que não é colado, é utilizado como suporte para o objeto produzido. As tecnologias que utilizam *binder jetting* são: Cama em Pó e Jato de Tinta (*Powder Bed and Inkjet Head*, PBIH) e Impressão à base de Gesso (*Plaster Powder*, PP);
- f) laminação por folhas finas camadas de material são unidas em camadas para a formação do objeto. Cada lâmina é cortada no formato desejado utilizando laser ou faca. As tecnologias de impressão que se utilizam desse processo são: Manufatura de Objeto Laminado (*Laminated Object Manufacturing*, LOM) e Consolidação Ultrassônica (*Ultrasonic Consolidation*, UC);

- g) deposição direta de energia, neste processo, é utilizado um foco de energia térmica para a fusão de material, geralmente metálico. O material utilizado pode estar em pó ou em filamento. A tecnologia que se baseia nesse processo é a Deposição de Metal à Laser (*Laser Metal Deposition, LMD*).

Chua e Leong (2014) defendem que pode ser classificado as tecnologias da manufatura aditiva através do estado inicial da matéria prima, estes são:

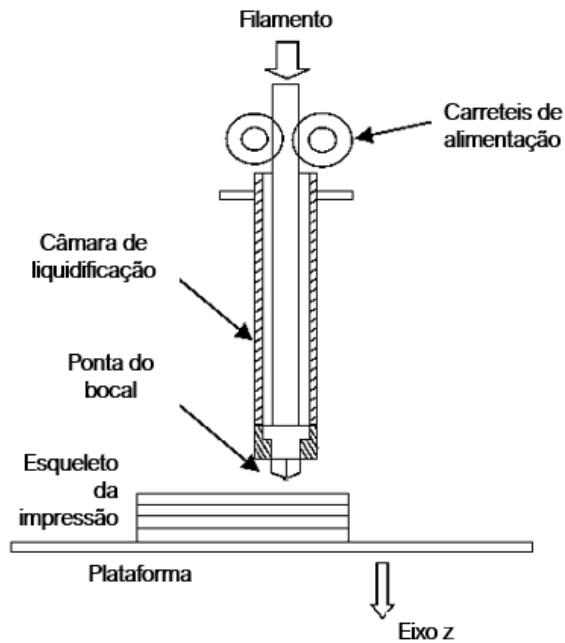
- a) líquido sendo utilizado na impressão a jato de tinta, entre outros;
- b) pó é utilizado material usado na fusão de cama em pó;
- c) sólido utilizado na modelagem por fusão e deposição.

2.3 MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

Em 1989, foi patenteado o processo de Modelagem por Fusão e Deposição, por Scott Crump, atualmente as variantes da FDM são muito utilizadas principalmente por seu processo básico ser simples. Um dos variante mais utilizados é o RepRap (será melhor explicado na seção 2.4), pois este possui um custo baixo, e é capaz de ser construído de maneira fácil (GIBSON *et al.*,2010).

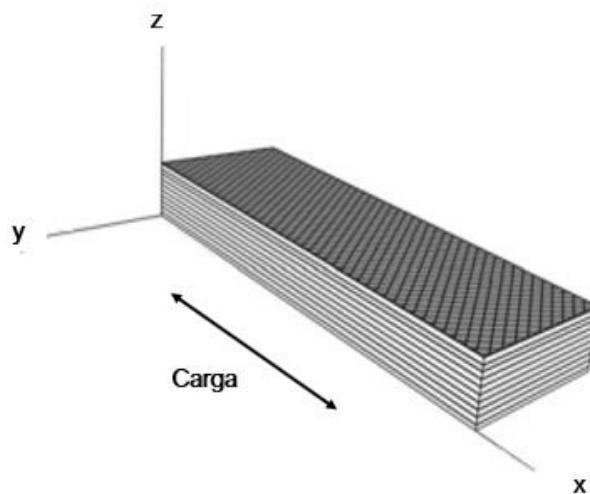
Cunico (2015), Abreu (2015) e Gibson *et al.* (2010) descrevem o processo da modelação por fusão e deposição como sendo a utilização de filamentos de resina termoplásticos que são deslocados para dentro de uma câmara de liquidificação pela ação de carreis de alimentação, onde estes são acionados por motores de passo. Dentro da câmara os filamentos são aquecidos por resistências que estão acopladas ao redor da câmara, até uma temperatura que seja superior a temperatura de transição vítreo do material (Figura 4), segundo Carneiro *et al.* (2019) esta temperatura é igual a temperatura de fusão do polímero. São então depositados através de uma cabeça extrusora, que se movimenta através do plano x-y (Figura 5), após a aplicação da camada a base se movimenta no eixo z (Figura 6), onde de acordo com Volpato (2007) o valor de movimento no eixo z é o valor de referência da espessura da camada a ser depositada, para então a cabeça extrusora iniciar novamente o processo de deposição. Este processo é mantido até a finalização da peça.

Figura 4: Esquemático do processo FDM.



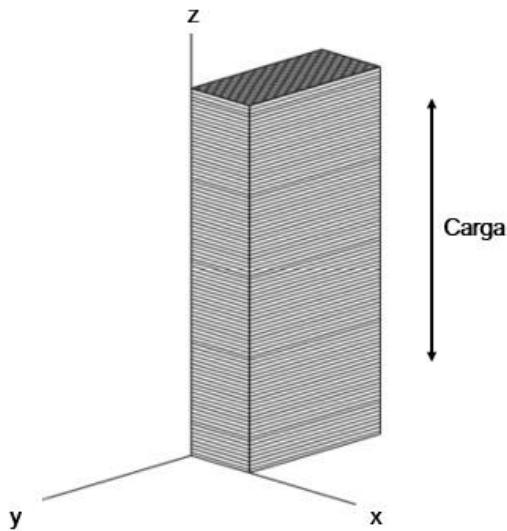
Fonte: Adaptado de Gibson *et al.* (2010).

Figura 5: Movimento plano x – y.



Fonte: Adaptado de Wimpenny *et al.* (2016).

Figura 6: Movimento eixo z.



Fonte: Adaptado de Wimpenny *et al.* (2016).

Segundo Christiyan *et al.* (2016), assim que o filamento é extrudado, ele resfria da temperatura de transição vítreia para a temperatura da câmara, mas a diferente velocidade da deposição de material gera na peça tensões internas, e essas podem gerar rachaduras, falha na impressão e/ou desalinhamento, e podem ocasionar distorções na peça final, principalmente na superfície inferior.

De acordo com Gibson *et al.* (2010) o processo por FDM utiliza principalmente resinas termoplásticas, onde pode-se denotar a ABS, PLA, PETG, Nylon (PA), Policarbonato (PC), entre outros.

O ABS é composto por três monômeros: acrilonitrila, butadieno e estireno. E suas propriedades são resultado das características de cada monômetro, isto é, o ABS possui resistência química, estabilidade ao calor e ao envelhecimento, tenacidade, resistência ao impacto, propriedades de retenção a baixas temperaturas, além de rigidez de copolímero, facilidade de processo e uma aparência brilhante. Onde cada propriedade é variada de acordo com a manipulação da proporção dos componentes do ABS. (EBEWELE, 2000). Sua temperatura de fusão (T_m) é considerada alta (Tabela 1), mas de acordo com Besko (2017) sua vantagem se encontra no custo baixo.

O PLA segundo os autores Tanikella *et al.* (2017) é um dos materiais mais populares pois, quando comparado ao ABS, possui uma maior facilidade para impressão, além de sua temperatura de fusão ser reduzida (Tabela 1). Ele é um

polímero que possui um bom comportamento termoplástico, um alto modulo elástico, além disto ele é biodegradável e possui biocompatibilidade (ARAÚJO *et al.*, 2015), o que acarreta na degradação rápida quando sob condições elevadas de temperatura e umidade, mas sob condições normais suas propriedades físicas duram anos (HENTON *et al.*, 2005).

Santana *et al.* (2018) afirmam que o PETG é um material que está ganhando espaço entre os produtores de filamentos e usuários de impressoras 3D, por conta de sua facilidade de impressão, resistência e ductilidade. Ele foi gerado através da combinação do PET (polietileno tereftalato) com o Glicol. Besko (2017) alega que o PETG é considerado por alguns como sendo o meio termo entre o PLA e o ABS.

O Nylon é o polímero sintético popular, possui várias aplicações na indústria, de baixo custo, leve, flexível, com estabilidade dimensional, resistência química e ao impacto e possui uma temperatura de fusão considerada alta, (MARTINS e LIMA 2018) como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades térmicas dos termoplásticos mais usuais.

Termoplásticos	Temperatura de Fusão (T_M)	Temperatura de transição vítreia (T_g)
ABS	210 – 250°C	100°C
PLA	180 – 230°C	60°C
PETG	210 – 270°C	85°C
PA	215 – 265°C	50°C

Fonte: Autores, 2020.

Sun *et al.* (2008) mostra que a temperatura da extrusora e da mesa de impressão influenciam nas propriedades mecânicas e na qualidade da peça final, Carneiro *et al.* (2019) defendem que a temperatura da mesa influência nas dimensões geométricas da peça impressa e ainda Junior *et al.* (2019) denotam que a temperatura da mesa no processo FDM deve ser utilizado próximo a temperatura de transição vítreia (T_g) do filamento a ser utilizado (Tabela 1), para que não ocorra erro na impressão por conta de um movimento indesejado, por falta de aderência das primeiras camadas.

2.4 IMPRESSORAS REPRAP

O conceito de RepRap surgiu no site da Universidade de Bath, em 2 de fevereiro de 2004, quando Adrian Bowyer definiu RepRap como sendo a abreviação de *Replicating Rapid-prototyper*, ou seja, uma máquina capaz de se auto replicar.

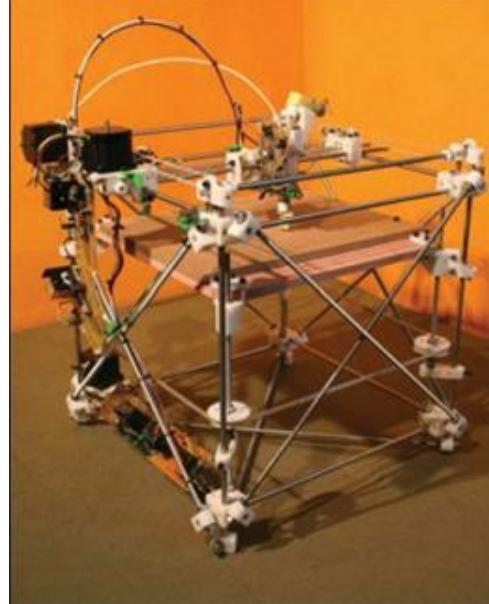
De acordo com Abreu (2015), o projeto RepRap visa a produção de um software gratuito de código livre (*Open Source, OS*) para impressoras 3D. Canessa et al. (2013) adicionam que este projeto deve ser capaz de se replicar (parcialmente), isto é, imprimir suas próprias peças em plástico, para criar mais máquinas. Desta definição foi gerado uma comunidade virtual com o mesmo nome, interessados na criação de diferentes modelos RepRap, essas pessoas do mundo inteiro trocam informações, sanam dúvidas e discutem sobre as máquinas auto replicadoras. A comunidade ainda dispõe de uma wiki³, onde possui informações relevantes sobre modelos de impressora, componentes, softwares, filamentos e instruções para a montagem das máquinas tudo gratuitamente.

De acordo com Duarte (2017), as RepRap atualmente são as mais utilizadas, devido ao seu custo reduzido, facilidade de construção, permissão de personalização pelo usuário, além de ser uma impressora de código livre.

A RepRap Darwin (Figura 7), foi a primeira impressora no nível do consumidor que utilizou FDM para modelação de objetos e segue o modelo do processo da modelação por fusão e deposição onde a limitação da estrutura define o limite do volume total de impressão disponível.

³ Wiki é um site na Web para o trabalho coletivo de um grupo de autores onde todos modificam de forma colaborativa o conteúdo e estrutura do mesmo.

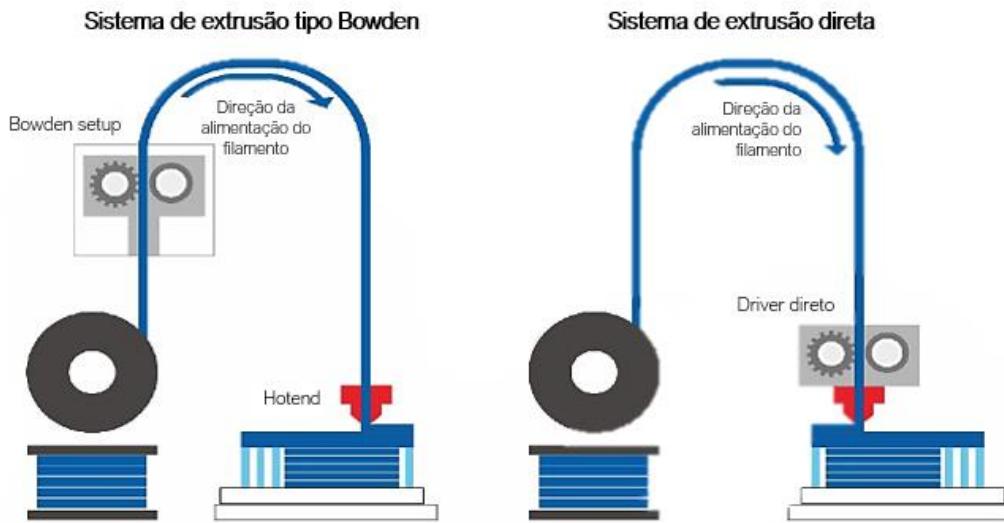
Figura 7: Primeira impressora RepRap, Darwin.



Fonte: Hausman e Horne (2014).

Com uma configuração próxima ao RepRap Darwin foi constituído a Ultimaker, a base de impressão move-se apenas no eixo z, enquanto uma cabeça extrusora move-se no plano x-y, realiza uma impressão de maneira rápida alimentada por *Bowden* (Figura 8), onde este é um método de adição de um tubo com geralmente 500 mm de comprimento e flexível e que gera pouco atrito com o filamento (normalmente é utilizado o teflon), para delimitar o caminho entre a entrada da extremidade aquecida e o sistema de movimentação, e com isto evitar que o filamento se dobre ou se comprima (HAUSMAN e HORNE, 2014).

Figura 8: Modelo de extrusor do tipo Bowden versus modelo extrusão direta.



Fonte: Adaptado do site CREALITY⁴.

2.4.1 Componentes projeto RepRap

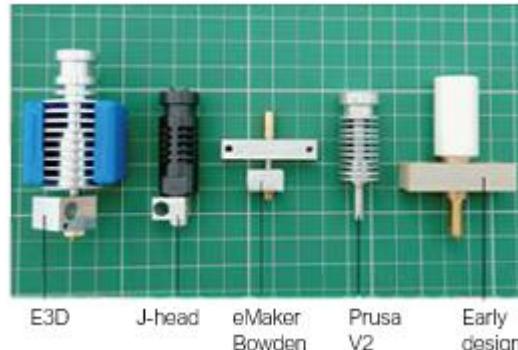
A estrutura de uma impressora RepRap segundo os autores Hausman e Horne (2014) na maioria das vezes utiliza-se de materiais comuns, o que agrega num dos motivos de ser o modelo mais acessível. E ainda apresentam definições para cada parte do projeto, denotadas a seguir.

2.4.1.1 Extrusora

A extrusora ou *hotend* é uma das partes mais importantes, pois se mal projetada pode trazer grandes dificuldades na impressão. Este componente é responsável pela extrusão do material de construção camada por camada. Para o projeto RepRap existem vários modelos de *hotend*, onde todos tem a mesma função básica, porém, de acordo com as necessidades de impressão, deve ser selecionada uma extrusora específica, na Figura 9 está exemplificado alguns modelos existentes (HAUSMAN e HORNE, 2014).

⁴ Disponível em: <<https://creality.com/info/everything-that-you-can-get-about-the-3d-printer-extruder-i00126i1.html>> Acesso em abril 2020.

Figura 9: Diferentes modelos de *hotends*, indicados para projetos RepRap.



Fonte: Adaptado de Hausman e Horne (2014).

2.4.1.2 Placa de construção

Placa de construção é a superfície em que se realiza a impressão, também conhecida como mesa, em sua maioria para melhor resultado é utilizada a aquecida o que garante que a peça a ser impressa fique aderida à mesa durante todo o processo de impressão. Visto que conforme o material resfria, ele tende a encolher e os cantos tendem a descolar da base. A utilização da mesa aquecida garante que a base não esfrie, e reduz a possibilidade deste encolhimento do material (REPRAP, 2018a), além disto esta pode ser de vários materiais onde os três principais são vidro, metal e cerâmica:

a) mesa de vidro:

- estas mesas possuem a vantagem de terem sua superfície uniforme e não tem a tendência de entortar, forma uma plataforma uniforme de temperatura devido a sua baixa condutividade térmica e possui um custo baixo para as medidas padrões de impressoras 3D. Como desvantagens, vidros comuns podem trincar se não forem aquecidos de maneira uniforme, e pode ser necessário o uso de ferramentas específicas para remoção das peças quando estiverem muito aderidas à base;

b) mesa de metal:

- chapas de metal lisas podem ser utilizadas como base para uma boa impressão. As chapas de metal têm a vantagem de distribuir uniformemente o calor, devido a sua boa condutividade térmica,

porém, podem sofrer com a expansão e podem entortar durante a impressão;

c) mesa de cerâmica:

- estas combinam as propriedades de se manterem planas com mesmo com temperaturas mais altas, e sem o risco de trincas, porém, este material tem uma condutividade térmica baixa, o que pode gerar problemas de aquecimento para a peça a ser impressa.

2.4.1.3 Componentes eletrônicos

Para a construção de uma impressora 3D, necessita-se de vários componentes eletrônicos entre eles destacam-se: controladora, motor de passo, driver para motor de passo, sensor de fim de curso.

2.4.1.3.1 *Controladora*

A controladora é o principal elemento de controle de uma impressora 3D. Ela é responsável por traduzir os comandos *G-Code*, em comandos elétricos para motores, aquecedores e leitura de sensores.

Existem muitas variações de placas controladoras, que normalmente podem ser permutadas e tem a mesma função, onde a maioria delas é baseada no microcontrolador Arduino. A controladora ainda pode ser *Standalone*, onde todos os circuitos são integrados a ela, ou pode fazer a utilização de *Shields* para controlar funções específicas (REPRAP, 2020).

As placas controladoras estão divididas normalmente em duas categorias. Placas de 8-bits e placas de 32-bits. As placas de 8-bits possuem vantagens de serem amplamente utilizadas desde o início de fabricação individual de impressoras 3D, além de possuírem um valor mais baixo. As placas de 32-bits possuem a vantagem de serem muito mais rápidas, em relação as placas de 8-bits, além de geralmente possuírem melhores capacidades de processamento, que trazem melhorias na qualidade da impressão (REPRAP, 2018b).

2.4.1.3.2 Motor de Passo

O motor de passo é um modelo especial de motor síncrono, que tem a capacidade de se movimentar para posições precisas, de acordo com um impulso elétrico aplicado (VIRGALA *et al.*, 2015). Segundo Brites e Santos (2008), o princípio de funcionamento do motor de passo consiste em pares de solenoides, que quando são energizados, promovem a atração do rotor e promovem o alinhamento com o eixo determinado pelos solenoides. Este processo gera uma pequena movimentação controlada pela quantidade de alinhamentos possíveis, e pela ordem e velocidade que ocorre o acionamento dos solenoides.

Os motores de passo são divididos entre motores unipolares e bipolares:

- a) motores unipolares possuem dois enrolamentos idênticos em cada fase, com uma ramificação central entre eles. Este tipo de configuração possui um acionamento simplificado, podendo ser acionado com apenas dois transistores. A grande desvantagem deste tipo de motor é que o fio tende a ser mais fino e com uma resistência muito maior se comparado aos motores bipolares (HOPKINS, 2012);
- b) os motores bipolares possuem um único enrolamento por fase, o que implica na utilização de um sistema de ponte H para realizar a inversão dos polos de cada fase. Segundo Hopkins, esta configuração possui a vantagem de apresentar uma menor resistência nos enrolamentos do motor, e maior torque em relação ao motor unipolar.

2.4.1.3.3 Driver para motor de passo

Estes possuem a função de entregar a corrente necessária para os motores realizarem o movimento necessário, isolando o circuito de potência do circuito de comando dos motores. Estes *drivers* ainda possuem a capacidade de trabalhar com a função de micro passos, que tornam o movimento do motor mais suave, reduzindo vibrações durante a movimentação (REPRAP, 2018c) A técnica de micro passos pode reduzir significativamente o ângulo de cada passo. Geralmente a redução ocorre na escala entre 16 e 64 micro passos para cada passo completo. A aplicação deste método tende a reduzir a precisão do movimento realizado pelo motor (MOTION CONTROL ONLINE, 2017).

2.4.1.3.4 Sensor de Fim de Curso

Os sensores de fim de curso são componentes que tem como princípios básicos referenciar os eixos de movimentação e garantir a segurança durante o funcionamento do equipamento (MARLIN, 2020). Nos eixos horizontais de máquinas RepRap, são utilizados majoritariamente três tipos de sensores: Mecânicos, ópticos e magnéticos, já no eixo vertical, os sensores são conhecidos como sondas, que podem ser formados por sensores indutivos, capacitivos, e por contato:

- a) sensor mecânico é o tipo mais simples de sensor, sendo posicionado no fim do curso do eixo, podendo ter sua atuação com ou sem contato físico. O sensor com contato físico é um interruptor momentâneo simples que troca de estado pelo contato de alguma parte móvel do equipamento na posição determinada como limite de movimento. O sensor sem contato físico é chamado de *reed switch*, que é um sensor que, ao aproximar um imã, tem seu contato elétrico interno fechado, permitindo passagem de corrente elétrica. Os sensores mecânicos possuem tem a tendência de possuir os valores mais baixos entre os sensores, e podem ser usados diretamente com os controladores, sem nenhum circuito intermediário, porém, não possuem uma boa repetibilidade, o que impossibilita seu uso no eixo vertical, que necessita de maior precisão (REPRAP, 2014);
- b) sensores de fim de curso ópticos são interruptores que utilizam a luz para realizar a troca de seu estado lógico, quando um obstáculo bloqueia a transmissão de luz entre seu emissor e receptor. Um interruptor ótico geralmente é composto por um LED infravermelho, que atua como o transmissor, e um fototransistor, que atua como receptor. A mudança de estado na saída do sensor ocorre quando um obstáculo obstrui a incidência da iluminação do LED sobre o fototransistor (BRITO, 2019);
- c) sensores magnéticos de fim de curso são dispositivos que atuam com o princípio do efeito Hall. O efeito Hall consiste em aproximar um Campo magnético próximo a um sensor de efeito Hall, gera-se uma diferença de potencial entre os polos do sensor, e essa diferença indica a proximidade do elemento magnético. (NETO *et al.*, 2010). A diferença principal de um sensor Hall e um *reed switch* é que o sensor Hall necessita de um circuito

sempre alimentado para seu funcionamento, enquanto um *reed switch* funciona como um interruptor comum;

- d) sensor indutivo é um sensor de proximidade que faz a detecção de objetos metálicos. Segundo Brito (2019), para realizar a detecção de materiais, o sensor indutivo capta a variação do campo magnético de sua bobina por meio da interferência de outro campo magnético gerado por um objeto metálico, e a distância de detecção de um objeto varia conforme o diâmetro do sensor;
- e) sensor capacitivo diferentemente do sensor indutivo, este sensor detecta a variação da capacidade, por meio da criação de um campo eletrostático na face de detecção. Por ter seu funcionamento baseado nas propriedades dielétricas dos materiais, os sensores capacitivos podem detectar a proximidade com materiais não-metálicos (BRITO, 2019);
- f) sensor de contato atua na detecção por meio do contato físico com a superfície. Para o eixo vertical de impressoras 3D, esse sensor normalmente é composto por um interruptor mecânico acoplado à um servo motor. Quando necessário, o servo motor abaixa o sensor para prepará-lo para a detecção da superfície, e assim que detectada, ele retorna à posição original. Em impressoras 3D equipadas com este tipo de sensor, é possível verificar o nivelamento e possíveis imperfeições da mesa de impressão (REPRAP, 2016).

2.4.1.4 Software

Os softwares são essenciais, estes são utilizados para projetar produzir, reparar e processar os modelos 3D em código para a leitura da impressora. Divididos em três partes principais, software CAD, CAM e controle.

2.4.1.4.1 Software CAD

Este software é utilizado para gerar a modelagem digital do produto, o que permite que sejam testados, analisados de modo próximo ao modelo físico (Chua; Leong 2014). Atualmente existem diversos softwares para modelar os objetos, tais como Tinkercad, Fusion 360, Blender, OpenScada, AutoCAD, Solidworks, entre outros.

2.4.1.4.2 Software CAM

Software CAM também conhecido como “*Slicers*”, isto é, fatiador, é uma aplicação que constitui as camadas necessárias para impressão 3D, a partir do modelo em 3D do *software CAD*, para cada objeto distinto é criado um código diferente. Inicialmente gerava um arquivo de comando numéricos (NC), atualmente gera-se um arquivo *G-Code*, onde este é uma linguagem composta por diversos comandos para execução da impressão 3D. O arquivo *G-Code* define todas as camadas fatiadas em um único arquivo, que é interpretado pela maioria das impressoras (TAKAGAKI, 2012), de acordo com Silva (2019) também existem formatos que são proprietários, ou seja, não podem ser interpretados por todas as impressoras, somente por alguns. Pode-se destacar dentre os diversos programas, o Simplify3D que é um fatiador proprietário e o Cura que é um *software open Source*.

2.4.1.4.3 Software de Controle

Este *software*, também conhecido como *host*, é responsável pelo controle adequado da impressora, onde controla os movimentos, define e monitora a temperatura da mesa e da extrusora, assim como inicia, pausa e cancela os trabalhos de impressão, e processa o arquivo *G-Code*. Existem vários modelos de *host* com funções distintas, podemos destacar três *softwares* mais usados, Octoprint, Repetier *host*, Printron.

2.4.1.5 Firmware

O *firmware* é composto por toda a informação da parte mecânica da impressora 3D, como recursos que podem ser utilizados e partes funcionais da máquina. A partir da modificação do *firmware* que é configurado se a impressora tem mesa aquecida, quantidade de extrusores, dimensões para movimentação, tipos de sensores, velocidades de trabalho, e toda e qualquer informação que seja utilizada no processo de impressão (SAMPAIO, 2017).

Ainda Sampaio defende que no princípio do desenvolvimento de impressoras RepRap, os códigos utilizados nos *firmwares* requeriam modificações complexas para qualquer modificação física mínima na montagem das máquinas. Os códigos

começaram a evoluir para um conceito que é utilizado hoje a partir de 2011, quando surgiram *firmwares* como o Sprinter e o Repetier.

Segundo Salinas (2014), os *firmwares* mais utilizados atualmente são o Sprinter e o Marlin.

3 METODOLOGIA

Para este projeto a metodologia aplicada foi a execução de um *retrofit*, com isto neste capítulo serão descritos os elementos e passos necessários, assim como os resultados obtidos através desta aplicação.

3.1 RETROFIT

O termo *retrofit* tem origem na concatenação da palavra *retro*, que em latim significa movimentar-se para trás, e *fit*, que em tradução do inglês, significa ajuste. O conceito de *retrofit* surgiu na década de 90, Estados Unidos e Europa, onde inicialmente foi utilizado no setor aeronáutico, quando se realizava a atualização de aeronaves com equipamentos novos e mais modernos que os utilizados anteriormente (BARRIENTOS, 2004).

De acordo com Leite (2007, p. 26) “*retrofit* de máquinas e equipamentos industriais, também conhecidos como reforma ou modernização, pode ser a solução para empresas que pretendem dar uma ‘sobrevida’ para máquinas antigas[...]”, isto é, produzir um aumento no tempo útil da máquina, agregando uma atualização na mesma, visando a sua otimização com um custo unitário reduzido.

Wilkins (2018) afirma que a indústria 4.0 agrega várias vantagens tais como monitoramento remoto, maior flexibilidade, entre outros, e que não há necessidade de gerar uma fábrica nova para angariar esses benefícios, pois o *retrofitting* acrescenta novos recursos e/ou funções a equipamentos antigos, o que auxilia principalmente as empresas de pequeno e médio porte, pois estas não teriam condições de comprar grandes quantidades de equipamentos novos.

Ainda o autor denota que a aplicação do *retrofit* vem aumentando na indústria, pois, melhora as capacidades do equipamento, e realiza a possibilidade de integração de máquinas antigas na indústria 4.0, além de melhorar a eficiência, estender a vida útil do dispositivo, entre outros benefícios.

Os autores Grams e Cetnarowski (2014) defendem que o *retrofit* deve seguir as seguintes etapas:

- a) avaliação do equipamento;
- b) desenvolvimento do projeto;
- c) compra de materiais;
- d) implementação do projeto;

e) testes.

Para o desenvolvimento do projeto, Camillo (2020) declara que a escolha correta de hardware e software para o *retrofit*, possibilita o aumento da capacidade da empresa em atingir seus objetivos. Grams e Cetnarowski (op. cit.) afirmam que a etapa de implementação do projeto pode ser dividida em *retrofit* de hardware e *retrofit* de software. A seguir serão descritas as etapas aplicadas ao projeto.

3.1.1 Metodologia para a avaliação da impressora CubeX Duo

Nesta etapa é realizado o levantamento detalhado das condições operacionais da impressora. Primeiramente foi averiguado que ela utiliza um software proprietário de fatiamento, o que limita suas configurações e somente permite o uso dos cartuchos de filamentos originais, o que acarreta um alto custo. Além disso não é acoplada uma mesa aquecida o que compromete a qualidade das peças impressas. Pode-se verificar que seu extrusor possui resíduos de material o que dificulta a posição correta.

Na seção 4.1 será especificado o resultado da avaliação da impressora de forma mais completa, detalhando a avaliação para cada macro componente.

3.1.2 Metodologia para o desenvolvimento do projeto

Após a avaliação da impressora 3D CubeX Duo, para a execução do projeto se faz indispensável a realização de um levantamento dos itens disponíveis em mercado para atender as necessidades do *retrofit* da impressora.

Inicialmente foram pesquisados os *firmwares* mais utilizados e disponíveis no mercado:

- a) Sprinter é um dos primeiros *firmwares* desenvolvidos, e possui a suporte à impressão offline por meio de cartão de memória, controladores PID para temperatura, controle de aceleração exponencial constante, e mesas aquecidas. É compatível com placas que utilizam microcontroladores AVR®;
- b) Marlin é um dos principais *firmwares* utilizados na comunidade RepRap atualmente, pois possui suporte a todos os recursos do Sprinter, e suporte à uma grande quantidade de microcontroladores, proteção térmica baseada em interrupção, interação com *Liquid Crystal Display* (LCD) com encoder ou touchscreen, suporte a cartão de memória com subpastas e nomes longos,

suporte a curvas Arco e Bezier e suporte a auto nivelamento da mesa de impressão;

- c) Klipper é um *firmware* recente, que possui o conceito de utilizar um *host*, como um Raspberry Pi⁵, para realizar os cálculos cinemáticos, e então envia para o controlador somente os comandos de movimento. Possui capacidade de movimentação precisa, mesmo em microcontroladores de *8-bits*, e sua configuração pode ser realizada sem regravação de *firmware*. Seu funcionamento está condicionado a instalação de um host;
- d) TeaCup é um *firmware* que possui fácil configuração, através de uma ferramenta de configuração própria. Possui compatibilidade com uma grande quantidade de microcontroladores, e suporte às funções de fresamento;
- e) RepRap *firmware* funciona somente em microcontroladores de *32-bits*, e foi desenvolvido inicialmente para a utilização em impressoras em formato delta. Este *firmware* cria uma interface *web* para sua utilização e sua configuração é feita por meio de um arquivo em um cartão de memória;
- f) Smoothie é o *firmware* desenvolvido para as controladoras *smoothieboard*, e possui compatibilidade com uma quantidade pequena de controladoras. Possui a possibilidade de uma grande customização de configurações e uma grande comunidade de desenvolvimento. Dispõe da possibilidade de adaptação para utilização com fresas e cortadores a laser.

Em seguida se faz necessário o levantamento das controladoras, foi observado que no mercado atual existem diversos modelos à disposição, para tomada de decisão foram levantados dados de algumas, levando em consideração a quantidade de informações disponíveis na comunidade RepRap, citadas a seguir:

- a) Ramps 1.4 é a controladora mais popular utilizada na confecção de impressoras RepRap. Esta placa é definida como uma *shield* para a já conhecida placa de desenvolvimento Arduino Mega, onde ela possui cinco *slots* para *drivers* de motor de passo, porta para controle de mesa aquecida e pinos disponíveis para expansão. Um problema recorrente desta placa é

⁵ Microcomputador de baixo custo, com o tamanho de um cartão de crédito, desenvolvido pela empresa Raspberry pi. Disponível em <<https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>> Acesso dia 02/06/2020.

quanto ao seu dimensionamento elétrico para os aquecedores, onde pode não ser suficiente para o correto funcionamento dos mesmos. Pode-se verificar seu custo na Tabela 2;

- b) Rumba Plus é uma controladora baseada na controladora Ramps, porém, tem seu microcontrolador e circuitos de potência integrados em uma única placa. Possui seis *slots* para *drivers* de motor de passo e possibilidade de trabalhar com tensões que variam entre 12 e 35 Volts. Seu custo pode ser verificar na Tabela 2;
- c) *Smoothieboard* é uma controladora que possui um microcontrolador de 32-bits, que pode entregar um movimento mais rápido e suave aos motores de passo. Pode ser utilizada nativamente com cartão de memória ou via rede *ethernet*, e possui os *drivers* de motor de passo integrados à placa. Possui a limitação de utilizar apenas o *firmware smoothie*, seu custo comercializado internacionalmente pode ser observado na Tabela 2;
- d) *Duet* é uma controladora de 32-bits, que possui os *drivers* de motor de passo integrado a placa, e possuem ainda a possibilidade de utilizar uma placa de expansão, permitindo controlar simultaneamente nove motores de passo. Em sua última versão, esta controladora ainda tem a possibilidade de utilizar telas com tecnologia *High-Definition Multimedia Interface* (HDMI) e *touchscreen* para a interface homem máquina. O custo aproximado da placa principal via importação pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2: Custo aproximado controladoras.

Modelo	Preço (R\$)
Ramps	100,00
Rumba Plus	180,00
Smoothieboard	400,00
Duet	400,00

Fonte: Autores, 2020

Após a análise dos *firmwares* foi buscado um sensor de nivelamento que possua uma alta precisão na detecção de posição. Foram encontradas algumas opções listadas abaixo, com seus respectivos custos aproximados na Tabela 3:

- a) sensores indutivos/capacitivos são sensores simples, que detectam por meio de aproximação a distância da mesa com o sensor. Estes sensores possuem uma precisão razoável e um custo baixo;
- b) interruptor ligado à um Servo motor é um tipo de sensor que possui a vantagem de possuir um baixo custo de construção, porém, não entrega uma boa repetibilidade;
- c) BLTouch é um sensor da marca Antclabs, que é construído utilizando-se um sensor hall e um solenoide. Este sensor trabalha com a detecção de movimento de um pino quando toca a mesa. Possui uma boa precisão.

Tabela 3: Custo aproximado sensores de nivelamento

Modelo	Preço (R\$)
Indutivos/Capacitivos	79,00
Interruptor	24,00
BLTouch	193,00

Fonte: Autores, 2020

Com esses dados foram pesquisados *drivers* de motor de passo, denota-se abaixo alguns que atendem as especificações do projeto, e na Tabela 4 seus respectivos custos:

- a) A4988 é um modelo de *driver* para motores de passo que é amplamente utilizado em equipamentos RepRap, possui custo reduzido e possibilidade de funcionamento com motores que consomem até dois Amperes de pico. Este *driver* tem a capacidade de realizar a configuração de micro passos na escala 1/16;
- b) DRV8825 é um *driver* de motor de passo similar ao modelo A4988, porém possui maior capacidade em relação à micro passos, atingindo a relação de 1/32, e possui maior capacidade de corrente, podendo ser utilizado com motores de até 2.5 Amperes de consumo;
- c) TMC2130 é um *driver* fabricado pela *Trinamic*, e tem a característica principal de produzir um movimento extremamente suave e silencioso no motor de passo, atingido por sua capacidade de atingir a relação de 1/256 micro passos, e possui uma capacidade de acionar motores com consumo de até 2 Amperes. O seu custo fica em torno de quatro vezes o custo de um *driver* DRV8825 como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4: Custo aproximado driver de motor

Modelo	Preço (R\$)
A4988	8,70
DRV8825	19,90
TMC2130	78,90

Fonte: Autores, 2020

Para a seleção da extrusora, considerando este ser um componente fundamental no processo de impressão, foi pesquisado definindo como critério a qualidade da peça final. A seguir são apresentados alguns modelos e na Tabela 5 pode ser verificado seus custos aproximados:

- a) E3D V6 é o mais famoso, utilizado e customizável *hotend* disponível para compra atualmente. Possui construção modular, que possibilita imprimir utilizando uma grande quantidade de tipos de materiais com alta qualidade, que é atingida pela vasta quantidade de dimensões e materiais de bicos disponíveis;
- b) Slice Engineering Mosquito é um produto relativamente novo, porém, com um conceito diferente da maioria dos *hotend* disponíveis à venda. Ele é construído com uma estrutura de metal, que é utilizada para fixação, o que possibilita que o dissipador de calor da parte superior da peça seja fabricado em cobre, realizando uma refrigeração mais eficiente. Além disso, existe a compatibilidade com a grande variedade de bicos dos modelos E3D;
- c) DisTech Automation Prometheus V2 é um *hotend* alemão, fabricado inteiramente de aço inoxidável, com a única peça removível, o bico, fabricado do mesmo material do corpo do componente, o que o torna uma ótima escolha para a impressão de modelos que podem entrar em contato com alimentos e bebidas;
- d) o E3D Titan Aero engloba as funcionalidades do *hotend* V6, com a incorporação da refrigeração diretamente no extrusor e torna a montagem da peça compacta. Esta montagem permite a impressão em velocidades mais altas, sem a vibração que um dissipador longo pode gerar.

Tabela 5: Custo aproximado extrusora

Modelo	Preço (R\$)
E3D V6	300,00
Slice Engineering Mosquito	800,00
DisTech Automation	470,00
Prometheus V2	
E3D Titan	700,00

Fonte: Autores, 2020

Para realização da interação homem máquina, foi explorado as opções de *display* disponível em mercado, que ofereça qualidade e possua uma ótima relação custo benefício. Abaixo estão listadas algumas opções, com seus respectivos custos na Tabela 6:

- a) o *display* LCD 2004 (Figura 10) conta com vinte colunas e quatro linhas, onde pode exibir simultaneamente até 80 caracteres, possui uma resolução total de 3200 pixels, pode ser alimentado com uma tensão de 3,3 ou 5 volt dependendo do controlador utilizado, vem incluso um leitor de cartão de memória, um *encoder* rotativo para seleção do menu;

Figura 10: *Display* LCD2004.Fonte: Página da web Acelera3D⁶.

- b) o LCD12864 da Makerbase (Figura 11), é um controlador inteligente gráfico que possui um *display* LCD 128x64, um leitor de cartão de memória para impressão *offline*, ainda é acoplado um *encoder* rotativo para realização

⁶ Disponível em:<<https://acelera3d.com/produto/display-2004/>>. Acesso em 10/05/2020.

da seleção dos itens do *display*, pode ser alimentado com uma tensão entre 3,3 ou 12 Volts;

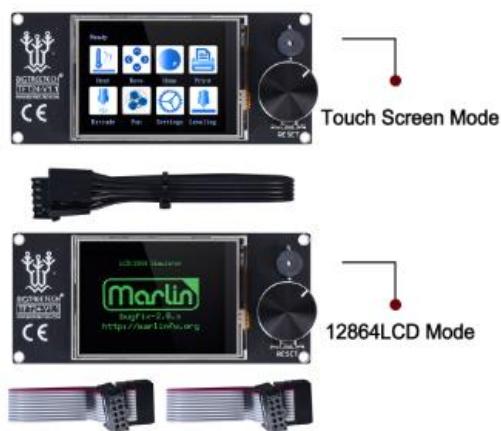
Figura 11: *Display LCD12864 da Makerbase.*



Fonte: Página de compras AliExpress⁷.

- c) o modelo TFT24 da marca Bigtreetech (Figura 12) é uma placa que possui todos os benefícios do *display* LCD12864 com o acréscimo da possibilidade de utilizar as funcionalidades avançadas e impressão via USB (Universal Serial Bus, porta serial universal) no modo *touchscreen*;

Figura 12: Modelo TFT24 da Bigtreetech.



Fonte: Página de compras AliExpress⁸.

⁷ Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/32808902457.html?spm=a2g03.12010612.8148356.1.d7707494cPE8P9>>. Acesso em 10/05/2020.

⁸ Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/33048619460.html?spm=a2g0o.store_home.hotSpots_1142235541.5>. Acesso em 10/05/2020.

d) o *display* MKS TFT28 da marca Makerbase (Figura 13), é uma tela *touchscreen* que pode ser utilizada independentemente da impressora, pode ser alimentada com uma tensão de 5 ou 12 Volts, realiza a impressão através do cartão de memória ou *pendrive*, suporta função WIFI (*Wireless Fidelity*), permite atualização do *firmware* via cartão de memória.

Figura 13: *Display* modelo TFT28.



Fonte: Página de compras AliExpress⁹.

Tabela 6: Custo aproximado display

Modelo	Preço (R\$)
LCD 2004	50,00
LCD12864	70,00
TFT24	85,00
MKS TFT28	108,27

Fonte: Autores, 2020

Levando em consideração a pesquisa bibliográfica denotada no capítulo 2, pode-se afirmar que possuir uma base aquecida, gera uma melhor impressão, pois possibilita uma melhor aderência da peça a mesa. Para a construção da base aquecida foi inicialmente realizado um levantamento de dados quanto as opções de aquecimento para base, onde abaixo estão relatadas algumas opções encontradas:

⁹ Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1000008461884.html?spm=a2g0s.8937460.0.0.816c2e0ey4t1wL>>. Acesso em 10/05/2020.

- a) a base aquecedora MK3 é uma base com núcleo de alumínio que pode operar sob tensão contínua de 12 ou 24 Volts e potência máxima de 360 Watts, que pode levar esta placa a atingir temperaturas de até 180 graus Celsius;
- b) a manta aquecedora de silicone opera sob tensão alternada da rede geral de distribuição de 127 Volts, o que permite a operação de sua potência de 750 Watts sem sobrecarga dos condutores elétricos. Essa alta potência de aquecimento permite que a mesa atinja a temperatura definida para o início da impressão em poucos segundos, reduzindo o tempo perdido com o aquecimento inicial. A temperatura máxima recomendada para sua utilização é de 200 graus Celsius.

3.1.3 Metodologia da implementação do projeto

Para a implementação do projeto deve-se realizar as verificações estruturais, isto é, verificação dos rolamentos, alinhamento da mesa e dos eixos. Também as modificações mecânicas, iniciando pela troca dos *hotends*, suporte da mesa aquecida e remoção dos suportes para cartuchos de filamentos.

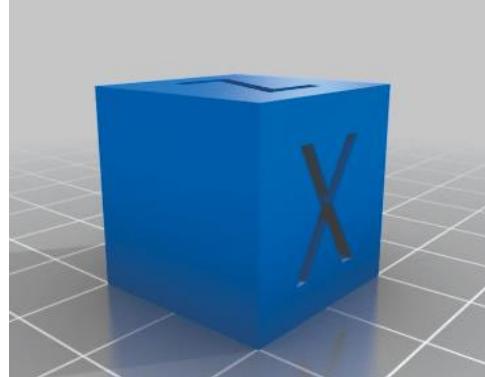
Finalizando a estrutura e a parte mecânica, é planejado o início das substituições dos componentes eletrônicos, começando pela controladora e *drivers* de motores de passo, *display*, sensor de nivelamento, fonte e por último realizar a instalação do conjunto para base de aquecimento. Após todas as instalações eletrônicas, a instalação do *firmware* e posteriormente as calibrações iniciais em relação a movimentação e aquecimento da impressora.

3.1.4 Metodologia dos testes

Para esta etapa, inicialmente são realizados os testes de impressão, utilizando técnicas de Benchmark, onde estas consistem numa impressão de um modelo com parâmetros pré definidos, onde para cada peça é avaliado um ou mais parâmetros da impressora. Para estes testes pode ser utilizado modelos disponíveis na comunidade RepRap.

O primeiro modelo é conhecido como cubo de calibração XYZ (Figura 14), este é utilizado para identificação de problemas em eixos individuais, tais como folgas em correias ou problemas de estabilidade no eixo z.

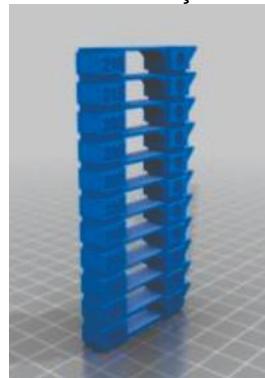
Figura 14: Cubo de calibração XYZ.



Fonte: Página blog 3DLAB¹⁰.

Para o ajuste da temperatura ideal para cada tipo de material, pode ser utilizado o modelo conhecido como torre de calibração de temperatura (Figura 15), onde com esse é gerado uma peça onde para cada faixa de altura utiliza uma temperatura distinta, após a impressão pode ser realizado uma análise visual da peça para definir qual o melhor valor de temperatura.

Figura 15: Torre de calibração de temperatura.



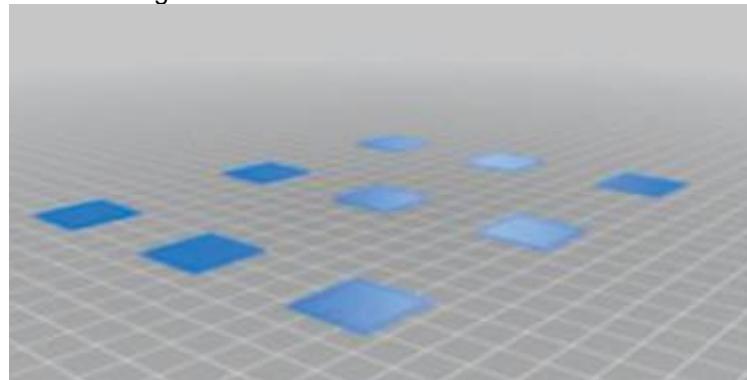
Fonte: Página blog 3DLAB¹¹.

Para nivelamento da mesa pode-se fazer uso do modelo de teste de nivelamento de mesa (Figura 16), onde é realizada a impressão de nove quadrados igualmente distribuídos. Deve-se avaliar se todos os quadrados possuem a mesma espessura.

¹⁰ Disponível em: <<https://3dlab.com.br/calibrar-sua-impressora-3d/>> Acesso em 26/05/2020.

¹¹ Disponível em: <<https://3dlab.com.br/calibrar-sua-impressora-3d/>> Acesso em 26/05/2020.

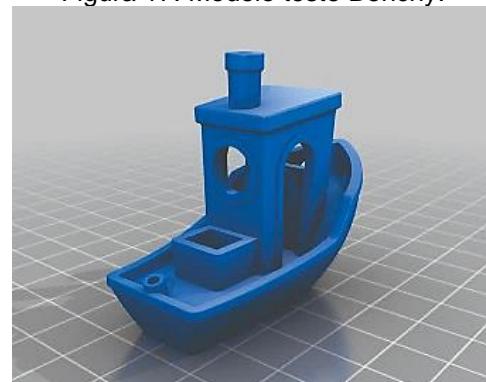
Figura 16: Teste de nivelamento da mesa.



Fonte: Página blog 3DLAB¹².

Por último é realizado o teste com o modelo que é amplamente utilizado para comparação entre impressoras, conhecido como Benchy (Figura 17), através desse modelo pode-se visualmente avaliar a impressora, pois se possuir algum detalhe fora do padrão esperado no modelo, deve-se verificar minuciosamente a impressora em busca de algum elemento passível de melhoria.

Figura 17: Modelo teste Benchy.



Fonte: Página blog 3DLAB¹³.

¹² Disponível em: < <https://3dlab.com.br/calibrar-sua-impressora-3d/> > Acesso em 26/05/2020.

¹³ Disponível em: < <https://3dlab.com.br/calibrar-sua-impressora-3d/> > Acesso em 26/05/2020.

4 APLICAÇÃO DO RETROFIT

Nesta seção será descrito a realização das etapas da técnica de *retrofit*.

4.1 AVALIAÇÃO DA IMPRESSORA CUBEX DUO

Nesta subseção para uma melhor obtenção de resultado, será dividida em duas etapas, avaliação de hardware e avaliação de *software* da impressora CubeX Duo. Ainda, será realizada uma avaliação macro dos componentes.

4.1.1 Avaliação de Software

Foi avaliado inicialmente o *software* fornecido junto com a impressora, que continha um bloqueio na utilização de filamentos genéricos, e devido ao alto custo do filamento original da impressora, resultava na impossibilidade de impressão. Se fez então necessário encontrar uma nova forma de contornar este impedimento, onde através de pesquisa em sites específicos de impressão 3D, foi possível avaliar dois métodos diferentes para este problema.

O primeiro método consiste na modificação do *G-Code* gerado pelo *software* de fatiamento oferecido pelo fornecedor, onde se faz necessário exclusão de algumas linhas do código, estas responsáveis pela verificação do acoplamento e quantidade de filamento disponível, a partir disto foi possível realizar uma impressão teste, que pode ser observada na Figura 18.

Figura 18: Primeiro teste de impressão utilizando *software* CubeX.

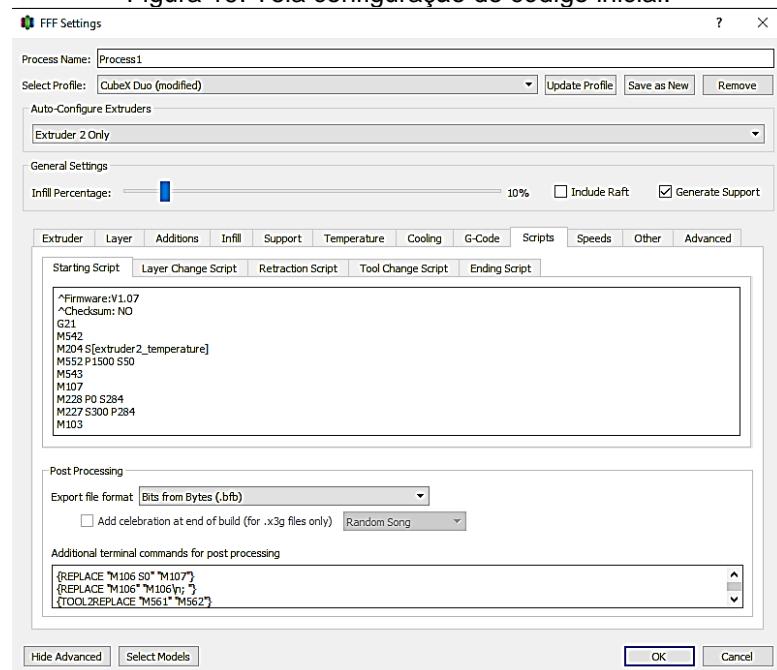


Fonte: Autores, 2020.

Pode observar que a impressão não segue as medidas previamente estipuladas no modelo 3D e o software gera uma camada de adesão que acarreta num acabamento de baixa qualidade.

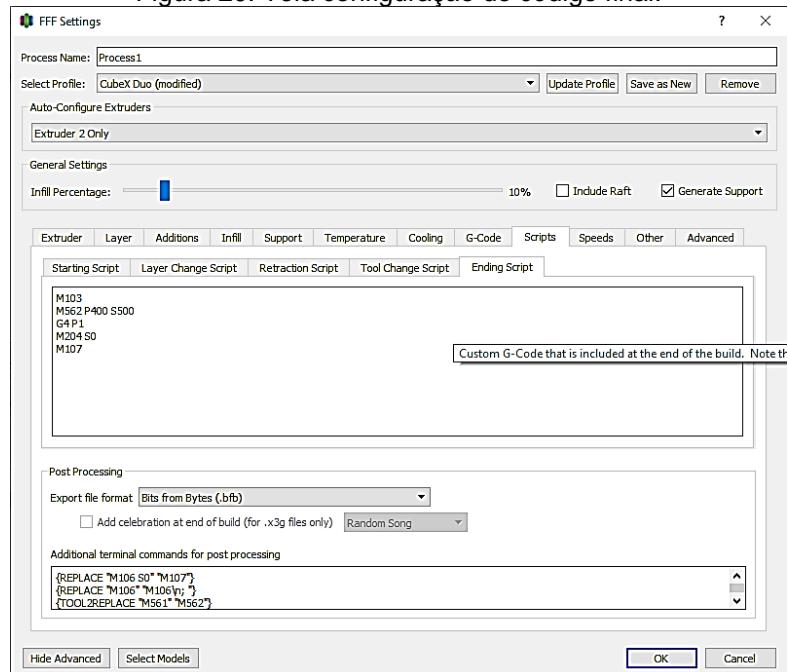
O segundo método é caracterizado pela utilização de softwares de terceiros para fatiamento da peça. Onde deve-se configurar um perfil específico para impressora, constando o início e fim da impressão, tamanho da área de impressão, posição dos extrusores e velocidade de impressão, um exemplo destas configurações estão exemplificadas nas Figuras 19, 20 e 21.

Figura 19: Tela configuração do código inicial.



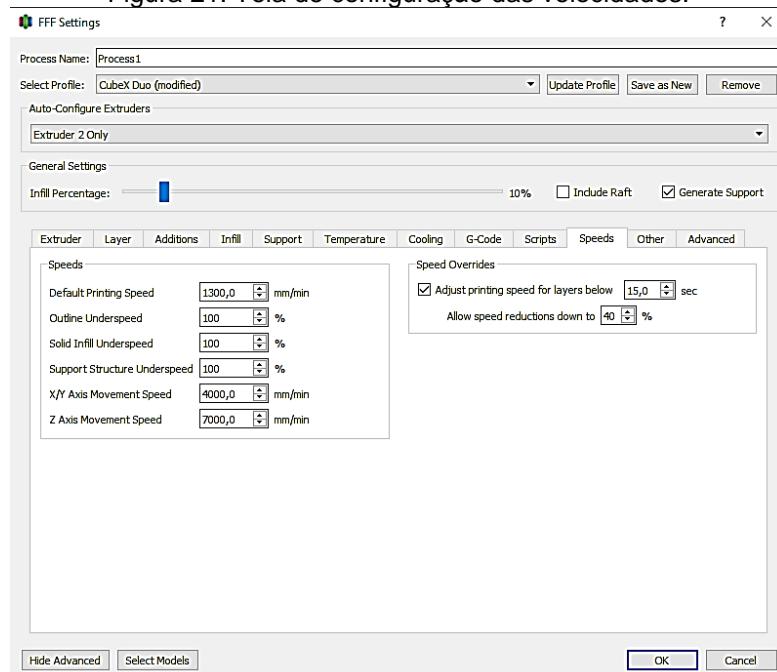
Fonte: Autores, 2020.

Figura 20: Tela configuração do código final.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 21: Tela de configuração das velocidades.



Fonte: Autores, 2020.

Após realizadas as etapas de configuração do software de fatiamento, é gerado o arquivo G-Code onde a partir deste é realizado a impressão (Figura 22).

Figura 22: Segundo teste utilizando o *software* de terceiros.



Fonte: Autores, 2020.

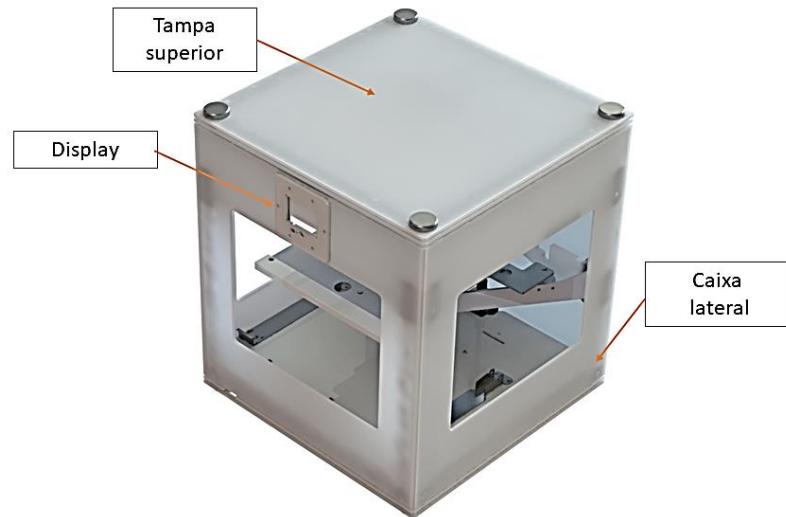
Após a impressão pode-se observar que a qualidade continua sendo baixa, assim como o dimensionamento encontra-se ainda incorreto, mesmo tendo um maior controle dos parâmetros de impressão.

A partir dos testes de impressão foi possível verificar que os softwares disponibilizados pela marca não permitem ajustes nas configurações para impressão, além de somente permitir o uso de filamentos ABS e PLA da marca, e mesmo com a utilização dos métodos que quebram este bloqueio, não foi possível a realização de uma impressão satisfatória.

4.1.2 Avaliação de Hardware

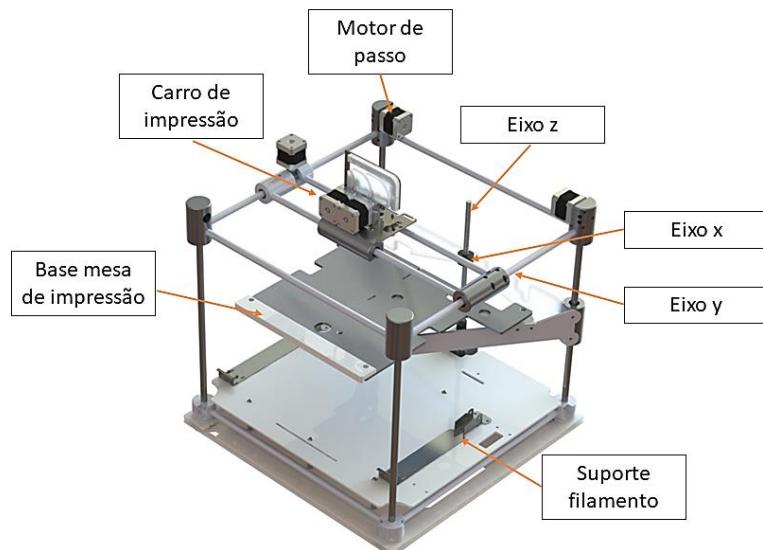
Após os testes de *software* foi possível realizar a avaliação de *hardware*. Para melhor entendimento, essa avaliação foi dividida por componentes, além disso foram desenvolvidos modelos CAD (Figuras 23, 24 e 25), onde podem ser visualizados o posicionamento de cada componente.

Figura 23: Modelo CAD da impressora original completa.



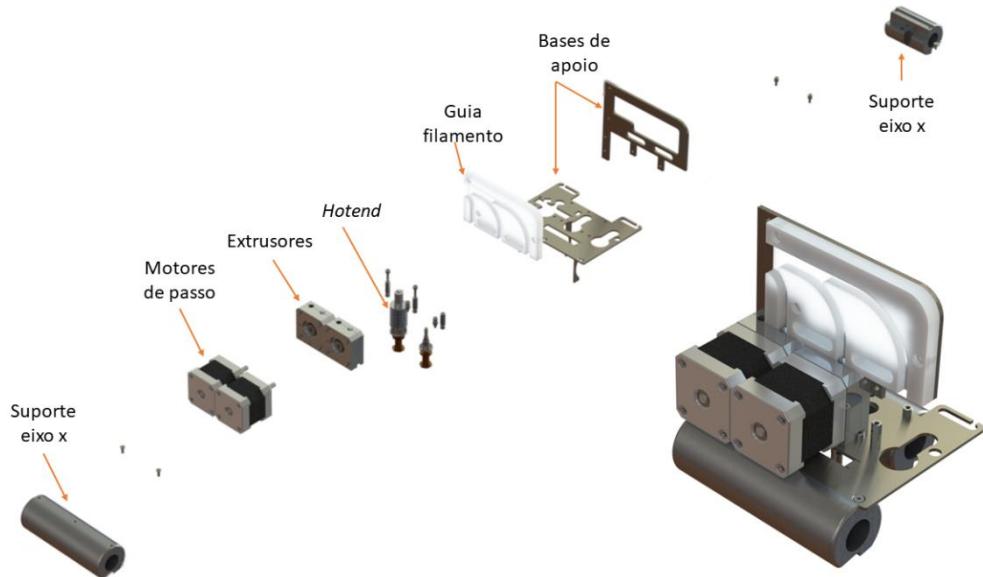
Fonte: Autores, 2020.

Figura 24: Modelo CAD da impressora original, sem proteção exterior.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 25: Vista explodida, carro de impressão.



Fonte: Autores, 2020.

4.1.2.1 Main Board

A *main board*, ou placa mãe, disponível na impressora é um modelo próprio da marca, onde sua única limitação é a impossibilidade de instalação de um *firmware* diferente do fornecido.

4.1.2.2 Drivers para motores de passo

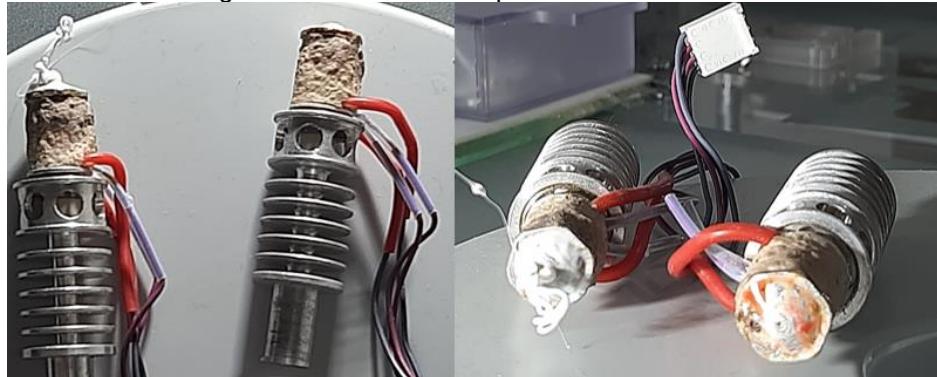
A impressora CubeX Duo possui cinco *drivers* para o controle dos motores de passo, responsáveis pela movimentação dos eixos x, y e z soldados à placa mãe , os outros dois *drivers* são para controle dos extrusores, ambos podem ser removíveis, mas não possuem documentação disponível, o que dificulta a sua utilização em uma nova placa mãe.

4.1.2.3 Hotend

A CubeX Duo possui dois *hotends*, que não possuem uma documentação para a configuração, além disso, sua construção não possibilita a troca de partes separadas. Quando há necessidade de manutenção deve ser realizada a troca do mecanismo completo, agregando alto custo. Pode-se denotar ainda que possui um ângulo onde gera um contato desnecessário com a peça de impressão, provocando

deformação. Visivelmente (Figura 26) os *hotends* possuem resíduos de materiais incrustados que durante a impressão dificultam a posição do material de maneira uniforme.

Figura 26: *Hotends* da impressora CubeX Duo.

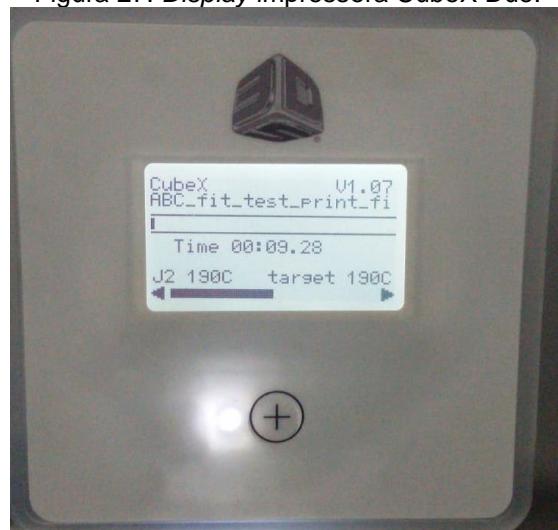


Fonte: Autores, 2020.

4.1.2.4 Display

O *Display* atual (Figura 27) não possui documentação disponível, além de ser um *display* resistivo, dificultando o reconhecimento por parte do *touch screen*.

Figura 27: *Display* impressora CubeX Duo.



Fonte: Autores, 2020.

4.1.2.5 Mesa de impressão

A mesa pertencente a CubeX Duo é formada por um material passível de deformação com a sua utilização, além de não ser aquecida, o que prejudica a aderência das peças impressas causando grande desperdício de matéria prima por impressões mal sucedidas.

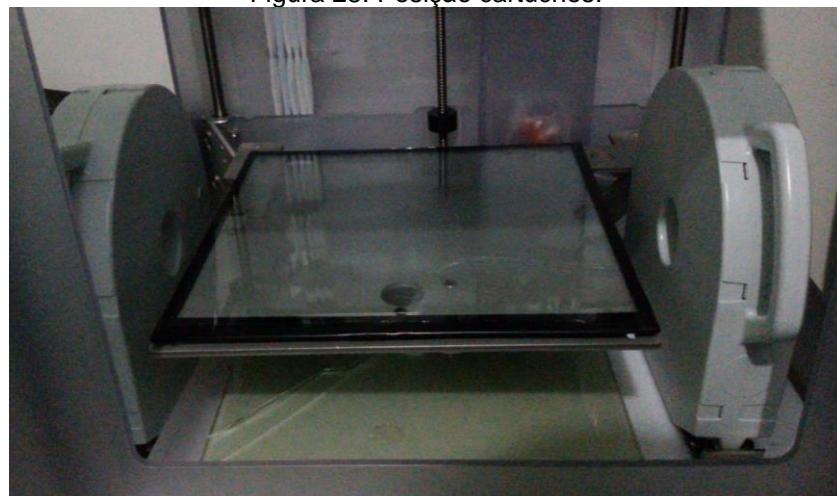
4.1.2.6 Sensor de nivelamento

O sensor de nivelamento disponível na CubeX Duo é magnético idêntico aos sensores de posicionamento, onde a verificação de altura é realizada em somente um único ponto da mesa de impressão, e seu nivelamento é realizado de modo manual, ocasionando uma baixa precisão e influencia na não repetibilidade, pois podem ocorrer impressões de um mesmo modelo 3D iniciados em níveis distintos.

4.1.2.7 Cartuchos

Originalmente os cartuchos da CubeX Duo são posicionados nas laterais do interior da impressora (Figura 28), o que reduz a área de impressão. Ainda possuem um chip que informa se estão acoplados à impressora e a quantidade de material disponível para uso, bloqueando o funcionamento da impressora quando não é detectado o acoplamento ou quando indica que o filamento foi totalmente utilizado.

Figura 28: Posição cartuchos.



Fonte: Autores, 2020.

A partir desses cartuchos os filamentos são conduzidos por um tubo até a extrusora, estes tubos causam a quebra do material e consequentemente a perda de produto, pois quando a impressora detecta o rompimento do filamento, cancela imediatamente a impressão, causando assim o desperdício do material já utilizado na impressão até aquele momento.

4.1.2.8 Resfriamento da peça

O resfriamento da peça se dá através dos três *coolers* posicionados ao redor das extrusoras (Figura 29), dissipando o ar sem direcionamento, baixa eficiência, reduzindo assim a qualidade final da peça.

Figura 29: Posicionamento Coolers.



Fonte: Autores, 2020.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Após a avaliação da impressora 3D CubeX Duo, e com o levantamento dos itens disponíveis em mercado que atendem as necessidades do *retrofit* da impressora (seção 3.1.2), foi possível selecionar os componentes que agregarão o projeto.

Iniciando pela controladora Rumba Plus, esta foi selecionada por conta do seu custo benefício, a disponibilidade de informação acessível, quantidade de *slots* para *drivers* e a possibilidade de trabalhar com tensões mais elevadas. Considerando a decisão da placa, pode-se selecionar o *firmware*, onde foi escolhido o Marlin, que possibilita a utilização do *software* que já está em uso nas outras impressoras 3D da

PUCPR. Possui ainda uma vasta quantidade de informação disponibilizada e gera a oportunidade de compensação do nivelamento da mesa durante a impressão.

Após a análise das opções dos sensores de nivelamento foi selecionado o da marca Antclabs modelo BLTouch, pois possui uma boa repetibilidade na impressão e a possibilidade de medição de múltiplos pontos da mesa.

Considerando a tensão de trabalho, a carga dos motores, a suavidade do movimento entregue e o custo benefício foi selecionado o driver de motor DRV8825.

O *hotend* da marca E3D modelo V6 foi selecionado pois é amplamente conhecido, o que agrega em várias fontes de informações, além de possuir facilidade de adaptação com os extrusores originais da impressora.

Para o projeto foi selecionado o *display* da marca Bigtreetech modelo TFT24, pois possui a disponibilidade de utilização via *touchscreen* ou via *encoder* rotativo, além de ter um ótimo custo benefício.

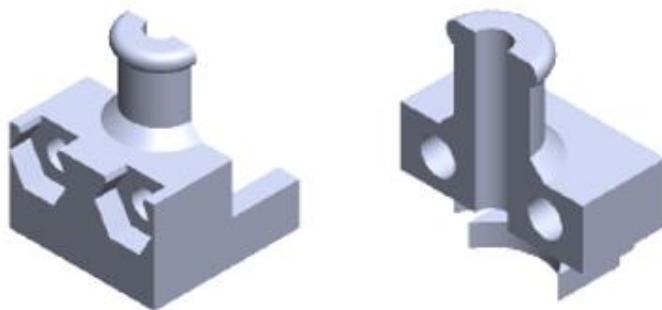
Através da análise, foi escolhido utilizar para base o conjunto que contém uma manta aquecedora de silicone e, portanto, se fez necessário a utilização de um relé de estado sólido de 25 Amperes, para o controle do aquecedor através do conjunto de placa e *firmware* escolhidos anteriormente. Ainda houve a necessidade da implementação de uma chapa de alumínio, para servir de suporte e distribuir uniformemente o calor do aquecimento irradiado pela manta. Neste conjunto será adicionado uma placa de cortiça para reduzir a dissipação de calor da região abaixo da manta de aquecimento. Também será acrescentado um espelho que além de auxiliar na obtenção de uma peça com melhor qualidade, servirá como base removível da impressora, o que auxiliará ao final da impressão, a remoção do modelo impresso.

Para alimentação do conjunto eletrônico, haverá a necessidade do redimensionamento da fonte de alimentação, pois a atual não alimenta corretamente os aquecedores selecionados, para isto foi escolhido uma fonte de 24 Volts e 15 Amperes, onde além de alimentar corretamente o sistema, possibilitará um torque constante para os motores de passo e um aquecimento mais rápido do *hotend*.

Além dos componentes já mencionados, foi necessário o desenvolvimento de peças a serem impressas, aplicando o conceito RepRap:

- a) para o suporte de fixação para o *hotend*, foi desenvolvido no SolidWorks, utilizando como base um projeto¹⁴ pré existente, duas peças, essas podem ser observadas na Figura 30;

Figura 30: Vista isométrica dos adaptadores de fixação para o hotend.



Fonte: Autores, 2020.

- b) suporte de fixação da fonte de alimentação a estrutura da impressora, para esta finalidade foram impressas duas peças idênticas (Figura 31);

Figura 31: Vista isométrica do suporte projetado para a fixação da fonte de alimentação.

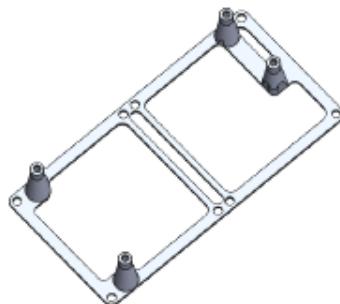


Fonte: Autores, 2020.

- c) o suporte para a controladora (Figura 32), foi projetado para o posicionamento da mesma sobre os *coolers* de resfriamento;

¹⁴ Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:1239945>> Acesso em 18/06/2020.

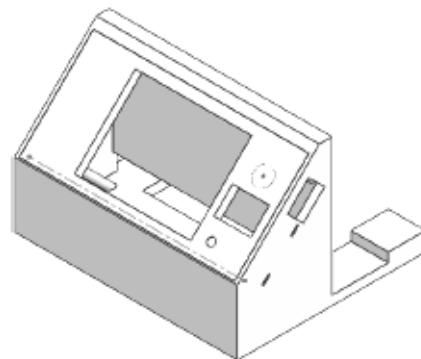
Figura 32: Vista isométrica suporte para controladora Rumba.



Fonte: Autores, 2020.

- d) o suporte para o display, foi projetado com espaçamento para conexão USB e conexão do cartão de memória (Figura 33);

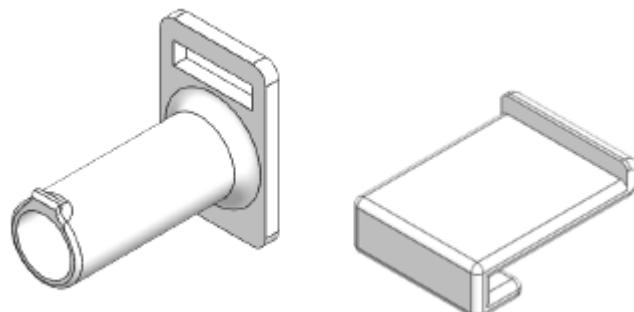
Figura 33: Vista isométrica do suporte projetado para o display.



Fonte: Autores, 2020.

- e) suporte novo para o filamento. para esta finalidade foram projetadas duas peças que podem ser observadas na Figura 34;

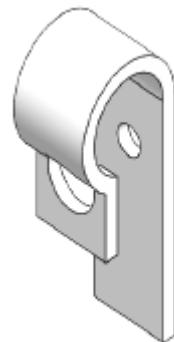
Figura 34: Vista isométrica das peças projetadas para o suporte do filamento.



Fonte: Autores, 2020.

- f) suporte de fixação do relé de estado sólido à estrutura da impressora, para essa finalidade será impressa duas peças (Figura 35);

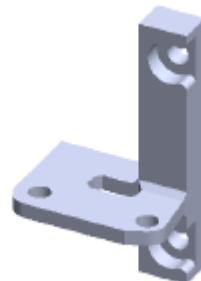
Figura 35: Vista isométrica do suporte projetado para o relé de estado sólido.



Fonte: Autores, 2020.

- g) suporte do sensor de nivelamento BLTouch (Figura 36);

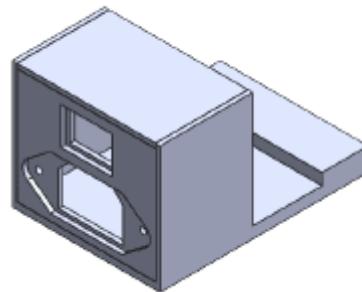
Figura 36: Vista Isométrica suporte projetado para o BLTouch.



Fonte: Autores, 2020.

- h) suporte conector de energia (Figura 37);

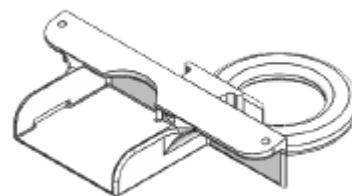
Figura 37: Vista isométrica do suporte ao conector de energia.



Fonte: Autores, 2020.

- i) o suporte para o *cooler* de resfriamento da peça (Figura 38), foi desenvolvido para acoplamento do *cooler* e direcionador do ar;

Figura 38: Vista isométrica do suporte para o *cooler* de resfriamento da peça.

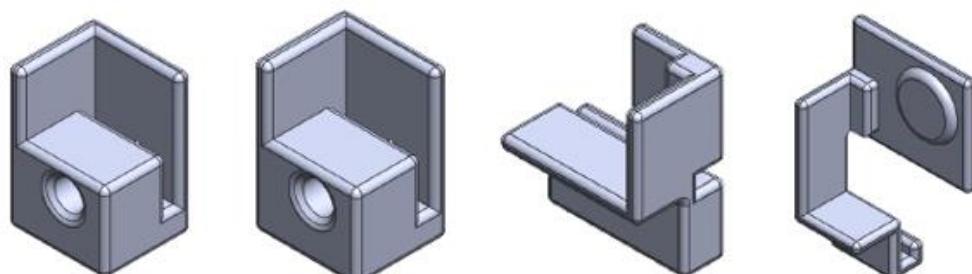


Fonte: Autores, 2020.

- j) guias de posicionamento da mesa peça (Figura 39), para esta finalidade foi projetado quatro peças distintas, para garantir o correto posicionamento;

Figura 39: Vista isométrica das guias de posicionamento da mesa.

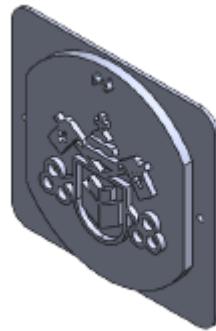
Frontal Direito Frontal Esquerdo Posterior Direito Posterior Esquerdo



Fonte: Autores, 2020.

- k) tampa com a logo da PUCPR, esta será acoplada ao espaço dedicado ao display original da impressora (Figura 40).

Figura 40: Vista isométrica do logo da PUCPR.



Fonte: Autores, 2020.

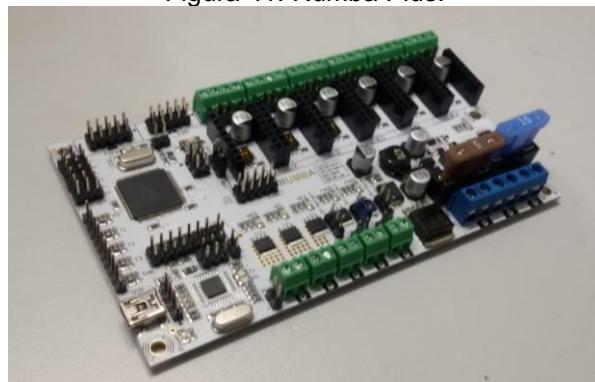
Nos Apêndices de B à S, podem ser visualizadas as imagens adaptadas das folhas de desenho técnico de cada peça desenvolvida. As folhas originais estão disponíveis na plataforma GitHub¹⁵.

4.3 COMPRA DE MATERIAIS

Para a realização do projeto foram adquiridos os seguintes componentes:

- a) Rumba plus (Figura 41);

Figura 41: Rumba Plus.

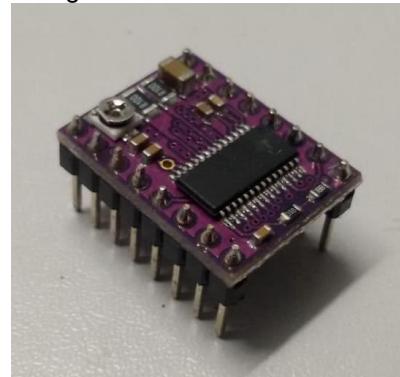


Fonte: Autores, 2020.

¹⁵ Disponível em: <https://github.com/AndressaPS/Retrofit_CubeX_DuO>.

- b) driver DRV8825 (Figura 42);

Figura 42: Driver DRV8825.



Fonte: Autores, 2020.

- c) manta de aquecimento de silicone (Figura 43);

Figura 43: Manta de aquecimento de silicone.



Fonte: Autores, 2020.

- d) placa de cortiça (Figura 44);

Figura 44: Placa de cortiça.



Fonte: Autores, 2020.

e) espelho (Figura 45);

Figura 45: Espelho.



Fonte: Autores, 2020.

f) relé de estado sólido com dissipador 25 Amperes (Figura 46);

Figura 46: Relé de estado sólido.



Fonte: Autores, 2020.

g) Hotend E3D V6 24 Volts (Figura 47 e 48);

Figura 47: Peças que compõe o *hotend*.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 48: *Hotend*.



Fonte: Autores, 2020.

- a) fonte 24 Volts 15 Amperes (Figura 49);

Figura 49: Fonte.



Fonte: Autores, 2020.

- b) sensor de nivelamento (Figura 50).

Figura 50: Sensor de nivelamento BLTouch.



Fonte: Autores, 2020.

- c) display marca Bigtreetech modelo TFT24 (Figura 51).

Figura 51: Display Bigtreetech modelo TFT24.



Fonte: Autores, 2020.

Como já descrito na seção 4.1.2, também foi necessário a impressão de algumas peças utilizando o conceito RepRap:

- a) adaptadores de fixação para o *hotend*;
- b) suporte para fonte de alimentação;
- c) suporte para a controladora;
- d) suporte do *display*;
- e) novo suporte para o filamento;
- f) suporte do sensor de nivelamento;
- g) suporte para conector de energia;
- h) suporte para o relé de estado sólido;
- i) guias de posicionamento da mesa peça;
- j) suporte para o *cooler* de resfriamento da peça.

Além disso, foram adquiridos alguns componentes eletrônicos, tais como: cabos, conectores, malha expansiva, mangueira termo retrátil, entre outros. O custo total dos itens adquiridos para a implementação do retrofit, pode ser visualizado no Apêndice A.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

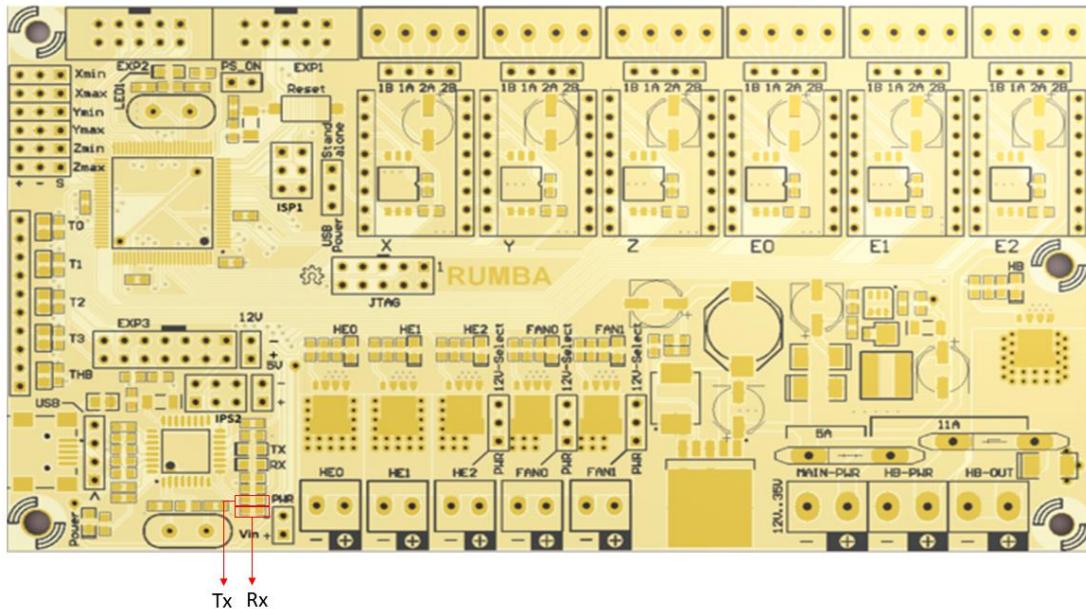
Para a implementação do projeto inicialmente foram impressos protótipos, utilizando o conceito RepRap, do adaptador de fixação para o *hotend* E3D V6, o suporte para o *cooler* de resfriamento da peça e o suporte para o sensor BLTouch,

com eles foi possível realizar a troca do *hotend*, a instalação do novo sensor de nivelamento e a instalação do *cooler*.

A partir disso foi modificado a placa de controle, o display, a fonte e os drives dos motores de passo. Para as conexões na placa de controle Rumba foi utilizado como referência o layout Figura 52, da disposição dos pinos através do firmware Marlin, a partir disso foram realizadas as seguintes ligações:

- a) conexão dos sensores de fim de curso dos eixos x, y e z nos pinos “-“ e “s” do conector Xmin, Ymin e Zmin respectivamente;
- b) conexão do sensor BLTouch nos pinos do sensor de nivelamento do eixo z e nos pinos 2, 4 e 6 do conector EXP3;
- c) o sensor de temperatura do extrusor foi ligado no conector T0;
- d) o sensor de temperatura da mesa aquecida no conector THD;
- e) o aquecedor do *hotend* está conectado ao conector HE0;
- f) o aquecedor da mesa foi ligado no conector HB-OUT;
- g) o *cooler* de resfriamento da extrusora foi ligado ao conector FAN1;
- h) o *cooler* de resfriamento da peça foi conectado ao FAN0;
- i) os drives dos motores de passos eixos são conectados nos *slots* X, Y e Z e o drive do motor de passo da extrusora é conectado ao *slot* E0;
- j) a fonte foi conectada aos *slots* MAIN-PWR e no HB-PWR;
- k) deve ser adicionado *jumpers* na posição *Stand alone* para habilitar a alimentação dos motores e também na posição PWR para selecionar a tensão da fonte nos conectores FAN0 e FAN1;
- l) para conexão do display no modo *Full Graphic Smart Controller*, foi conectado no slot EXP01 da Rumba ao conector EXP02 do display e o slot EXP02 da Rumba conectado ao slot EXP01 do display;
- m) para o modo Touch do display, como a controladora não dispõe de pinos para acesso as portas de transmissão (Tx) nem de recepção (Rx) do controlador principal, se fez necessário a conexão através de dois resistores, estes estão demarcados em vermelho na Figura 52, essa conexão, a conexão de alimentação, *Ground* e GND, foi realizada nos pinos “+” e “-“ 5V respectivamente.

Figura 52: Layout Rumba.



Fonte: Adaptado da página de web comunidade RepRap¹⁶

Na instalação dos drivers foi realizado o ajuste do limite de corrente dos motores de passo, para isso foi utilizado a Equação 1, retirada do Datasheet do DRV8825. O drive possui um regulador interno de tensão de 0 a 3,3V, onde variando o valor de tensão de referência (V_{REF}) se obtém o valor da corrente no motor. No modulo utilizado o valor da resistência (R_{ISENSE}) é de $0,10 \Omega$.

Equação 1: Cálculo da corrente de pico que drive DRV8825 fornecerá para o motor

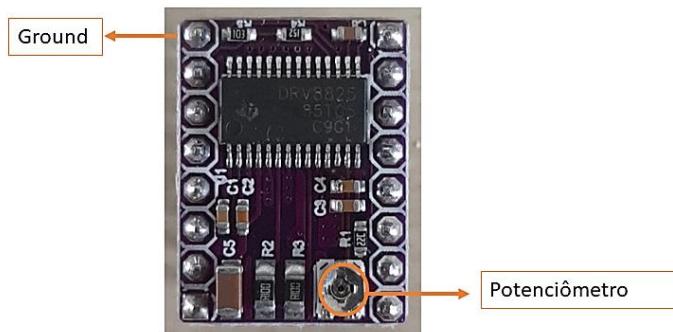
$$I_p = \frac{V_{REF}}{5 * R_{ISENSE}}$$

Fonte: Autores, 2020.

Foi utilizado o multímetro para se obter o valor da tensão de referência, posicionando as pontas de prova no potenciômetro e no pino *Ground* do drive DRV825 (Figura 53). Nos motores do eixo x e y e no extrusor a tensão de referência utilizada é de 0,7V, o que nos fornece uma corrente de pico de 1,4A, já no motor do eixo z, foi regulado a tensão de referência em 1V e consequentemente sua corrente em 2A.

¹⁶ Disponível em:< https://reprap.org/wiki/File:RRD-RUMBA_PCB.PNG>. Acesso em 04/07/2020.

Figura 53: Pontos de verificação da tensão de referência do drive DRV8825.



Fonte: Autores, 2020.

Foram construídos adaptadores para ligação dos motores visando a utilização dos chicotes elétricos originais, para os sensores de fim de curso do eixo x e y, foi necessário realizar a adição de filtros capacitivos, pois esses sofriam interferência com a movimentação do motor, e a utilização dos filtros atenua os picos de energia.

Para a implementação da mesa aquecida foi utilizado um espelho que servirá como uma superfície lisa de base para impressão, abaixo dele foi acoplado uma placa de alumínio 300x300x3 mm, para realizar a distribuição do calor uniformemente, junto a essa placa foi colada uma manta aquecida Keenovo 127 volts 750 watts, responsável pelo aquecimento da mesa, foram também adicionadas duas cortiças como isolante térmico para auxiliar a manutenção da temperatura da mesa. Para o controle da temperatura foi adicionado o rele de estado sólido de 25 amperes 480 volts, com a faixa de operação de controle de 5 a 32 volts e para o aumento de contato do espelho com a placa de alumínio, foi incluído quatro guias impressas, para garantir o correto posicionamento da mesa. Foram adicionados quatro clipe de papel de metal, onde esses podem ser movimentados de acordo com a necessidade de colocação e remoção do espelho.

Para a correta implementação de todos os novos componentes eletrônicos, se fez necessário a modificação da estrutura elétrica, tais como troca de cabos, adição de conectores e para um melhor resultado estético e organizacional foi adicionado uma malha náutica nos cabos.

Foi realizado a preparação de uma imagem para o Raspberry Pi 3B+ com o host Octoprint para facilitar a visualização e configuração da impressora e com isso, a impressora pode ser conectada à rede via cabo ou WIFI, para ser acessada remotamente, para isso foi realizado a instalação do software Octoprint no Raspberry:

- a) download da imagem através do site da Octoprint¹⁷ do sistema e gravado em um cartão de memória;
- b) para configurar as credenciais da rede WIFI foi necessário realizar modificações no arquivo octopi-wpa-supplicant.txt na pasta /boot da imagem no cartão de memória, foi ativado as linhas 27 a 30, inserido o nome da rede WIFI na linha 28, e inserido a senha da rede WIFI na linha 29;
- c) inicializou-se o Raspberry pelo cartão de memória;
- d) login no Raspberry via SSH (Security Socket Shell), localizado em octopi.local e então executado o comando sudo raspi-config;
- e) na tela do raspi-config foi alterado a senha através “Alterar senha do usuário”;
- f) alterado o fuso horário configurado em “Opções de localização”> “Fuso horário”.
- g) alterado o nome do *host* em “Opções de rede”> “Nome do *host*”, para cubex.local.

Após a instalação foi realizado a configuração inicial do software, seguindo os seguintes passos:

- a) inserção de um usuario e senha de acesso (este passo é opcional);
- b) habilitação de envio anônimo de informações de uso do software (opcional);
- c) configuração do teste de conectividade com a internet (opcional);
- d) ativação o bloqueio para *plugins* de terceiros que a Octoprint acredita que possa afetar o sistema;
- e) configuração da impressora, indicando a área de impressão, diâmetro do bico.

Foi acessado a página cubex.local no navegador e como havia sido inserido usuario e senha nas configurações iniciais, a primeira página apresentada foi a tela de login em seguida foi acessado a página inicial do Octoprint. Em paralelo foi realizado a conexão do Raspberry Pi com a impressora 3D utilizando um cabo USB e na página inicial do Octoprint foi realizada a conexão. A imagem gerada com as configurações descritas acima, pode ser acessada no repositório¹⁸ do Github.

¹⁷ Disponível em: <<https://octoprint.org/download/>> Acesso em: 17/07/2020

¹⁸ Disponível em: <https://github.com/AndressaPS/Retrofit_CubeX_DuO>.

Em seguida foi realizado o download¹⁹ e instalado o firmware Marlin 2.0.5.3 e modificado para a nova configuração de hardware, as etapas a seguir descrevem as modificações realizadas no firmware padrão:

- a) configuração para a placa Rumba, onde nesta configuração são atribuídas as funções dos pinos da controladora;
- b) configuração das dimensões da impressora, para o firmware delimitar a área de impressão, utilizando como referência o manual²⁰ da 3D CubeX Duo;
- c) habilitação do display no modo Full Graphic Smart Controller;
- d) configuração dos tipos de sensores utilizados na impressora, onde para este projeto foram os sensores de fim de curso, sensor de nivelamento BLTouch e os sensores de temperatura da mesa aquecida e do hotend;
- e) configuração do BLTouch, onde inicialmente foi definida a distância entre o sensor e o *hotend*, após é estipulado o ponto de verificação e definição da altura da mesa, é então estabelecido o modo de verificação do nivelamento da mesa, onde para o projeto foi selecionado o bilinear. Nesse modo é realizado a verificação de nove pontos da mesa, foi também adicionado uma função, que após a calibração principal da altura da mesa com o BLTouch, possibilita o ajuste de micro passos;
- f) foram definidos pontos iniciais e realizado a medição da distância entre o suporte fixo e móvel para os eixos x e y, a partir deste ponto é enviado o comando para o motor movimentar 10 mm e realizado a medição da distância efetiva percorrida, é comparado a distância teórica com a distância efetiva e calculado a relação de passos por milímetro (Equação 2);

Equação 2: Relação de passos por milímetro.

$$\text{Passo novo} = \frac{\text{Passo efetivo} * \text{distância teórica}}{\text{distância efetiva}}$$

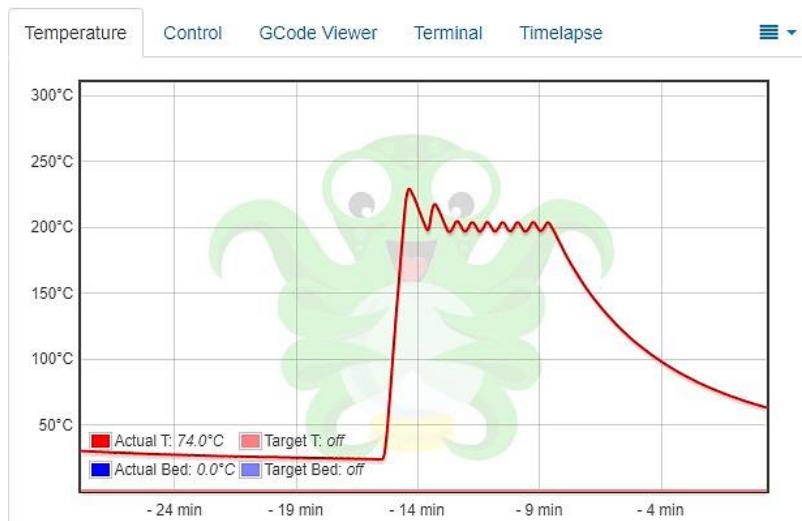
Fonte: Autores, 2020.

¹⁹ Disponível em:< <https://marlinfw.org/meta/download/>>. Acesso em 20/04/2020.

²⁰ Disponível em: <http://cubify.s3.amazonaws.com/public/cubex/cubex_user_guide.pdf>. Acesso em 17/03/2020.

- g) foi definido um ponto inicial e aferido a distância entre o suporte do extrusor e a mesa, após foi realizado o comando de movimentação de 10 mm da mesa e realizado uma nova verificação, com essas medidas foi efetuado a comparação e relação entre passos por milímetros;
- h) calibração da movimentação no firmware com a conversão de milímetros para passos com a relação de passos por milímetro dos eixos foi executado;
- i) com a impressora conectada ao *host* foi utilizado o comando M303 E0 S200 C8 enviado via serial, para configurar o PID de controle da temperatura do *hotend*, onde é realizado oito ciclos de aquecimento a 200°C (Figura 54). Podemos separar este comando em quatro componentes principais, onde o M303 é o comando principal, E indica o extrusor, S seta o valor desejado de temperatura e o comando C atribui a quantidade de ciclos que serão realizadas, após a execução do comando, foram obtidos os ganhos do controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) Tabela 7, para serem implementados no firmware;

Figura 54: Gráfico dos ciclos de aquecimento.



Fonte: Autores, 2020

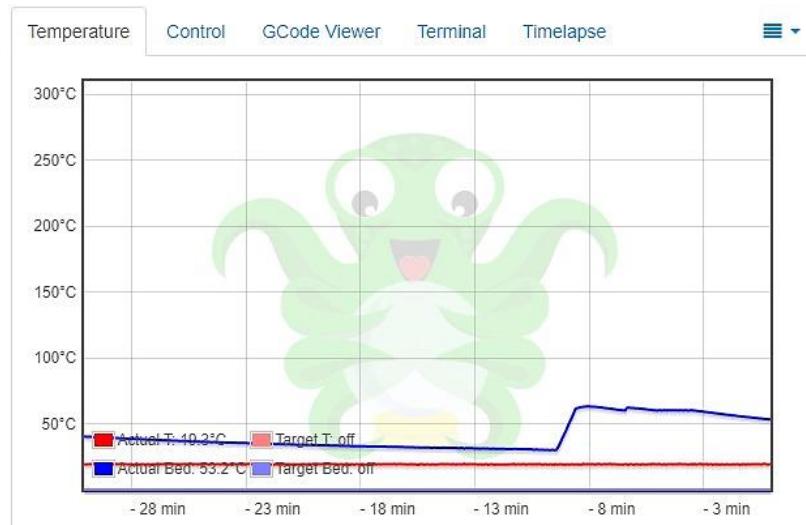
Tabela 7: Ganhos PID do *hotend*

Ganhos	
Proporcional	8,65
Integral	0,37
Derivativo	50,65

Fonte: Autores, 2020

- j) semelhante ao processo anterior, mas modificando o comando E0 para E-1, S200 para S60, foi realizado comando para obtenção dos ganhos do PID da mesa aquecida, a Figura 55 mostra o gráfico do ciclo de aquecimento da mesa, e na tabela 8 os ganhos obtidos;

Figura 55: Gráfico do ciclo de aquecimento da mesa.



Fonte: Autores, 2020

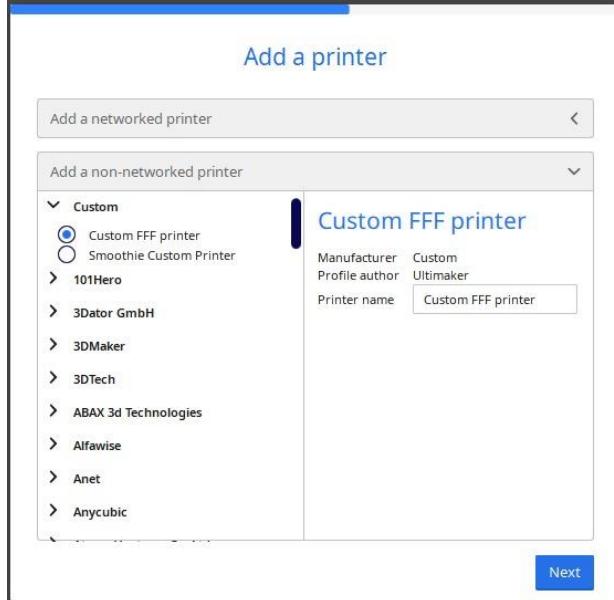
Tabela 8: Ganhos PID da mesa aquecida

Ganhos	
Proporcional	35,71
Integral	4,90
Derivativo	173,59

Fonte: Autores, 2020.

O código completo da configuração do *firmware* pode ser acessado via web²¹. Depois da configuração do firmware, foi realizado a configuração do fatiador Ultimaker Cura, inicialmente foi adicionado a impressora ao fatiador (Figura 56), selecionando a opção Custom FFF printer, e escolhendo o nome da impressora no campo Printer name.

Figura 56: Tela para inclusão da impressora ao fatiador.

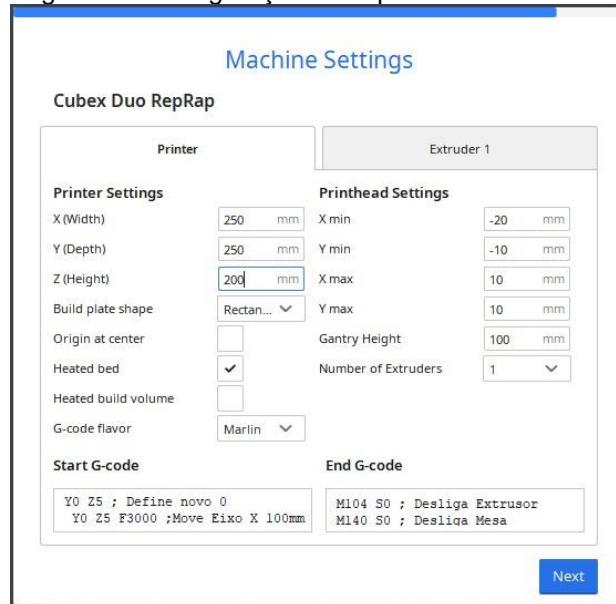


Fonte: Autores, 2020.

Foram então configuradas as dimensões da impressora, formato da mesa, selecionado a opção de mesa aquecida, selecionado o firmware utilizado e adicionado o código de início e código final de impressão (Figura 57).

²¹ Disponível em: <https://github.com/AndressaPS/Retrofit_CubeX_DuO>.

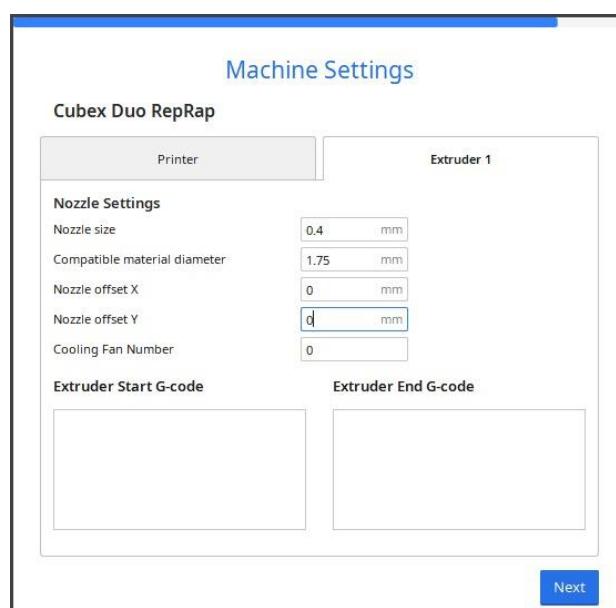
Figura 57: Configuração da impressora no fatiador.



Fonte: Autores, 2020.

Ainda na tela de configuração de impressora, é configurado a extrusora (Figura 58), foi selecionado o tamanho do bocal, o diâmetro do filamento utilizado, distância do bocal as origens do eixo x e y e configurado o identificador da extrusora na placa controladora.

Figura 58: Configuração extrusora no fatiador.

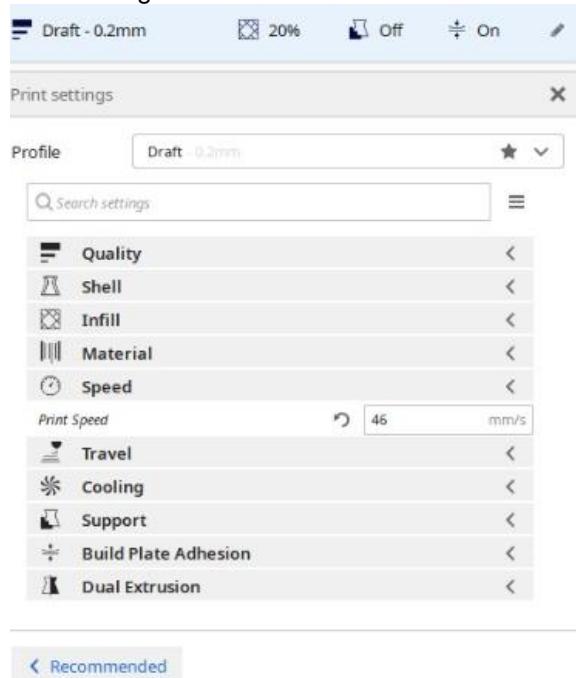


Fonte: Autores, 2020.

No menu do fatiador (Figura 59) são configurados os parâmetros da impressora, como:

- a) velocidade de impressão, para esse foi selecionado 46mm/s;
- b) material utilizado, inicialmente foi escolhido o PLA;
- c) temperaturas, para o PLA foram setados em 200° para extrusora e 60° para mesa;
- d) resfriamento, foi utilizado em aproximadamente 70%, variando de acordo com a peça impressa;
- e) modo de adesão a base, selecionado o modo Skirt;
- f) qualidade geral, definido na maioria como 0,2 mm, mas varia de acordo com a peça a ser impressa.

Figura 59: Menu fatiador Cura.



Fonte: Autores, 2020.

4.5 TESTES

Após a realização da implementação são iniciados os testes para verificação das corretas configurações, primeiramente foi realizado o teste de calibração utilizando o cubo, para esse não foi utilizado a base aquecida. Na primeira impressão

(Figura 60) pode-se observar que a calibração do eixo z não estava satisfatório, pois ficou com dimensão menor do que o esperado.

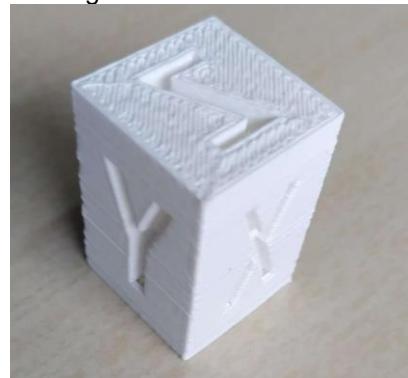
Figura 60: Primeiro teste do cubo de calibração.



Fonte: Autores, 2020

Foi então recalibrado o eixo z no *firmware*, e reimpresso o cubo de calibração (Figura 61), neste observa-se que ainda a dimensão esperada não foi atingida.

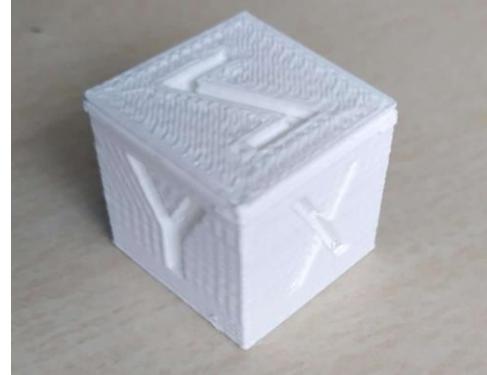
Figura 61: Segundo teste do cubo de calibração.



Fonte: Autores, 2020

Após análise, foi constatado que havia um erro no ajuste da corrente máxima disponibilizada para o motor de passo do eixo z e com isso a calibração realizada pelo firmware do eixo não surtia efeito esperado, foi então ajustado novamente o limite de corrente no drive para então realizar a nova calibração e com isso a impressão do cubo de teste (Figura 62).

Figura 62: Terceiro teste do cubo calibração.



Fonte: Autores, 2020.

No terceiro teste do cubo a impressão encontra-se com as corretas dimensões, isto é, suas arestas possuem 20 milímetros conforme seu modelo digital. Na Figura 63, observa-se o método de conferência das medidas físicas do modelo.

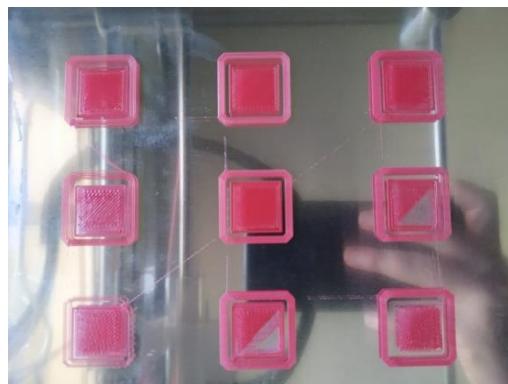
Figura 63: Dimensões físicas do cubo de calibração.



Fonte: Autores, 2020.

O próximo teste realizado foi o de nivelamento da mesa utilizando o filamento ABS, na primeira impressão (Figura 64), pode-se constatar que o canto frontal esquerdo estava mais elevado que o restante da mesa, o que ocasionou em uma falha na extrusão.

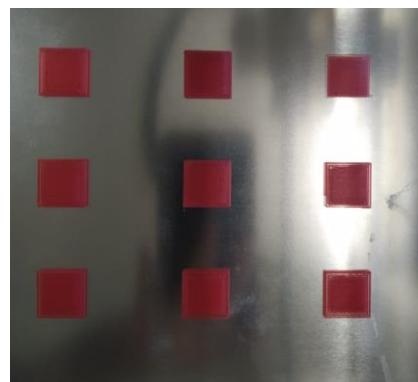
Figura 64: Primeiro teste de nivelamento da mesa.



Fonte: Autores, 2020.

Para correção do erro foi realizado a compensação da altura da mesa, através dos parafusos de ajuste. Após foi realizado a reimpressão para conferência do nivelamento (Figura 65), onde a partir dessa pode-se verificar que a calibração havia ocorrido de maneira satisfatória.

Figura 65: Segundo teste de nivelamento da mesa.



Fonte: Autores, 2020.

O terceiro teste realizado foi o Benchy, para este teste também foi utilizado material ABS, onde na primeira tentativa (Figura 65), demonstrou uma falha nas configurações de temperatura, pois a impressão foi interrompida devido a obstrução do *hotend* ocasionada pelo excesso de filamento, nesta impressão as temperaturas estavam definidas em 230° C para o *hotend* e 110° C para mesa.

Figura 66: Primeira impressão teste Benchy.



Fonte: Autores, 2020.

Foram modificados os parâmetros de temperatura para: 220° C *hotend* e 125°C mesa e com isso foi reimpresso o teste Benchy (Figura 67). Pode-se observar uma uniformidade entre as camadas, o que demonstra um correto ajuste de temperaturas, ainda podemos destacar os detalhes da cabine que se enquadram dentro do esperado, o que indica que o teste ocorreu de maneira satisfatória.

Figura 67: Segunda impressão teste Benchy.



Fonte: Autores, 2020.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para uma análise mais completa dos resultados obtidos, este capítulo será dividido em seis partes:

- a) dificuldades encontradas durante a execução do projeto;
- b) resultados da aplicação do conceito RepRap;
- c) display;
- d) *host*;
- e) fatiador;
- f) análise final.

5.1 DIFÍCULDADES ENCONTRADAS DURANTE A EXECUÇÃO DO PROJETO

Inicialmente na implementação do retrofit foi utilizado o conceito RepRap para desenvolvimento das peças essenciais, mas durante este processo foram encontradas dificuldades na impressão utilizando a configuração original da impressora, tais como:

- a) quebra de filamento, que ocasionava no cancelamento imediato da impressão (Figura 68);

Figura 68: Impressão cancelada.



Fonte: Autores, 2020.

- b) obstrução da extrusora (Figura 69), o que provocava a necessidade de desmontar a extrusora para poder realizar a limpeza;

Figura 69: Extrusora original obstruída.



Fonte: Autores, 2020.

- c) dificuldade de aderência da peça impressa a mesa de impressão (Figura 70);

Figura 70: Impressão com erro por falta de aderência na base.



Fonte: Autores, 2020.

- d) dimensão incorreta da impressão.

Após várias tentativas de impressão, foi possível a obtenção de protótipos com qualidade razoável, como pode ser observado na Figura 71 e Figura 72.

Figura 71: Primeiro protótipo adaptador do *hotend*.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 72: Protótipo inicial suporte BLTouch.



Fonte: Autores, 2020.

Após a implementação, uma das maiores dificuldades encontradas foi o correto dimensionamento das novas peças, que devido a equívocos na modelagem, foram geradas peças que não serviram ao propósito, ocasionando um desperdício de material.

Durante a utilização da impressora, houve um incidente que ocasionou a quebra do suporte para o filamento (Figura 73). No momento da realização da reimpressão da peça ocorreu uma falha, que resultou na obstrução no bico do *hotend*, a partir desse momento não estava sendo possível finalizar nenhuma impressão, pois em todas as tentativas o erro era replicado. Foi realizado um teste com dois tipos de filamentos, PLA e ABS, e em ambos os casos não era possível completar a impressão.

Figura 73: Peça do suporte de filamento quebrado.



Fonte: Autores, 2020.

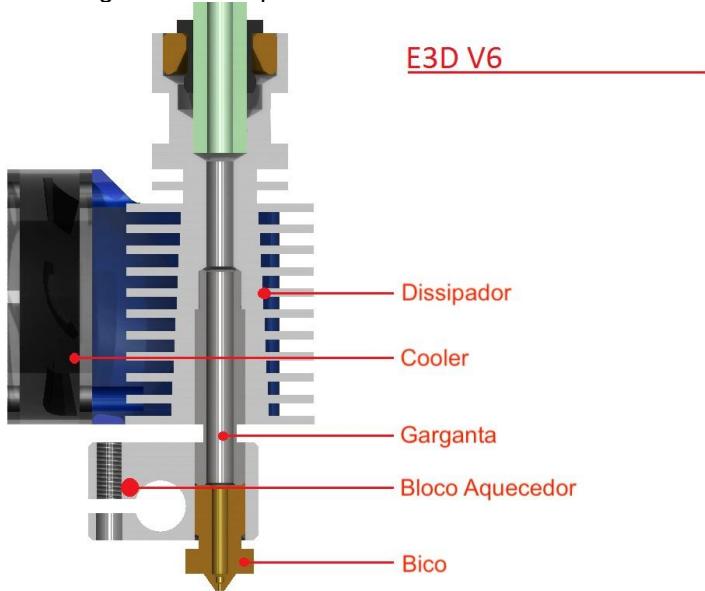
Foi realizada uma análise das possíveis causas da falha. Inicialmente foi verificado o sensor de temperatura do *hotend*, onde foi aferido utilizando como referência o sensor de temperatura da base aquecida, ambos encontravam-se com

valores próximos, o que descartou a possibilidade da causa raiz do problema ser um defeito do sensor.

Após, foram verificados os componentes do *hotend* (Figura 74), o bico apresentava resquícios de filamento incrustado em suas paredes internas. Foi realizada uma tentativa de limpeza utilizando acetona, mas não se obteve o resultado esperado. Efetuou-se uma nova tentativa de limpeza aplicando descarbonizante, o que resultou na remoção do material.

Constatou-se que o bico apresentava uma degradação interna, mas essa não afetava a capacidade de impressão utilizando PLA, quando realizado o teste com o filamento ABS, o erro retornou. Através de pesquisas para solucionar o problema, foi constatado que há uma indicação da utilização de um bico para cada tipo de material de impressão. Como forma de solucionar o problema, foram adquiridos dois novos bicos com diâmetro de 1,75mm.

Figura 74: Componentes *hotend*.



Fonte: Adaptado da página web Stackexchange²².

No recebimento foi verificado que o diâmetro interno dos novos bicos era menor que o diâmetro do bico anterior. Com isso, foi percebido que na primeira aquisição havia ocorrido um equívoco. Para utilizar a extrusora original, que possui

²² Disponível em: <<https://3dprinting.stackexchange.com/questions/1519/what-are-the-parts-that-make-up-a-hotend-and-what-do-they-do>> Acesso em 23/10/2020.

dimensionamento para filamentos de 1,75mm, foi adquirido um hotend com esse dimensionamento, mas o bico e garganta entregues estavam com 3mm, o que ocasionava na falha de obstrução, pois sobrava espaço interno e esse era preenchido com filamento quando aquecido.

Foi realizado o pedido de uma nova garganta com a correta dimensão, mas não foi entregue até a data da finalização da documentação, ocasionando na impossibilidade de impressão do logo da PUCPR, pois essa seria impressa utilizando material ABS.

5.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO CONCEITO REPRAP

A partir dos protótipos da subseção 5.1, foi possível a implementação do *retrofit* na impressora, como detalhado na subseção 4.4. Como resultados finais, podemos destacar as peças que estão sendo utilizadas na impressora, onde essas foram desenvolvidas aplicando o conceito RepRap, nas Figuras seguintes podem ser visualizados os resultados.

Figura 75: Suporte final da fonte.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 76: Suporte final relé térmico de estado sólido.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 77: Suporte final display.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 78: Suporte final para a controladora Rumba.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 79: Suporte final conector elétrico.



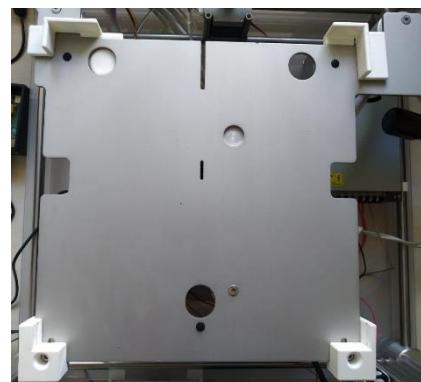
Fonte: Autores, 2020.

Figura 80: Suporte para o *cooler* de resfriamento da peça.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 81: Guias de posicionamento da mesa.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 82: Suporte para o filamento.



Fonte: Autores, 2020.

Durante a implementação, se fez necessário a modificação do projeto da peça de suporte do nivelador BLTouch, este encontrava-se com baixa resistência mecânica, o que ocasionou em sua quebra, devido a isso, foi realizado o

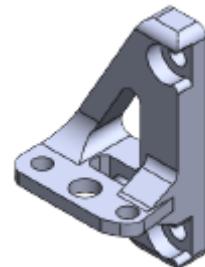
desenvolvimento de uma nova peça com um aumento da resistência estrutural (Figura 83). Na Figura 84 pode ser visualizado a vista isométrica da peça projetada e no Apêndice I, encontra-se a folha de desenho técnico.

Figura 83: Suporte final BLTouch.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 84: Vista isométrica suporte final BLTouch.



Fonte: Autores, 2020.

Também pode-se destacar como resultado a disposição final da controladora Rumba, da fonte e do relé de estado sólido no interior da impressora (Figura 85).

Figura 85: Disposição final dos componentes de controle e alimentação.



Fonte: Autores, 2020.

5.3 FUNCIONALIDADES DO DISPLAY

O display TFT24 possui dois modos de uso, o modo Full Graphic Smart Controller (Marlin) e o modo *Touch*, para selecionar o modo de uso deve ser pressionado o botão do display por aproximadamente 2 segundos (Figura 86).

Figura 86: seleção modo display.



Fonte: Autores, 2020.

5.3.1 Modo display Marlin

Quando o display está sendo utilizado no modo *Full Graphic Smart Controller*, a tela de inicialização (Figura 87), foi personalizada para apresentar a logo da PUCPR.

Figura 87: Tela de inicialização do display modo Marlin.



Fonte: Autores, 2020.

Na tela inicial (Figura 88), pode ser visualizado os estados da impressora (1), as temperaturas atuais da mesa e da extrusora (2), seus objetivos (3), velocidade do cooler de resfriamento da peça (4), posição atual dos eixos x,y e z (5), taxa de extrusão (6) e barra de progresso da impressão (7).

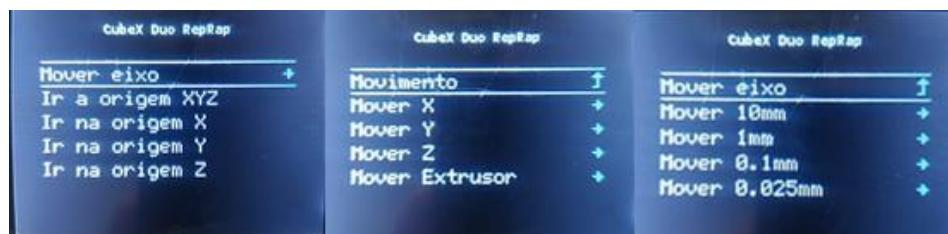
Figura 88: Tela display desempenho da impressora.



Fonte: Autores, 2020.

Através do display pode ser controlado a movimentação da impressora pelo menu movimento (Figura 89), onde dentro deste menu pode ser selecionado cada eixo para realizar a movimentação a escolha do usuário ou refazer a calibração do ponto zero de cada eixo.

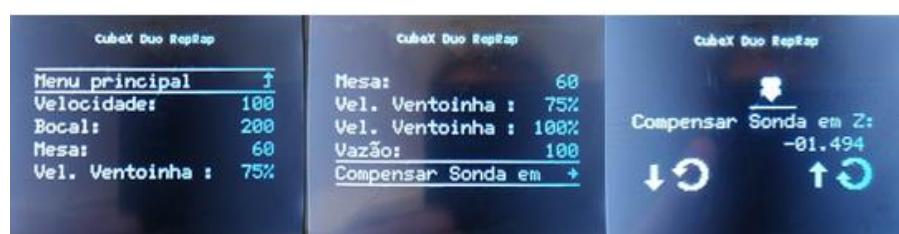
Figura 89: Tela do display menu de movimento.



Fonte: Autores, 2020.

Neste modo pode ser realizado a impressão através do cartão de memória ou via host. Durante a impressão, no display pode ser acessado o menu “ajustar” (Figura 90), neste menu pode ter acesso aos parâmetros de impressão e quando necessário pode ser modificado a velocidade de impressão, temperatura da mesa e do bocal, velocidades dos coolers, porcentagem de extrusão e ainda compensar a altura.

Figura 90: Tela display menu ajustes.



Fonte: Autores, 2020.

5.3.2 Modo display Touch

Assim como no modo Marlin, a tela de inicialização do modo *Touch* apresenta a logo da PUCPR (Figura 91). Uma das maiores diferenças entre ambos os modos do display é a possibilidade do uso do *host*, pois quando selecionado o modo *Touch* não pode ser utilizado o *host*, visto que ambos utilizam a comunicação serial com a controladora na mesma porta.

Figura 91: Tela de inicialização modo display Touch.



Fonte: Autores, 2020.

A tela de início (Figura 92), mostra a mensagem do estado da impressora, assim como pode ser visualizado a temperatura do hotend e da mesa, a velocidade do *cooler* de resfriamento da peça, a velocidade de extrusão e impressão.

Figura 92: Tela inicial.



Fonte: Autores, 2020.

Através da tela inicial, pode ser acessado a opção menu (Figura 93), onde podem ser selecionadas as seguintes opções:

- a) Heat/Fan, nessa opção é definida a temperatura de extrusão, a temperatura da mesa de impressão, e a velocidade do *cooler* de resfriamento;
- b) Movimento, essa seleção possibilita a movimentação dos eixos;
- c) Extrudir, é realizado o movimento do extrusor;
- d) Emergencia, é um botão para realizar a paralização geral da impressora;
- e) Terminal, utilizado para enviar códigos;
- f) Custom, para geração de blocos de comando;
- g) Configurar, para configuração geral da impressora.

Figura 93: Tela Menu.



Fonte: Autores, 2020.

Durante a impressão, através da tela do display (Figura 94), podem ser observadas as temperaturas do *hotend* e da mesa, a velocidade do *cooler* de resfriamento da peça, a porcentagem concluída e o tempo decorrido da impressão, a altura da camada atual da peça impressa, a vazão da extrusora e a velocidade de movimentação. Além disso, essa tela possibilita que o usuário pause ou cancele a impressão. Pode também ser realizado o ajuste fino da altura da mesa (Figura 95) através da opção BabyStep e ainda na opção Mais (Figura 96), pode ser feito a alteração das temperaturas do hotend e da mesa, controlar a velocidade do *cooler* de resfriamento da peça, velocidade de extrusão e da movimentação de impressão, entre outras.

Figura 94: Modo display Touch durante a impressão.



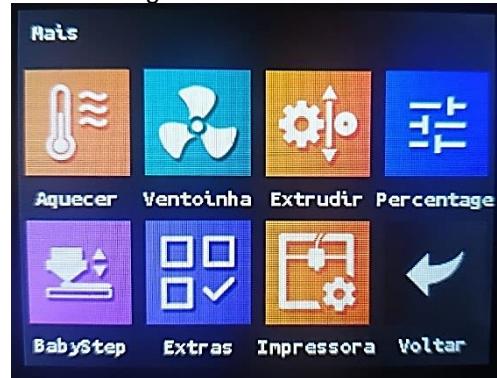
Fonte: Autores, 2020.

Figura 95: Tela BabyStep



Fonte: Autores, 2020.

Figura 96: Tela "Mais".



Fonte: Autores, 2020.

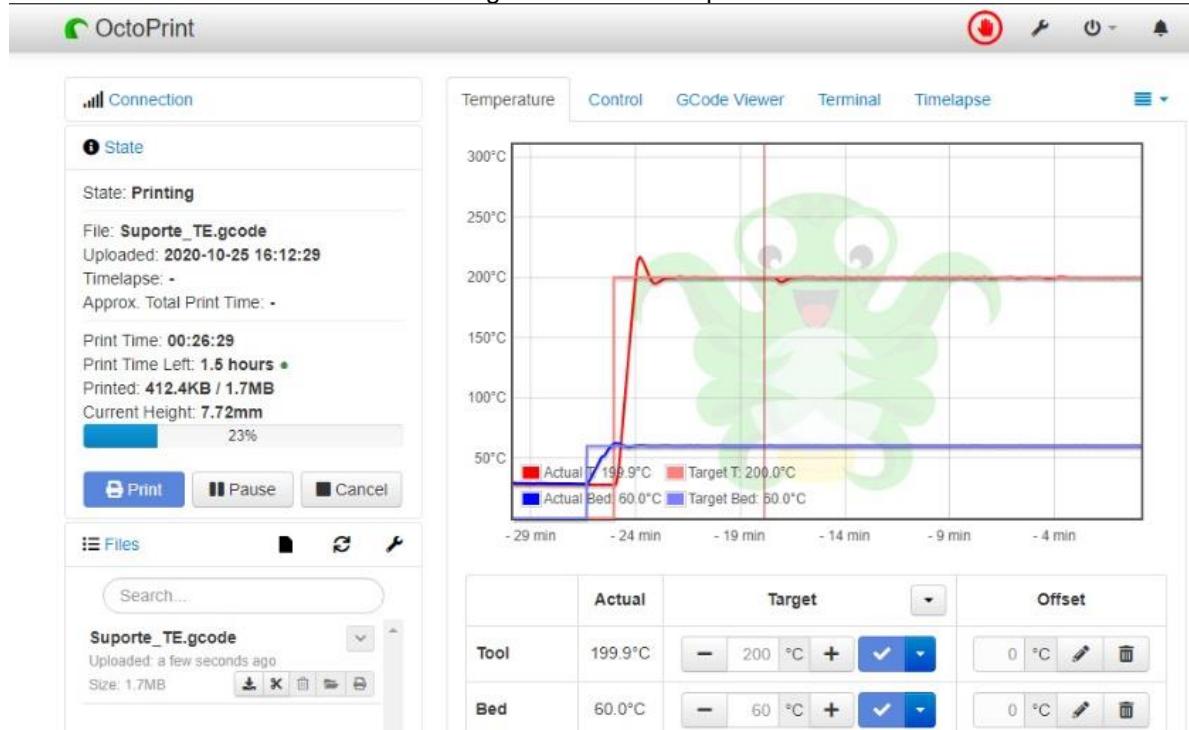
5.4 FUNCIONALIDADES DO HOST

Neste projeto foi utilizado o *host* Octoprint, através das configurações explicadas na subseção 4.4, o que impacta em vários benefícios, tais como:

- h) conexão via WIFI;
- i) monitoramento remoto via câmera;
- j) monitoramento via G-Code;
- k) visualização do nivelamento da mesa;
- l) estados da impressão;
- m) tempo de impressão decorrido;
- n) tempo de impressão estimado;
- o) altura atual da peça que está sendo impressa;
- p) porcentagem concluída da impressão;
- q) monitoramento histórico das temperaturas da impressora.

Na Figura 97, pode ser visualizado um exemplo da tela principal do *host* em operação.

Figura 97: Tela Octoprint.



Fonte: Autores, 2020.

Ainda existe a possibilidade de inclusão de mais funcionalidades através de plugins, onde este fica a critério do usuário.

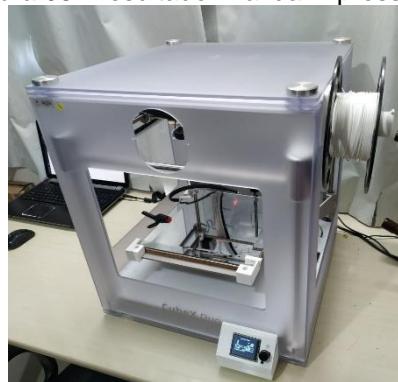
5.5 VANTAGEM DO USO DO FATIADOR CURA

A instalação do fatiador Ultimaker Cura traz como resultado mais expressivo a possibilidade de uma extensa quantidade de parâmetros que podem ser configurados de acordo com o material e peça a ser impresso, ainda pode ser configurado o valor de aquisição do filamento e com isso obter uma estimativa do custo do filamento por peça.

5.6 ANÁLISE FINAL

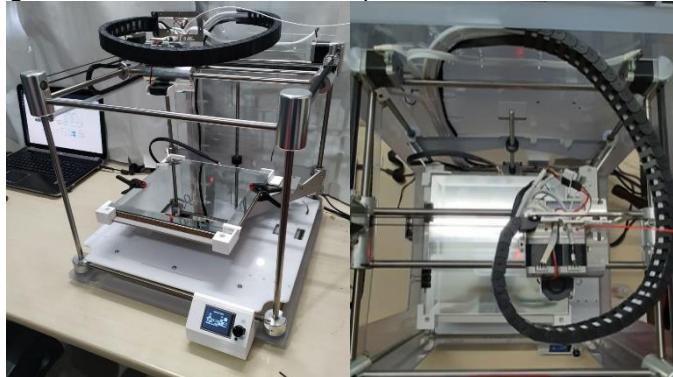
Na Figura 98, pode-se observar o resultado final da impressora após todas as modificações, evidenciando o novo display, a base aquecida e o novo suporte para filamento. Na Figura 99, destaca-se a impressora sem sua caixa externa, apresentando seus componentes internos, com ênfase no carro de impressão.

Figura 98: Resultado final da impressora.



Fonte: Autores, 2020.

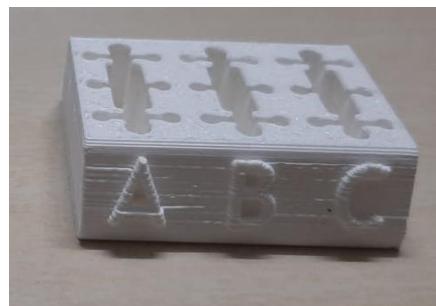
Figura 99: Resultado final da impressora sem caixa externa.



Fonte: Autores, 2020.

Após todo o processo, foi reimpresso o modelo utilizado inicialmente para a avaliação da impressora, o resultado pode ser visualizado na Figura 100. É evidente a grande evolução na qualidade da impressão, comparando as peças (Figura 101). Pode-se notar a diferença na resolução das bordas, e definição dos detalhes geométricos, assim como a obtenção de uma peça sem resquícios de filamentos entre vãos e com uma base regular (Figura 102).

Figura 100: Peça reimpressa.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 101: Comparação entre antes e depois, vista frontal, primeira peça impressa à esquerda, peça impressa após as modificações à direita.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 102: Base das peças impressas, à esquerda primeira peça impressa, à direita peça impressa após as modificações na impressora.



Fonte: Autores, 2020.

Além disso, pode-se destacar que a peça antiga não conseguia servir para o seu propósito, devido a inconsistências dimensionais (Figura 103), em contra partida a nova peça (Figura 104) possui as dimensões corretas, de acordo com o modelo CAD, o que possibilita a sua utilização.

Figura 103: Vista superior e exemplo de uso da primeira peça impressa.



Fonte: Autores, 2020.

Figura 104: Vista superior e exemplo de uso da peça impressa após implementação do retrofit.



Fonte: Autores, 2020.

Para uma melhor análise final, foram realizadas impressões de um mesmo modelo CAD utilizando PLA e ABS (Figura 105). Pode-se verificar que os modelos possuem qualidades semelhantes. Porém, pelo PLA ser um material que possui maior flexibilidade em condições de impressão e uma maior facilidade de utilização, esse entrega uma peça com maior detalhamento. Já o ABS necessita de configurações mais avançadas e é primordial o uso da mesa aquecida e de um fixador para melhor aderência à mesa, mas possui uma maior resistência mecânica.

Figura 105: Impressão de comparação entre materiais PLA (Branco) e ABS (Vermelho).



Fonte: Autores, 2020.

De modo geral, com ambos os materiais utilizados, a impressora forneceu peças com resultados satisfatórios, demonstrando assim a possibilidade de uso de diversos materiais, não se restringindo a um único tipo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do modelo de Grams e Cetnarowski (2014), com relação a aplicação da técnica de *retrofit*, foi possível definir a sequência de execução do projeto, o que auxiliou no cumprimento dos prazos previstos. O estudo de RepRap possibilitou a seleção dos componentes a serem utilizados no projeto em questão e ainda através de seu conceito, foi utilizada a impressora para fabricar algumas das peças implementadas em seu *retrofit*.

A aplicação do *retrofit* ocorreu de maneira satisfatória, porém a impressora não se encontra em pleno funcionamento, conforme detalhado da seção 5.1. Com isso não foi possível a produção da tampa com a logo da PUCPR, projetada anteriormente. Os autores esperam realizar a troca do componente do *hotend* e a impressão da tampa até o final do segundo semestre letivo de 2020, para que com isso possa ser realizada a entrega da impressora em pleno funcionamento.

Entretanto, todos os objetivos propostos no início do projeto foram atingidos, isto é, a impressora encontra-se com modernizações tanto na parte de hardware como de software, um aumento na qualidade da peça impressa, adição de novas funcionalidades como a base aquecida, *display touch*, a possibilidade de utilização de um Raspberry para comunicação via rede e utilização de outros softwares fatiadores.

Além disso, houve o desenvolvimento de alguns itens que anteriormente não haviam sido planejados, tais como: suporte de fixação do relé de estado sólido à estrutura da impressora, suporte conector de energia, suporte para o *cooler* de resfriamento da peça e guias de posicionamento da mesa, além da necessidade de adição de uma placa extra de cortiça, e componentes eletrônicos. Mesmo com os acréscimos de peças e componentes, a aplicação do *retrofit* na impressora 3D CubeX Duo se tornou mais viável economicamente ao da aquisição de uma impressora semelhante e ecologicamente correto, pois evitou o possível descarte do equipamento.

Pode-se ressaltar ainda que este projeto visou o benefício da comunidade acadêmica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, tendo em vista que a prototipagem neste meio auxilia na realização de projetos de maneira prática e com custo reduzido. Possibilitando assim maior liberdade aos pesquisadores de várias áreas, no desenvolvimento de modelos para validações de seus estudos. Um exemplo atual foi o uso desta tecnologia por parte do meio acadêmico no auxílio ao combate à

COVID-19, através de impressões para construção de protetores faciais, para a distribuição gratuita aos profissionais da área da saúde. Outro exemplo é a utilização da impressora 3D para produção de próteses feitas sob medida, entregues gratuitamente para pessoas de diferentes estados do Brasil, através de uma parceria de estudantes e professores da universidade com a Associação Dar a Mão

Sendo um dos principais objetivos, este trabalho foi detalhado de maneira que possa ser utilizado como uma fonte de embasamento para aplicação das técnicas de *retrofit* e RepRap em impressoras 3D, semelhantes a CubeX Duo, tendo em consideração a escassez de material disponível sobre este tema.

REFERÊNCIAS

- ABOMHARA, M.; KØIEN, G. M. Cyber security and the internet of things: Vulnerabilities, threats, intruders and attacks. **Journal of Cyber Security and Mobility**, v. 4, n. 1, p. 65–88, 2015. Disponível em: <https://www.riverpublishers.com/journal_read_html_article.php?j=JCSM/4/1/4>. Acesso em: 3 abr. 2020.
- ABREU, S. A. C. **Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo.**, p. 235, 2015. Disponível em: <https://sigarra.up.pt/faup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=36284>. Acesso em: 12 mai. 2020.
- ALCALDE, E.; WILTGEN, F. Estudo Das Tecnologias Em Prototipagem Rápida : Passado , Presente E Futuro. **Revista Ciências Exatas**, v. 24, n. n.2, p. 12–20, 2018.
- DE ARAÚJO, J. P.; AGRAWAL1, P.; DE MÉLO, T. J. A. Blendas PLA/PEgAA: Avaliação da reatividade entre os polímeros e da concentração de PEgAA nas propriedades e na morfologia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, n. 3, p. 118–127, 2015. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/475/354>>. Acesso em: 4 mai. 2020.
- ASSEMBLY. **Updating Legacy Equipment for Industry 4.0.** Disponível em: <<https://www.assemblymag.com/articles/95695-updating-legacy-equipment-for-industry-40>>. Acesso em: 23 mai. 2020.
- BACCARIN, A. B. INDÚSTRIA 4.0: IOT, BIG DATA E PRODUTOS DIGITAIS. **Design de Produto na Era Digital-Unisul Virtual**, 2018. Ribeirão Preto. Disponível em: <<https://www.riuni.unisul.br/handle/12345/5815>>. Acesso em: 5 abr. 2020.
- BARRIENTOS, M. I. G. G. **Retrofit de edificações: estudo de reabilitação e adaptação das edificações antigas às necessidades atuais**, 2004. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- BEAL, V. E. **Avaliação do uso de insertos obtidos por estereolitografia na moldagem de pós metálicos por injeção.**, 2002. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/82319>>. Acesso em: 15 abr. 2020.
- BESKO, M. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Tecnol. Inov**, v. 01, n. 3, p. 10, 2017. Curitiba. Disponível em: <<http://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2020.
- BRITES, F. G.; SANTOS, V. P. de A., **Motor de passo**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2008. Disponível em: <<https://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/stepmotor/stepmotor2k81119.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2020.
- BRITO, F. **Sensores e Atuadores**. 1º ed. São Paulo, 2019.
- CANCIGLIERI, O.; SELHORST, A.; SANT'ANNA, Â. M. O. Método de decisão dos processos de prototipagem rápida na concepção de novos produtos. **Gestao e Producao**, v. 22, n. 2, p. 345–355, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Filipe_Wiltgen/publication/335507334_PROTOTIPOS_E_PROTOTIPAGE_M_RAPIDA_ADITIVA_-_SUA_IMPORTANCIA_NO_AUXILIO_DO_DESENVOLVIMENTO>.

NTO_CIENTIFICO_E_TECNOLOGICO/links/5e95c6024585150839db2134/PROTOTIPOS-E-PROTOTIPAGEM-RAPIDA-ADI>. Acesso em: 13 abr. 2020.

CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M. **LOW-COST 3D PRINTING FOR SCIENCE, EDUCATION & SUSTAINABLE DEVELOPMENT**. 1º ed. Italia: ICTP—The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, 2013.

CARNEIRO, L. R.; BARBAR, G.; PEREIRA DOS SANTOS, L. C.; ZUQUETE GUARATO, A. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA MESA DE IMPRESSÃO 3D NA DUREZA E DIMENSÕES GEOMÉTRICAS DE AMOSTRAS EM ABS. , 2019. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM.

CHRISTIYAN, K. G. J.; CHANDRASEKHAR, U.; VENKATESWARLU, K. A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 114, n. 1, 2016.

CHUA, C. K.; LEONG, K. F. **3D Printing and Additive Manufacturing**. 4º ed. World Scientific, 2014.

COELHO, P. M. N. Rumo à Indústria 4.0. **Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade de Coimbra**, p. 65, 2016. Disponível em: <https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese_Pedro_Coelho_Rumo_a_Industria_4.0.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2020.

CORRELL, N. **Introduction to Autonomous Robots**, 2016.

COTTELEER, M.; MAHTO, M.; HOLDOWSKY, J. The 3D opportunity primer: The basis of additive manufacturing. **A Deloitte series on additive manufacturing**, p. 2–14, 2014. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/3d-opportunity/the-3d-opportunity-primer-the-basics-of-additive-manufacturing.html>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

CUNICO, M. W. **Impressoras 3D: O novo meio Produtivo**. Curitiba, 2015.

DUARTE, J. P. A. **DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE IMPRESSORA 3D ACOPLADA A UM SCANNER 3D**, 2017. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22505/1/DesenvolvimentoPlataformaImpressora.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2020.

EBEWELE, R. O. **Polymer science and technology**. CRC Press, 2000.

FIESP **Panorama da Indústria de Transformação Brasileira**, p. 1–68, 2019. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/panorama-da-industria-de-transformacao-brasileira/>>. Acesso em: 31 mai. 2020

G1 - Nasa conclui testes de componente de foguetes feito com impressora 3D - notícias em Tecnologia e Games. .Disponível em: <<http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2013/07/nasa-conclui-testes-de-componente-de-foguetes-feito-com-impressora-3d.html>>. Acesso em: 17 out. 2020.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing**. 1º ed. Springer, 2010.

GILCHRIST, A. **Industry 4.0: The Industrial Internet of Things**. Bangken Thailand: Apress, Berkeley, CA, 2016.

GIORDANO, C. M.; DE SENZI ZANCUL, E.; PICANÇO RODRIGUES, V. Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista Produção Online**, v. 16, n. 2, p. 499, 2016. Disponível em: <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/1963>>. Acesso em: 11 abr. 2020.

GRAMS, C. A.; CETNAROWSKI, E. **RETROFIT EM MÁQUINAS INDUSTRIAS : estudo de caso**, 2014.

HAUSMAN, K. K.; HORNE, R. **3D Printing for Dummies**. New Jersey, 2014.

HENTON, D. E.; GRUBER, P.; LUNT, J.; RANDALL, J. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. 16. Polylactic acid technology. **Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites**. p.527–578, 2005.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B.; PENTEK, T. *. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review Competence Center Corporate Data Quality (CC CDQ) View project Industrial Data Space View project Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. **49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)**, , n. September 2016, p. 16, 2016. Disponível em: <www.snom.mb.tu-dortmund.de>. Acesso em: 29 mar. 2020.

HOPKINS, T. **Stepper Motor Driving - Application Note**., 2012.

IDRISOV, G. I.; KNYAGININ, V. N.; KUDRIN, A. L.; ROZHKOVA, E. S. New technological revolution: Challenges and opportunities for Russia. **Voprosy ekonomiki**, p. 5–25, 2018. Disponível em: <<https://www.csr.ru/uploads/2017/10/novaya-tehnologicheskaya-revolutsiya-2017-10-13.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2020.

Industry 4.0 retrofit project | Bosch Global. .Disponível em: <<https://www.bosch.com/stories/industry-4-0-retrofit-project/>>. Acesso em: 23 mai 2020.

JAVAID, M.; HALEEM, A. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review. **Alexandria Journal of Medicine**, v. 54, n. 4, p. 411–422, 2018. Informa UK Limited.

JUNIOR, E. S. S.; CARVALHO, J. DE; JUNIOR, N. F. DA S.; SILVA, A. M. H. DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR PID APLICADO NO CONTROLE DE TEMPERATURA DE UMA IMPRESSORA 3D. **IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica**, 2019. Disponível em: <<https://arq.ifsp.edu.br/eventos/index.php/enict/4EnICT/paper/view/352/0>>. Acesso em: 12 mai. 2020.

LANGE, G.; LIN, F. Modeling well scheduling as a virtual enterprise with intelligent agents. **17th International Conference on Computational Science and Engineering**, 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7023561>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

LEITE, E. DE O. **RETROFITTING INDUSTRIAL – O USO DE NOVAS TECNOLOGIAS**, 2007. Universidade São Francisco. Disponível em: <<http://lyceum.online.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1358.pdf>>. Acesso em: 5 Jun. 2020.

LINS, T.; OLIVEIRA, R. A. R.; CORREIA, L. H. A.; SILVA, J. S. Industry 4.0 retrofitting.

Brazilian Symposium on Computing System Engineering, SBESC, p. 8–15, 2018. IEEE Computer Society.

LOPES, T. G. **A Utilização de Manufatura Aditiva em Projetos de Pesquisa**. 2018.

LOSHKAREVA, E.; LUKSHA, P.; NINENKO, I.; SMAGIN, I.; SUDAKOV, D. **Skills of the future: How to thrive in the complex new world**. 2015.

MAGALHÃES, R.; VENDRAMINI, A. Os impactos da quarta revolução industrial. **GV-executivo**, v. 17, n. 1, p. 40, 2018. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/gvexecutivo/article/view/74093>>. Acesso em: 29 mar. 2020.

MARLIN. Endstops. Disponível em: <<https://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>>. Acesso em: 13 mai. 2020.

MARTINS, S. D. O.; LIMA, R. O. C. **Polímeros De Impressão 3D E De Plásticos De Engenharia Utilizados Em Indústrias**, 2018. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO. Disponível em: <http://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/4398/2/SamuelOM_ART.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2020.

MISMETTI, D. **Impressão 3D ajuda médicos a planejar cirurgias de coluna e fazer diagnósticos**. Disponível em: <<https://m.folha.uol.com.br/equilibrioesaude/2013/10/1359134-impressao-3d-ajuda-medicos-a-planejar-cirurgias-de-coluna-e-fazer-diagnosticos.shtml>>. Acesso em: 15 mai. 2020.

MOTION CONTROL ONLINE. Microstepping Tutorial: A Brief Overview. Disponível em: <<https://www.motioncontrolonline.org/blog-article.cfm/Microstepping-Tutorial-A-Brief-Overview/47>>. Acesso em: 13 mai. 2020.

NAKASONE, F. K. Manufatura Aditiva Como Ferramenta Inclusiva No Ensino. **Congresso Internacional de educação e Tecnologias**, p. 1–10, 2017.

NETO, A. L. DE R.; JUNIOR, A. M.; NEIVA, E. C. R.; FARINHAKI, R. **Sistema de Medição de Campo Magnético Baseado no Efeito Hall e Arduino**, 2010. Universidade Técnologica Federal do Paraná. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/msergio/portuguese/ensino-de-fisica/oficina-de-integracao-ii/oficina-de-integracao-ii/Monog-10-1-Efeito-Hall.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2020.

OLIVEIRA, M. F. DE. **Aplicações da Prototipagem Rápida em Projetos de Pesquisa**. , p. 108, 2008.

PLOTEGHER, S. L. **Proposta de Método de Referência aplicado a Retrofitting de maquinas-ferramentas**. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-12092013-094431/publico/SilvioDEFINITIVO.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2020.

POPKOVA, E. G.; RAGULINA, Y. V.; BOGOVIZ, A. V. **Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century**. 1º ed. Cham: Springer, 2019.

REPRAP. Mechanical Endstop. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Mechanical_Endstop>. Acesso em: 13/5/2020.

REPRAP. How to Add Auto Bed Leveling Sensor to Geeetech Prusa I3 3D Printer DIY Kit. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/How_to_Add_Auto_Bed_Leveling_Kit>. Acesso em: 13/5/2020.

- Sensor_to_Geeetech_Prusa_I3_3D_Printer_DIY_Kit>.Acesso em: 13 mai. 2020.
- REPRAP. Heated Bed. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Heated_Bed>. Acesso em: 14 mai. 2020a.
- REPRAP. 32-bit board. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Category:32-bit_board>. Acesso em: 12 mai. 2020b.
- REPRAP. Stepper Motor Driver. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Stepper_motor_driver>. Acesso em: 13 mai. 2020c.
- REPRAP. RepRap Options. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/RepRap_Options>. Acesso em: 12 mai. 2020.
- RUSCHEL, H.; ZANOTTO, M. S.; MOTA, W. C. DA. **Computação em nuvem**, 2010. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Disponível em: <[https://www.ppgia.pucpr.br/~jamhour/RSS/TCCRSS08B/Welton Costa da Mota - Artigo.pdf](https://www.ppgia.pucpr.br/~jamhour/RSS/TCCRSS08B/Welton%20Costa%20da%20Mota%20-%20Artigo.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- SALINAS, R. **3D Printing with RepRap Cookbook**. Birmingham: Packt Publishing Ltd., 2014.
- SAMPAIO, C. L. M. **Guia Maker de Impressão 3D - Teoria e Prática Consolidadas**. 2017.
- SANTANA, L.; ALVES, J. L.; SABINO NETTO, A. DA C.; MERLINI, C. A comparative study between PETG and PLA for 3D printing through thermal, chemical and mechanical characterization. **Revista Materia**, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151770762018000400457>. Acesso em: 1 mai. 2020.
- SANTOS, B. P.; SILVA, L. A. M.; CELES, C. S. F. S.; et al. Internet das Coisas: da Teoria à Prática. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 50, 2016. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>. Acesso em: 5 abr. 2020.
- SANTOS, V. P. DE A.; GONÇALVES, B. F. **Motor de Passo**. 2008.
- SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. 1º ed. Londres: Currency, 2017.
- SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - Quem são as micros e pequenas indústrias? Disponível em: <<https://m.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/ufs/sp/bis/quem-sao-as-micros-e-pequenas-industrias,4ba39a6cf8bbf510VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 31 mai. 2020.
- SILVA, L. R. Atelier: Printer Host para Impressão 3D Embarcado. , 2019. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/10981>>. Acesso em: 15/4/2020.
- Sim, S. E., EASTERBROOK, S., HOLT, R. C.: **Using Benchmarking to Advance Research: A Challenge to Software Engineering**. Proceedings of the 25th International Conference on Software Engineering ICSE '03, IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 2003.
- SOUZA, P. H. M. DE; JUNIOR, S. J. C.; NETO, G. G. D. **Indústria 4.0: Contribuições**

Para Setor Produtivo Moderno. **XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO**, 2017. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_238_384_34537.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2020.

SUGAYAMA, R.; NEGRELLI, E. Veículo conectado na rota da indústria 4.0. **XXIV Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva - SIMEA 2016**, v. 3, p. 48–63, 2016. Disponível em: <<https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/veiculo-conectado-na-rota-da-industria-4-0-23722>>. Acesso em: 18 mai. 2020.

SUN, Q.; RIZVI, G. M.; BELLEHUMEUR, C. T.; GU, P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. **Rapid Prototyping Journal**, v. 14, n. 2, p. 72–80, 2008. Emerald Group Publishing Limited.

TAKAGAKI, L. K. Tecnologia de impressão 3D. **Revista Inovação Tecnológica**, v. 2, p. 28–40, 2012.

TANIKELLA, N. G.; WITTBRODT, B.; PEARCE, J. M. Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. **Additive Manufacturing**, v. 15, n. March, p. 40–47, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416300859>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

VIRGALA, I.; KELEMEN, M.; LIPTÁK, T.; PRADA, E. Stepper Motor Control by ATMEL AVR Microcontroller. **Applied Mechanics and Materials**, v. 816, p. 321–326, 2015.

VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações**. 1º ed. São Paulo: Blucher, 2007.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1º ed. São Paulo: Blucher, 2017.

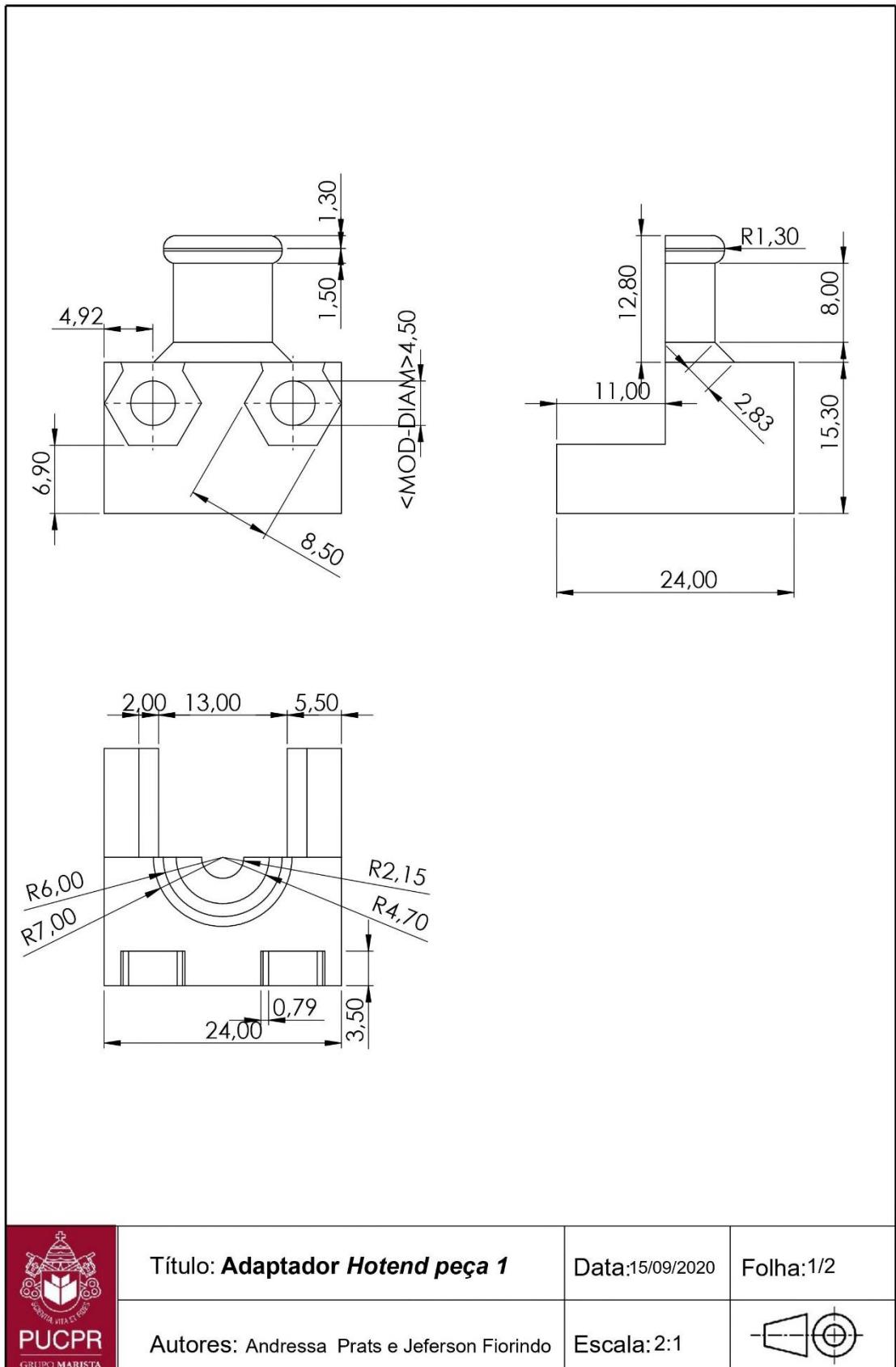
WILKINS, J. Retrofit Your Future For Industry 4.0. Disponível em: <<https://www.manufacturing.net/operations/article/13196461/retrofit-your-future-for-industry-40>>. Acesso em: 23 mai. 2020.

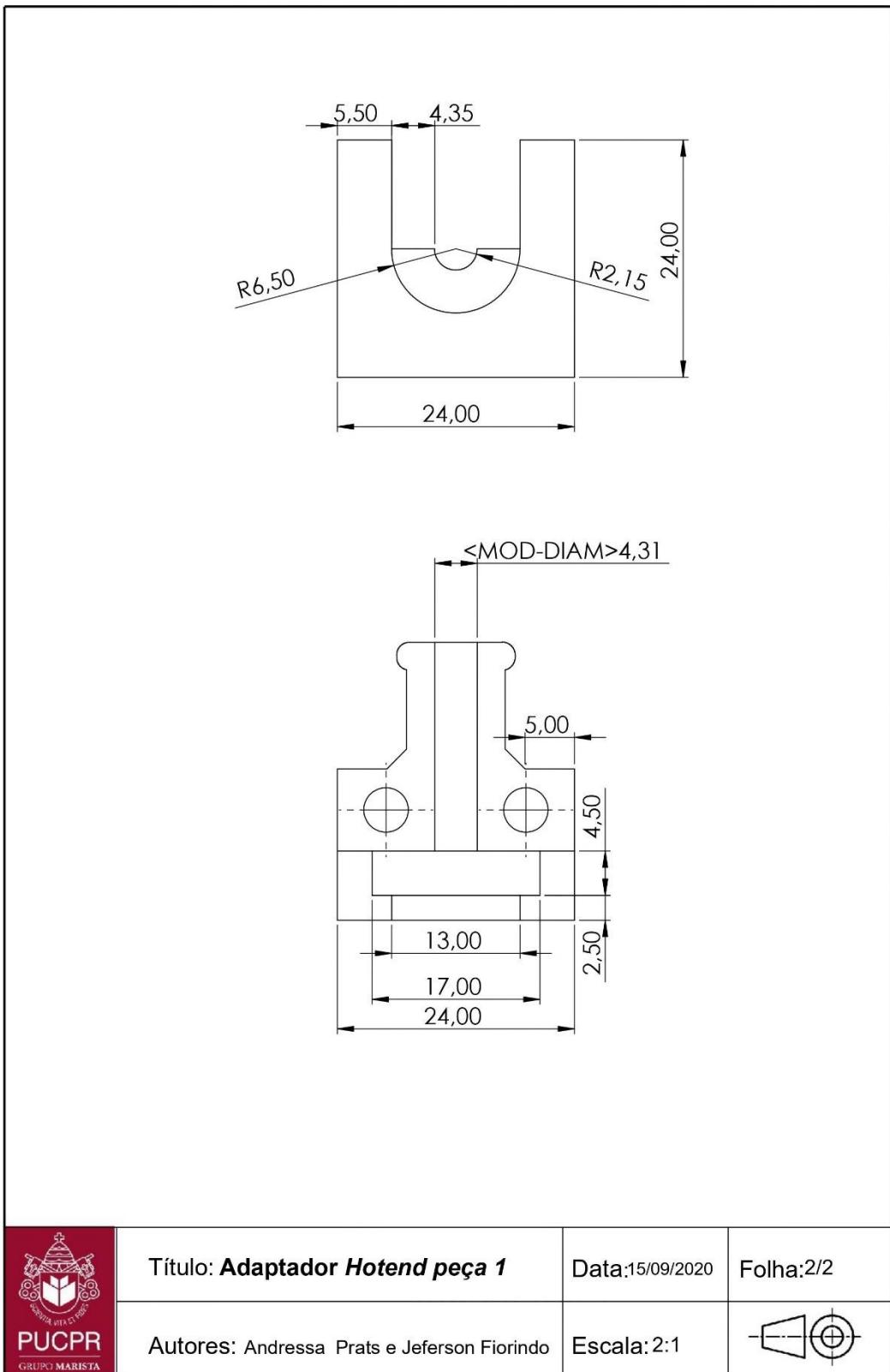
WIMPENNY, D. I.; PANDEY, P. M.; JYOTHISH KUMAR, L. **Advances in 3D Printing & additive manufacturing technologies**. 1º ed. Singapura: Springer, 2016.

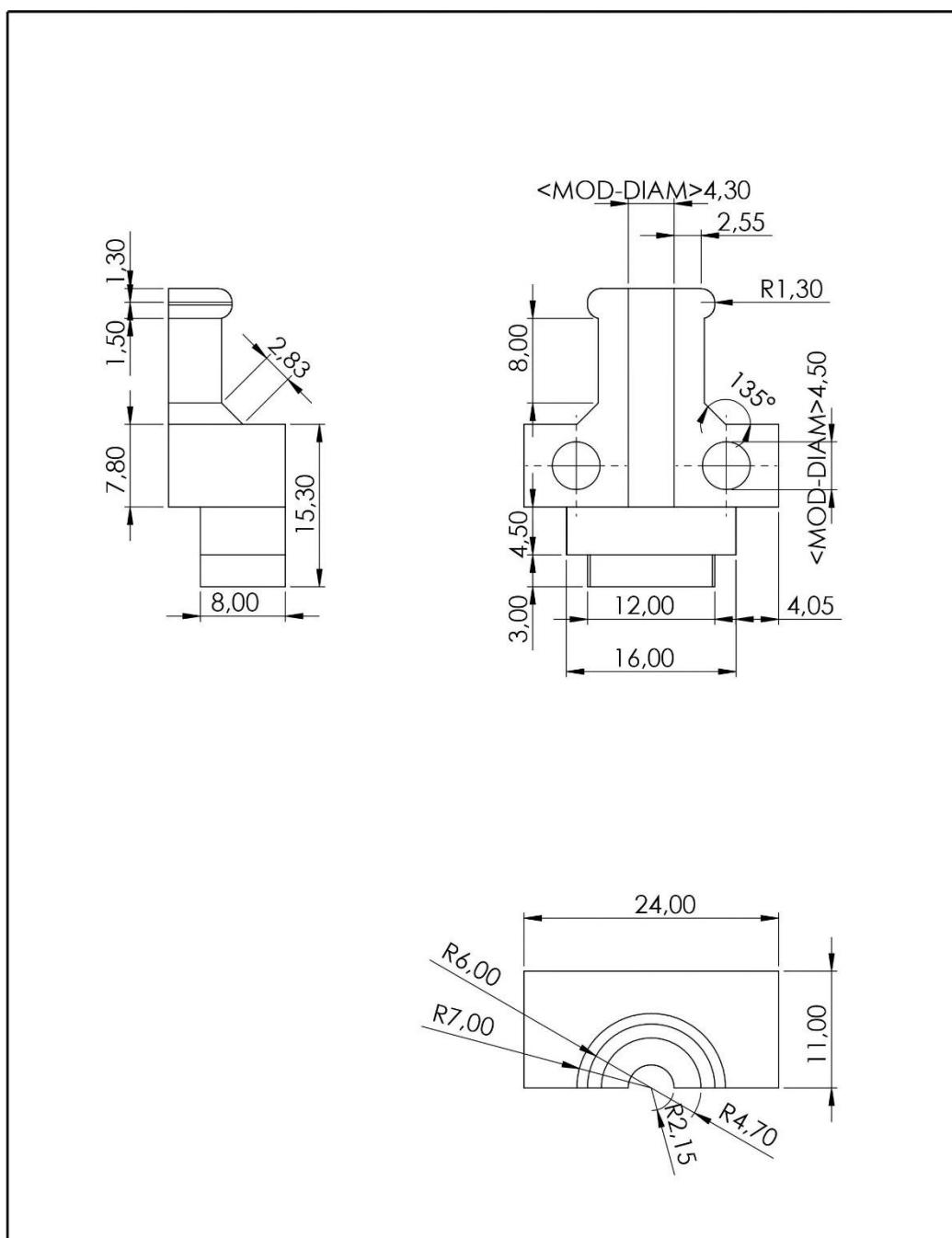
APÊNDICE A – CUSTOS

Produto	Quantidade	Valor (\$)	Valor (R\$)	Valor Total (R\$)
Rumba Plus	1	\$37,08	R\$ 202,46	R\$ 202,46
Pack 5x DRV8825	1	\$6,64	R\$ 36,25	R\$ 36,25
Display TFT24 da Bigtreetech	1	\$13,92	R\$ 76,00	R\$ 76,00
Manta de aquecimento de silicone	1	\$69,90	R\$ 381,65	R\$ 381,65
Placa Cortiça 3mm	2	-	R\$ 25,38	R\$ 50,76
Espelho	1	-	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Relé de estado sólido 25 Amperes com Dissipador	1	\$ 4,70	R\$ 25,66	R\$ 25,66
Hotend E3D V6 24 Volts	1	£ 51,00	R\$ 333,54	R\$ 333,54
Fonte 24 Volts 15 Amperes	1	-	R\$ 59,97	R\$ 59,97
Terminal Fêmea para alojamento Modu	43	-	R\$ 0,11	R\$ 4,73
Terminal Macho para alojamento Modu	50	-	R\$ 0,27	R\$ 13,50
Alojamento 2 vias Modu	15	-	R\$ 0,10	R\$ 1,50
Alojamento 3/5 vias Modu	7	-	R\$ 0,16	R\$ 1,12
Alojamento 4 vias Modu	12	-	R\$ 0,19	R\$ 2,28
Terminal Forquilha	14	-	R\$ 0,24	R\$ 3,36
Terminal Ilhó 1mm ²	6	-	R\$ 0,08	R\$ 0,48
Terminal Ilhó 1,50mm ²	10	-	R\$ 0,10	R\$ 1,00
Conector Latch	4	-	R\$ 0,76	R\$ 3,04
Cabo Flat 10 vias	3	-	R\$ 3,63	R\$ 10,89
Malha Nautica 100mm (metro)	4	-	R\$ 4,16	R\$ 16,64
Espaguete Termo Retrátil (metro)	2	-	R\$ 2,88	R\$ 5,76
Clipes de metal de papel	4	-	R\$ 1,30	R\$ 5,20
Pack 2x NTC 100K	1	-	R\$ 12,86	R\$ 12,86
Sensor de Auto Nivelamento	1	\$ 35,52	R\$ 193,94	R\$ 193,94
Placa de alumínio 300x300x3 mm	1	-	R\$ 51,60	R\$ 51,60
Suporte para o hotend impresso	1	-	R\$ 1,10	R\$ 1,10
Suporte do BLTouch impresso	1	-	R\$ 0,40	R\$ 0,40
Suporte para fonte de alimentação impresso	2	-	R\$ 0,29	R\$ 0,58
Suporte para a controladora impresso	1	-	R\$ 2,01	R\$ 2,01
Suporte do display impresso	1	-	R\$ 11,95	R\$ 11,95
Suporte do rele de estado sólido	2	-	R\$ 0,28	R\$ 0,56
Suporte para o filamento impresso	1	-	R\$ 9,44	R\$ 9,44
Suporte conector de energia	1	-	R\$ 6,39	R\$ 6,39

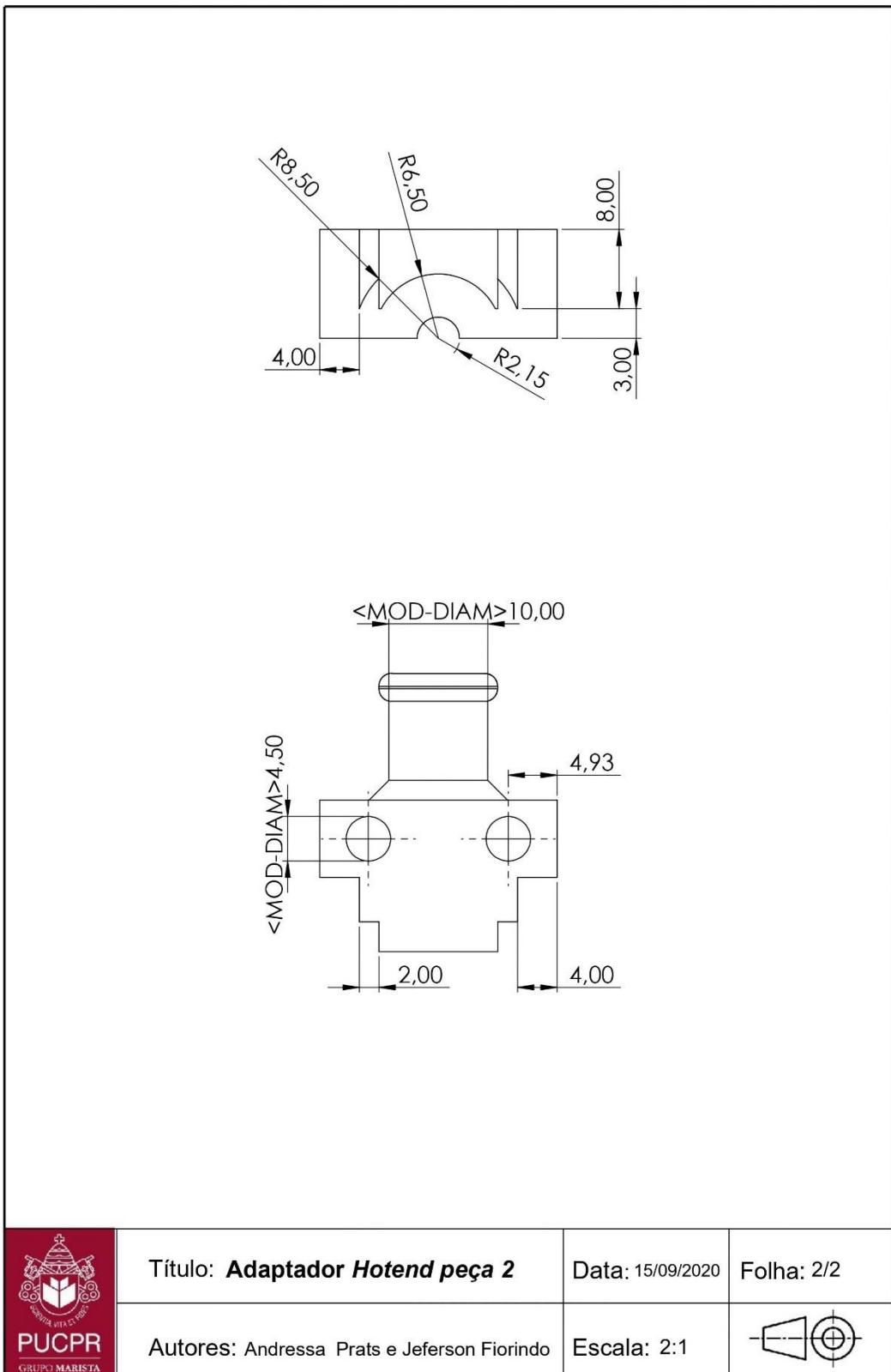
Suporte para o <i>cooler</i> de resfriamento da peça	1	-	R\$ 3,73	R\$ 3,73
Bico do hotend (Pack x2)	1		R\$ 17,00	R\$ 17,00
Guias de posicionamento da mesa	4		R\$ 10,23	R\$ 10,23
Cotação Libra (22/04)		R\$ 6,54	Total	R\$ 1.575,77
Cotação Dólar (22/04)		R\$ 5,46	Total com Taxas	R\$ 2.325,47

APÊNDICE B – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE FIXAÇÃO HOTEND


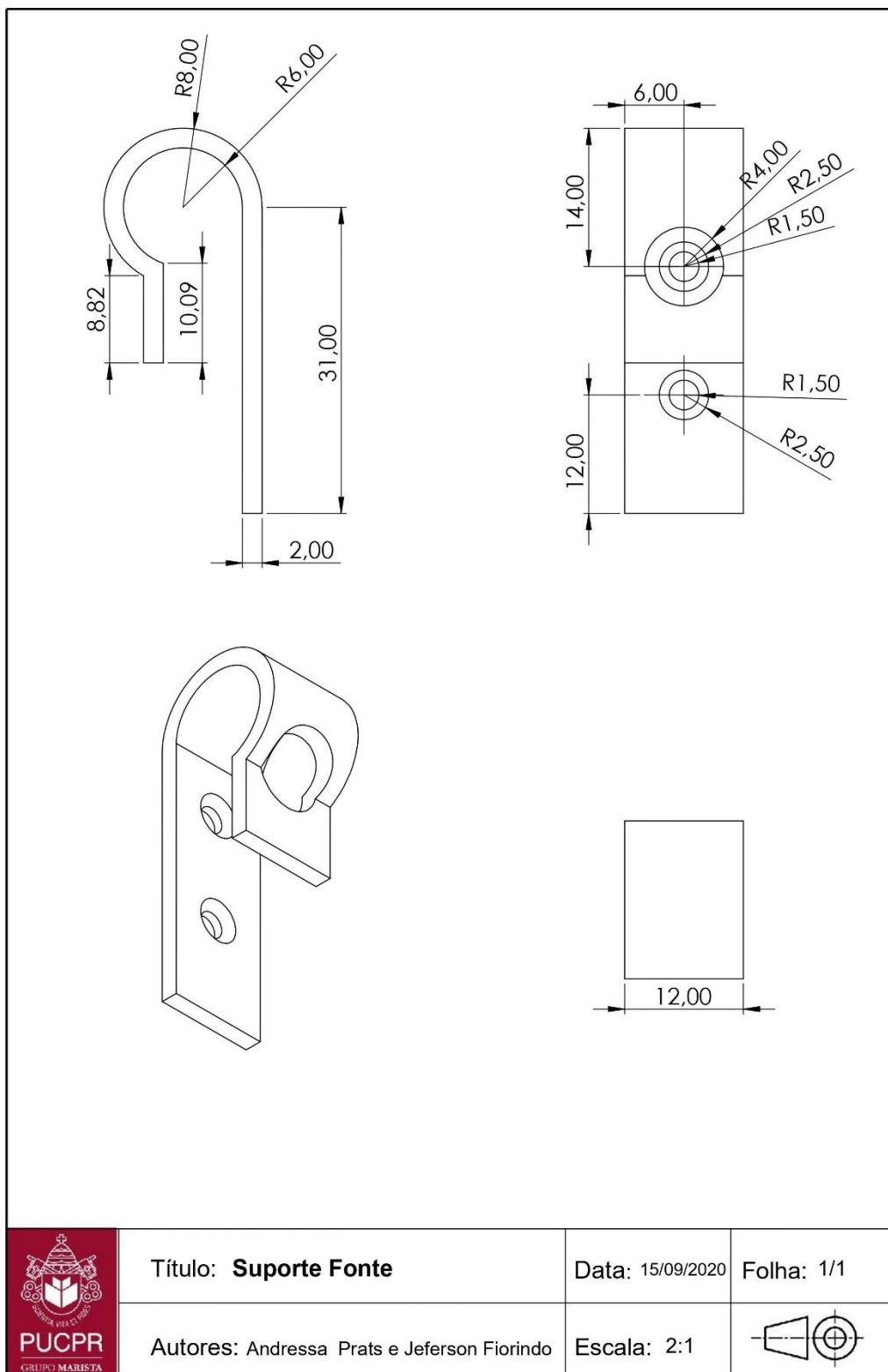




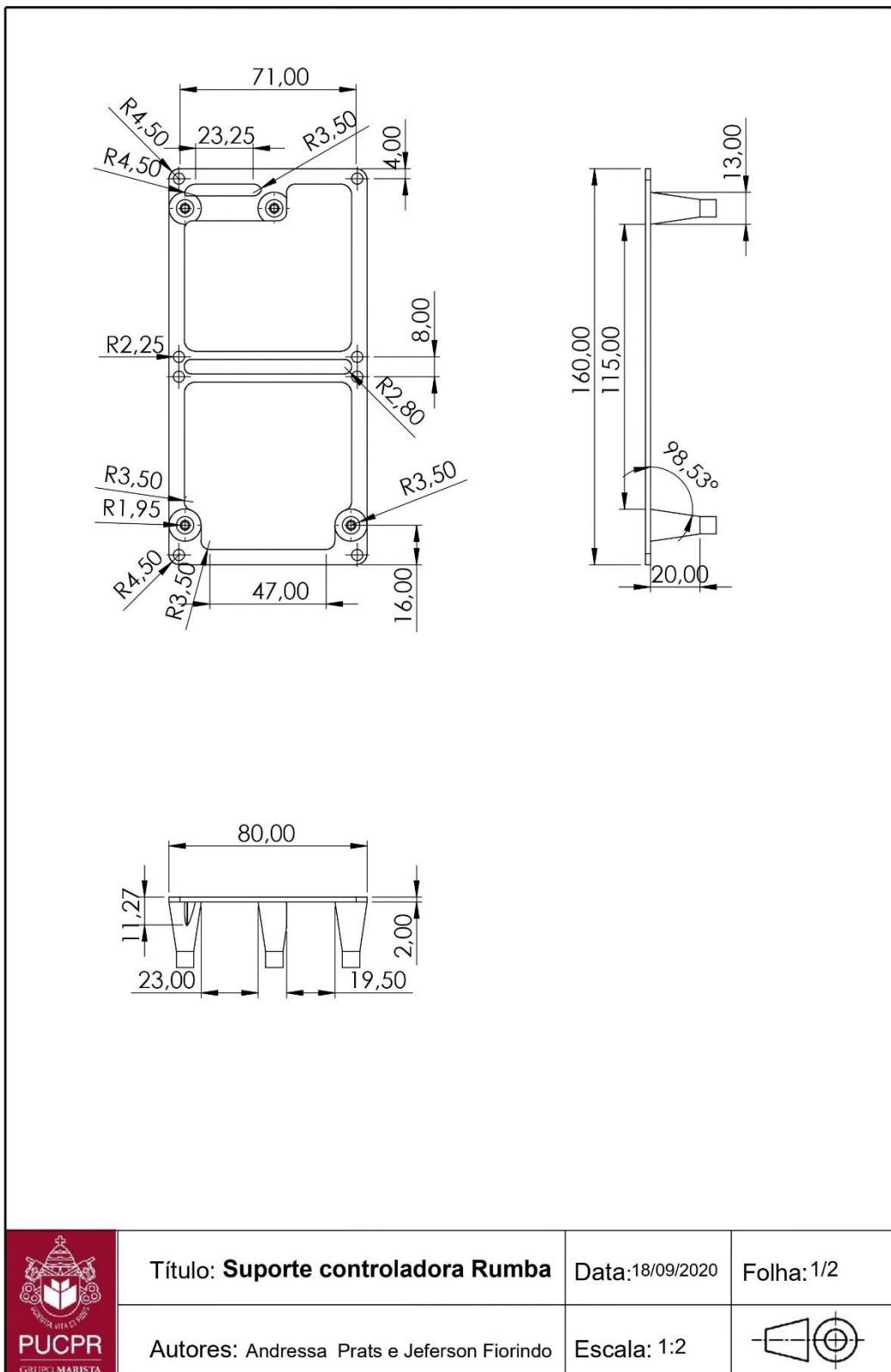
 PUCPR GRUPO MARISTA	Título: Adaptador Hotend peça 2	Data: 15/09/2020	Folha: 1/2
	Autores: Andressa Prats e Jeferson Fiorindo	Escala: 2:1	

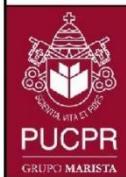
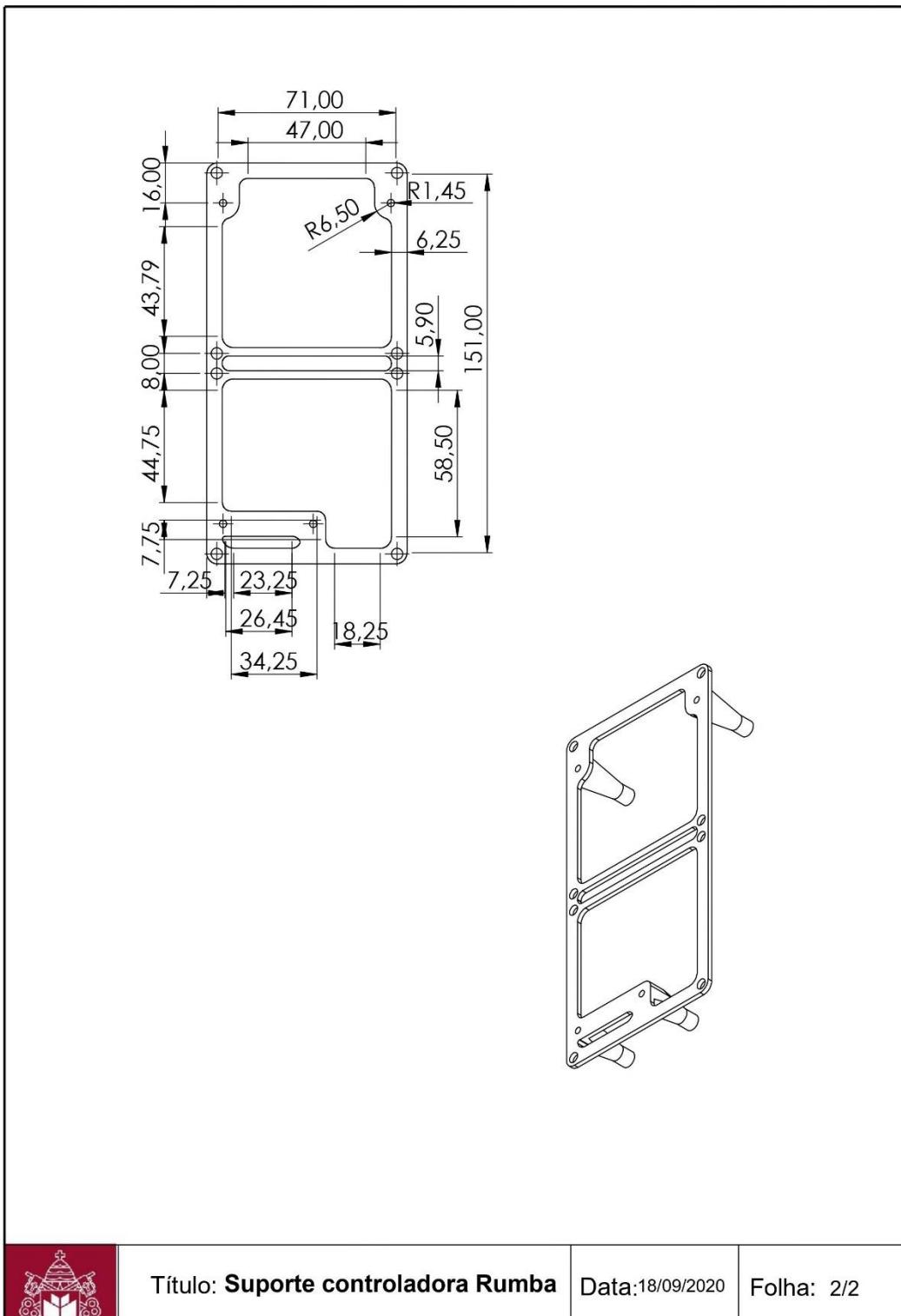


APÊNDICE C – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE DE FIXAÇÃO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO



APÊNDICE D – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE CONTROLADORA RUMBA





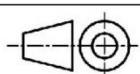
Título: **Suporte controladora Rumba**

Data: 18/09/2020

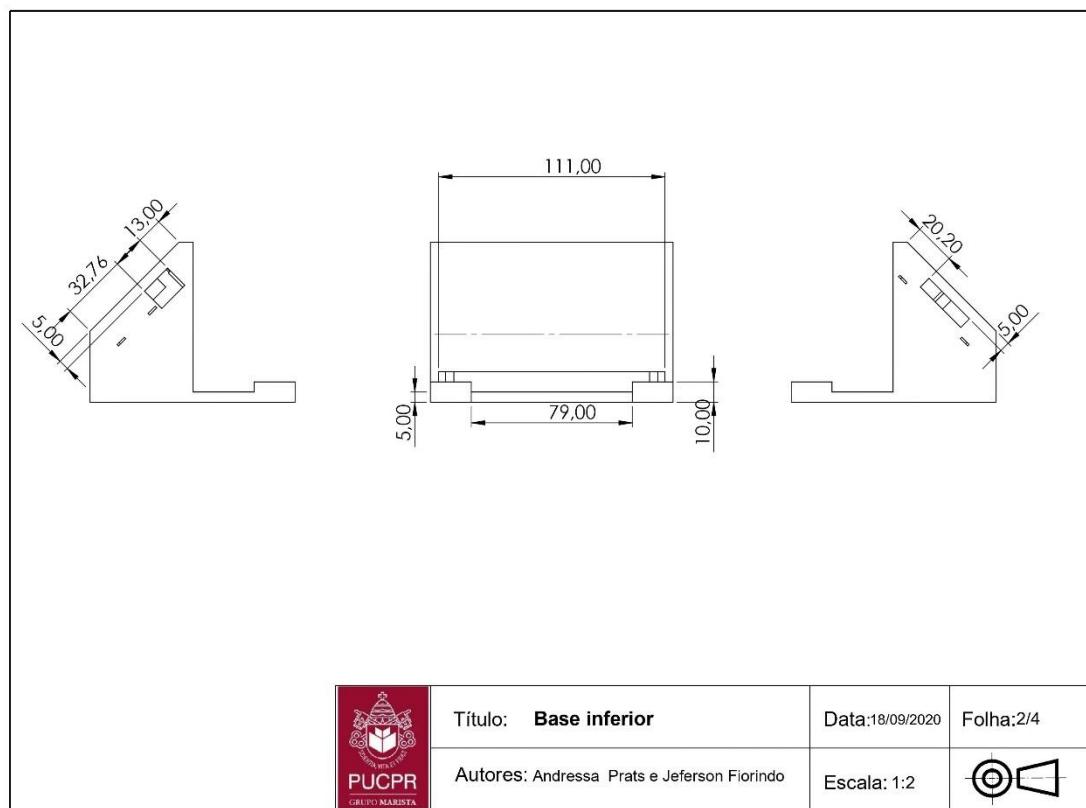
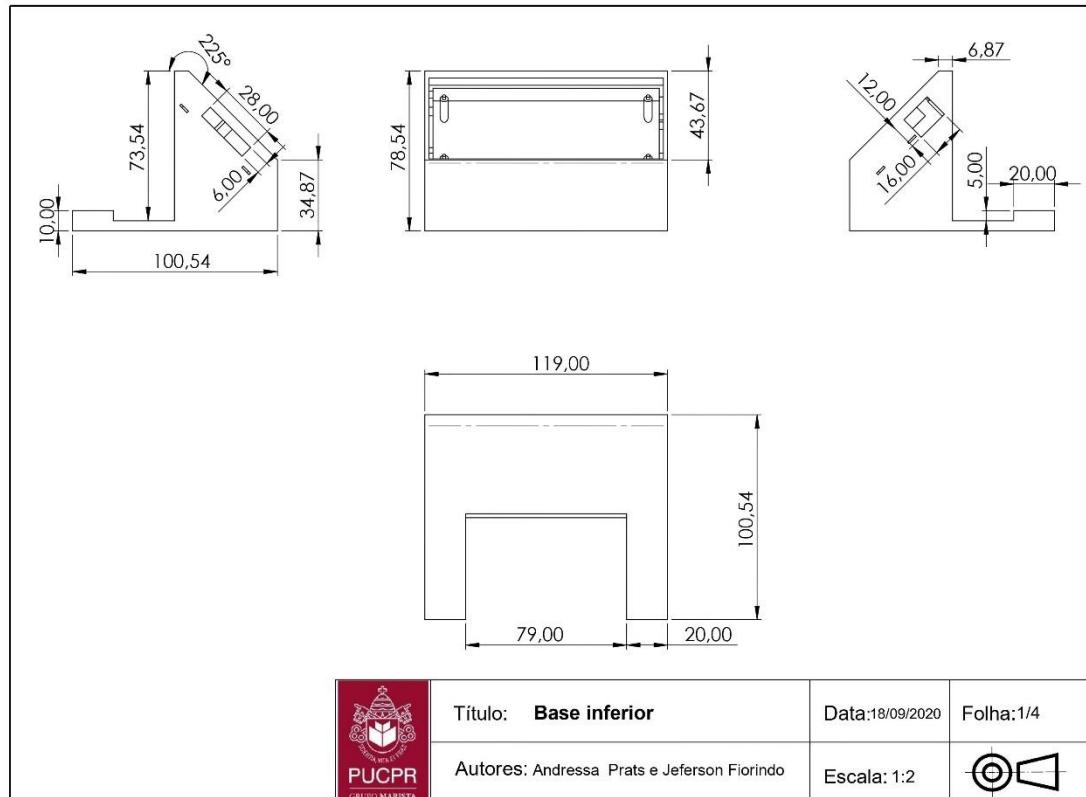
Folha: 2/2

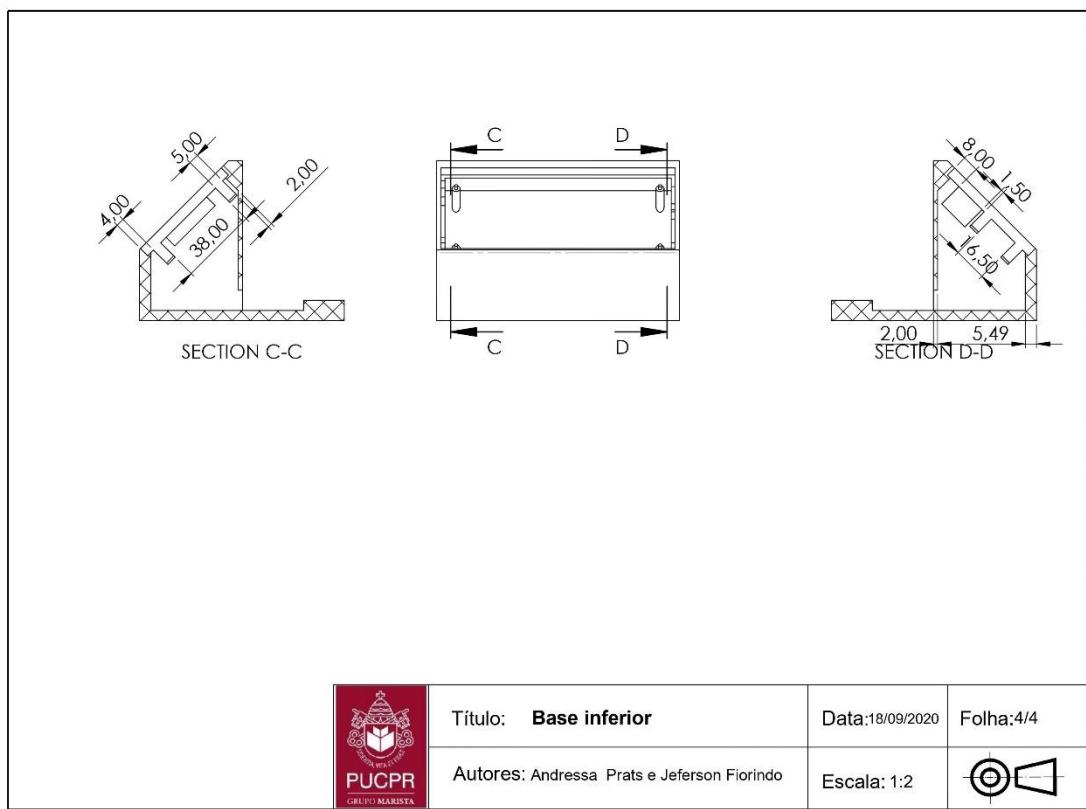
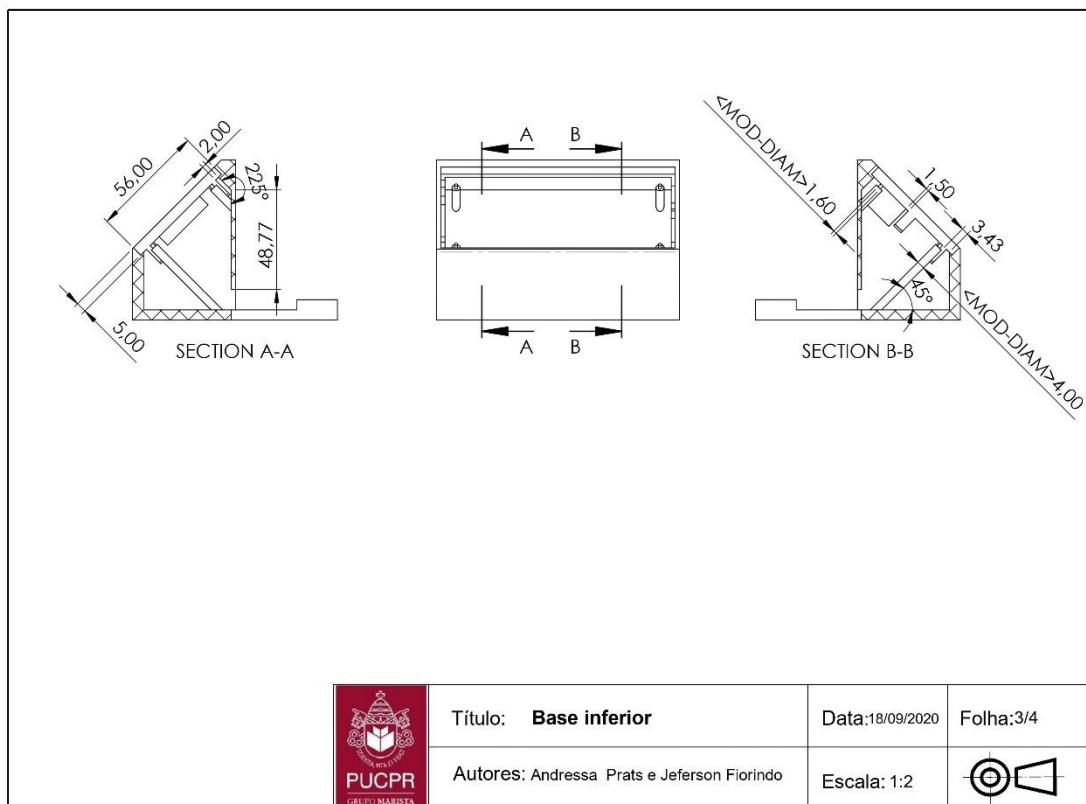
Autores: Andressa Prats e Jeferson Fiorindo

Escala: 1:2

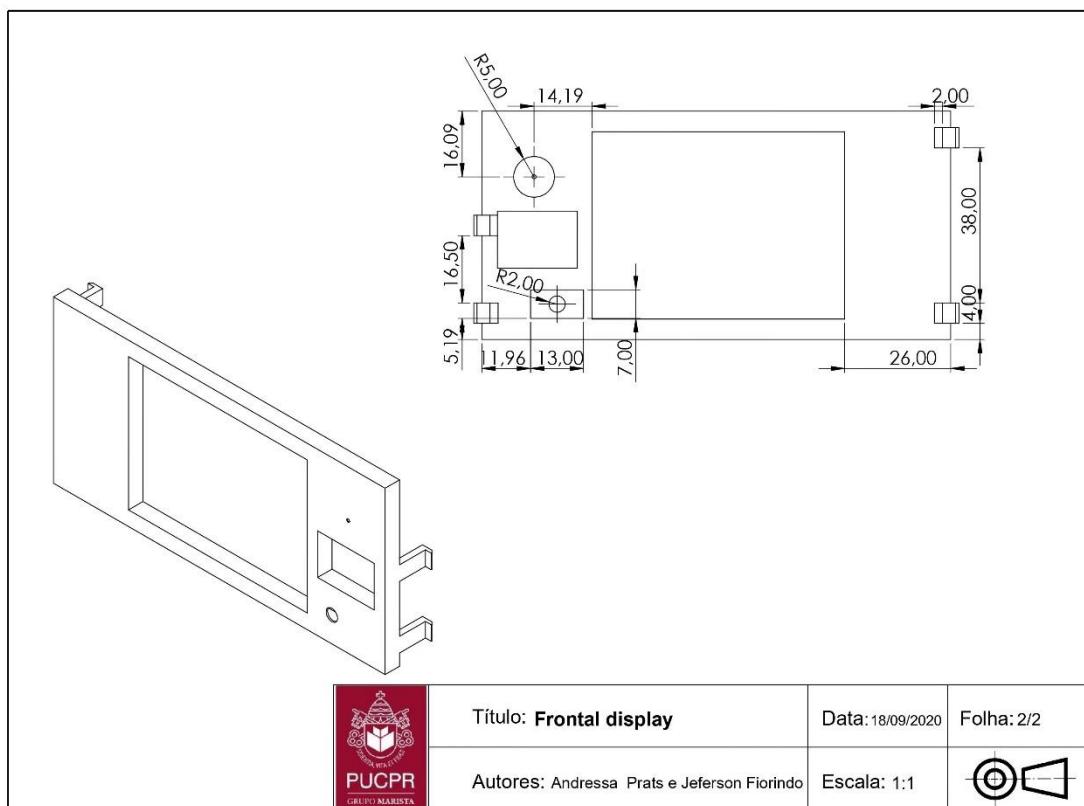
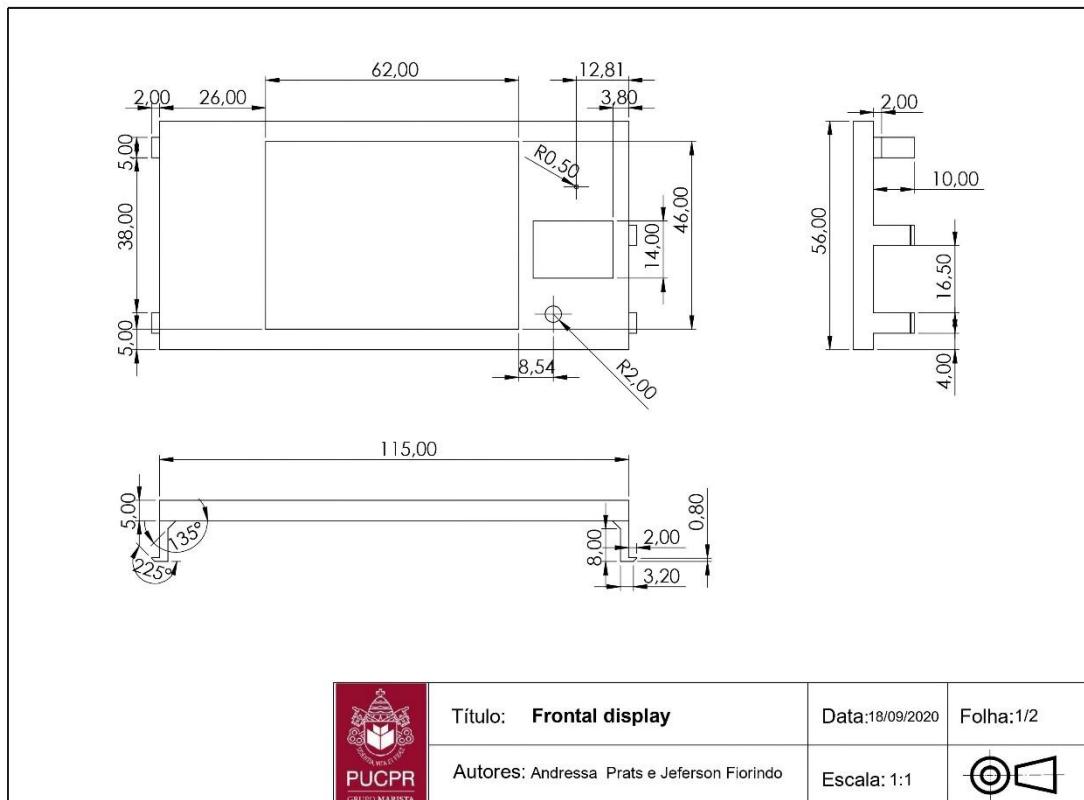


APÊNDICE E – FOLHAS DESENHO TÉCNICO BASE INFERIOR SUPORTE DISPLAY

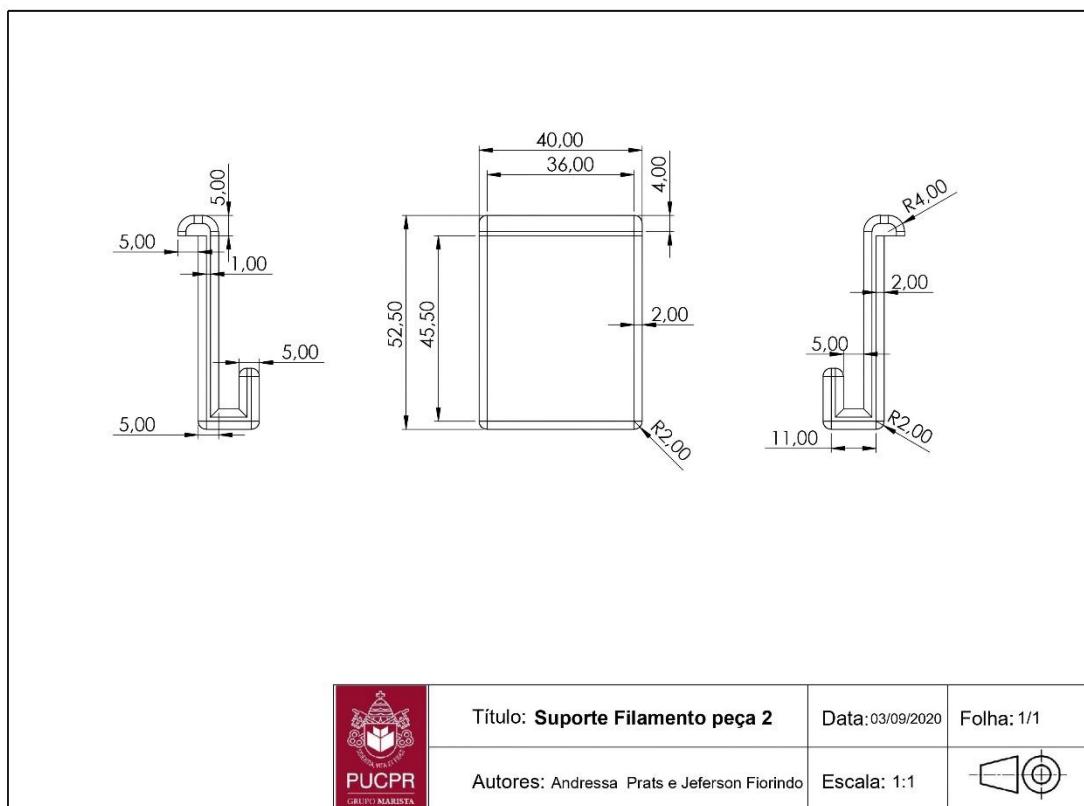
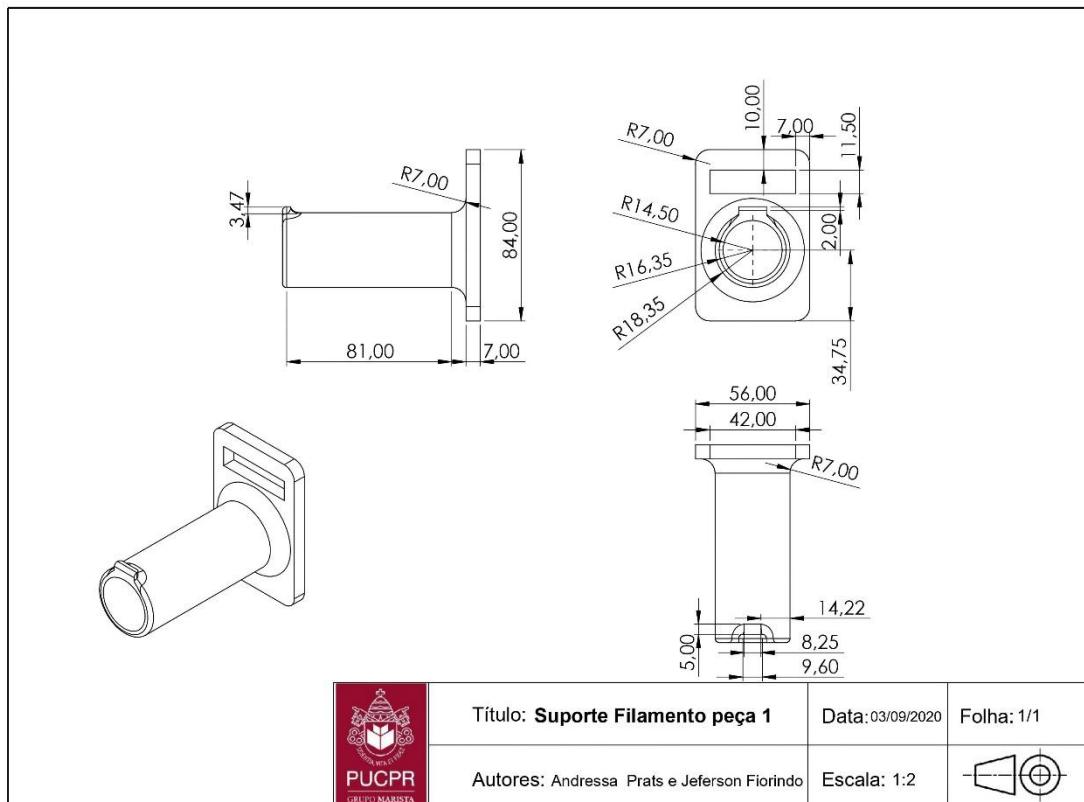




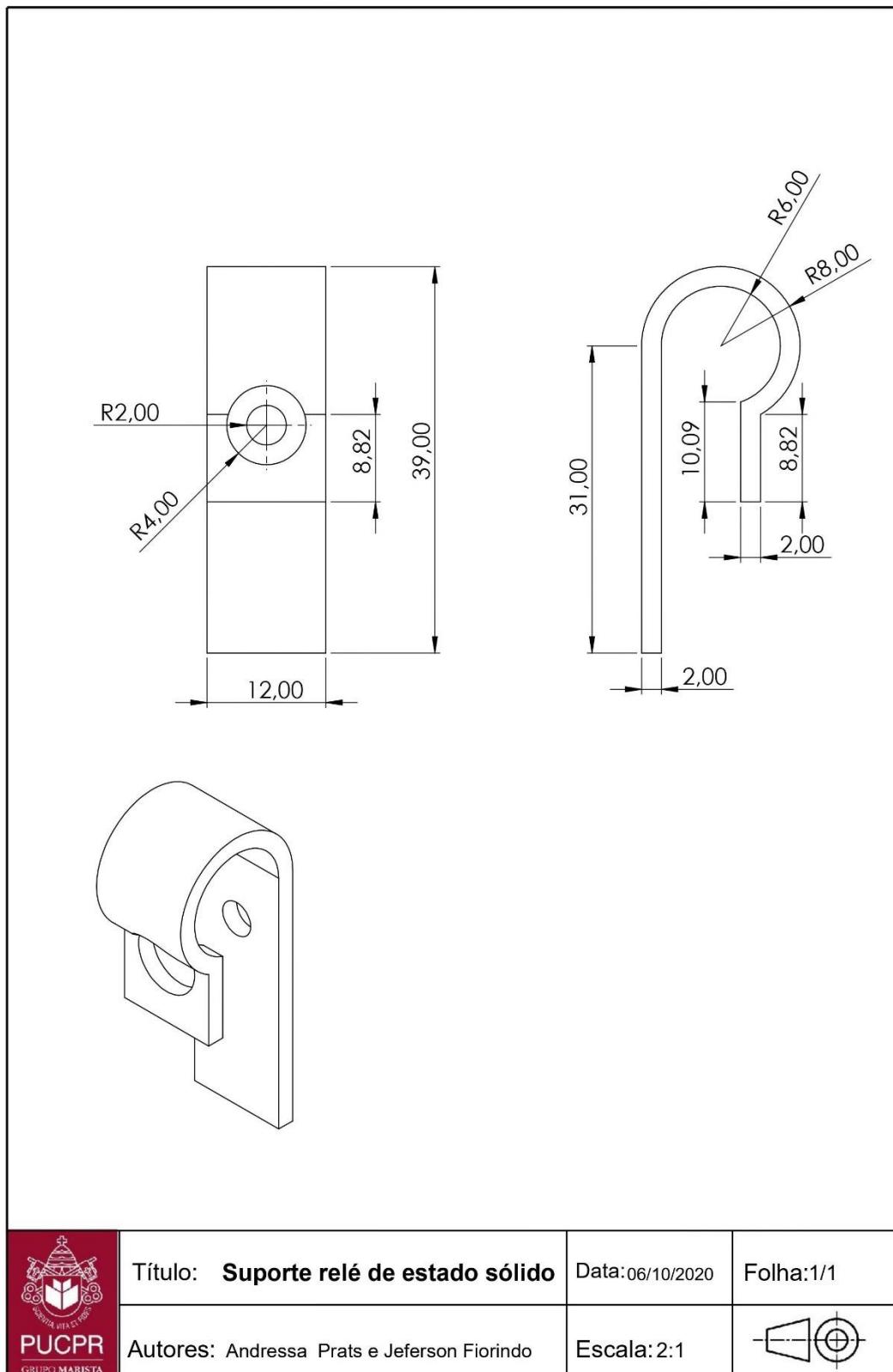
APÊNDICE F – FOLHAS DESENHO TÉCNICO PEÇA FRONTAL DISPLAY



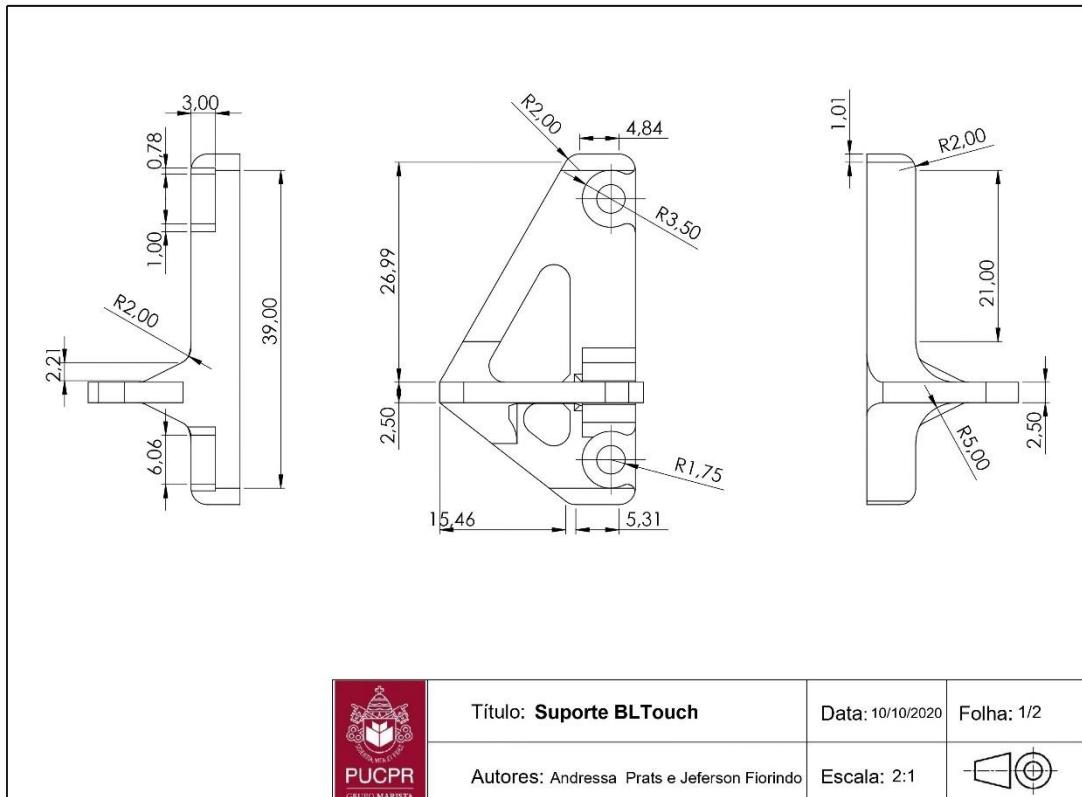
APÊNDICE G – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE FILAMENTO

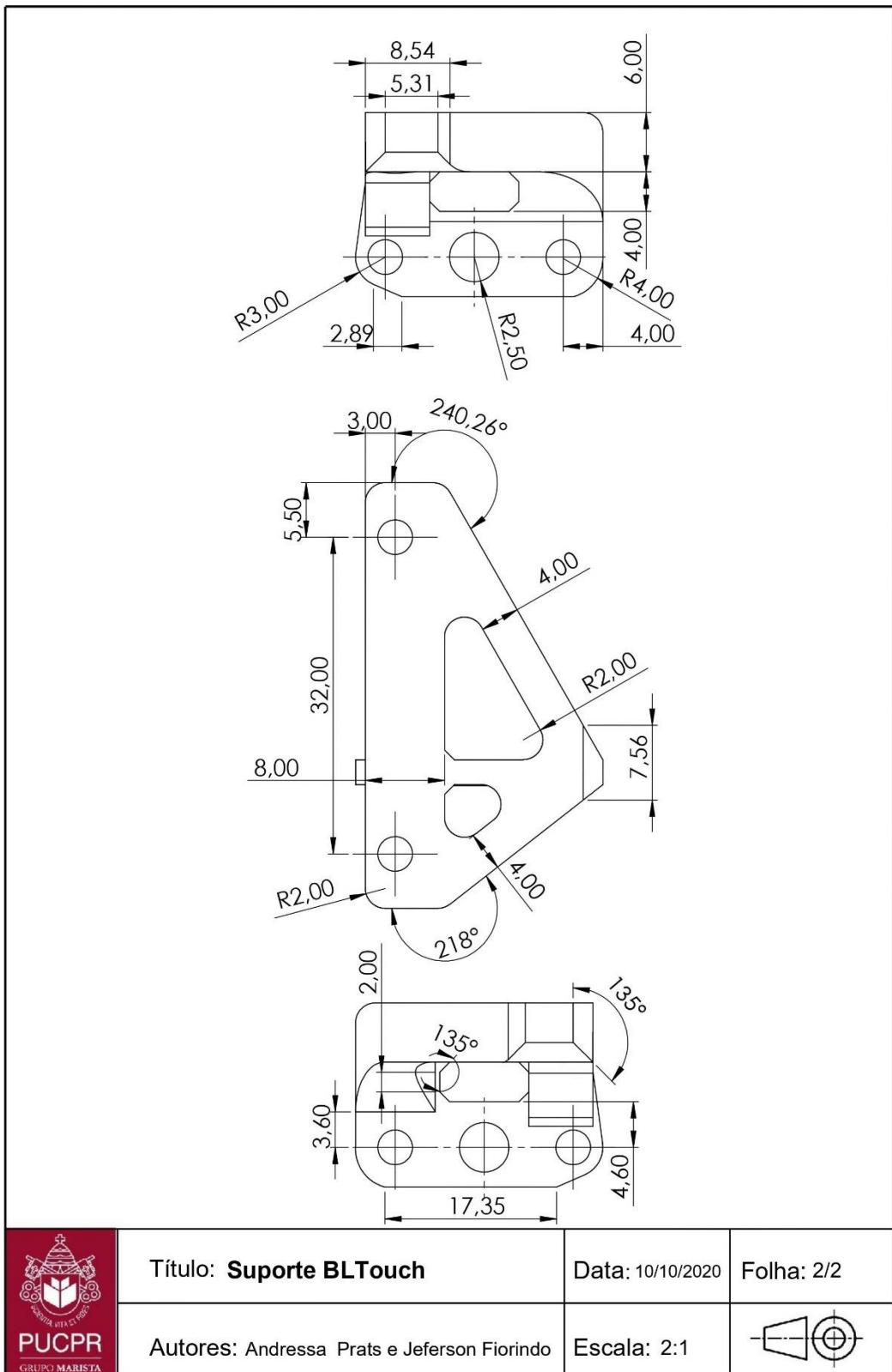


APÊNDICE H – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE DE FIXAÇÃO DO RELÉ DE ESTADO SOLIDO

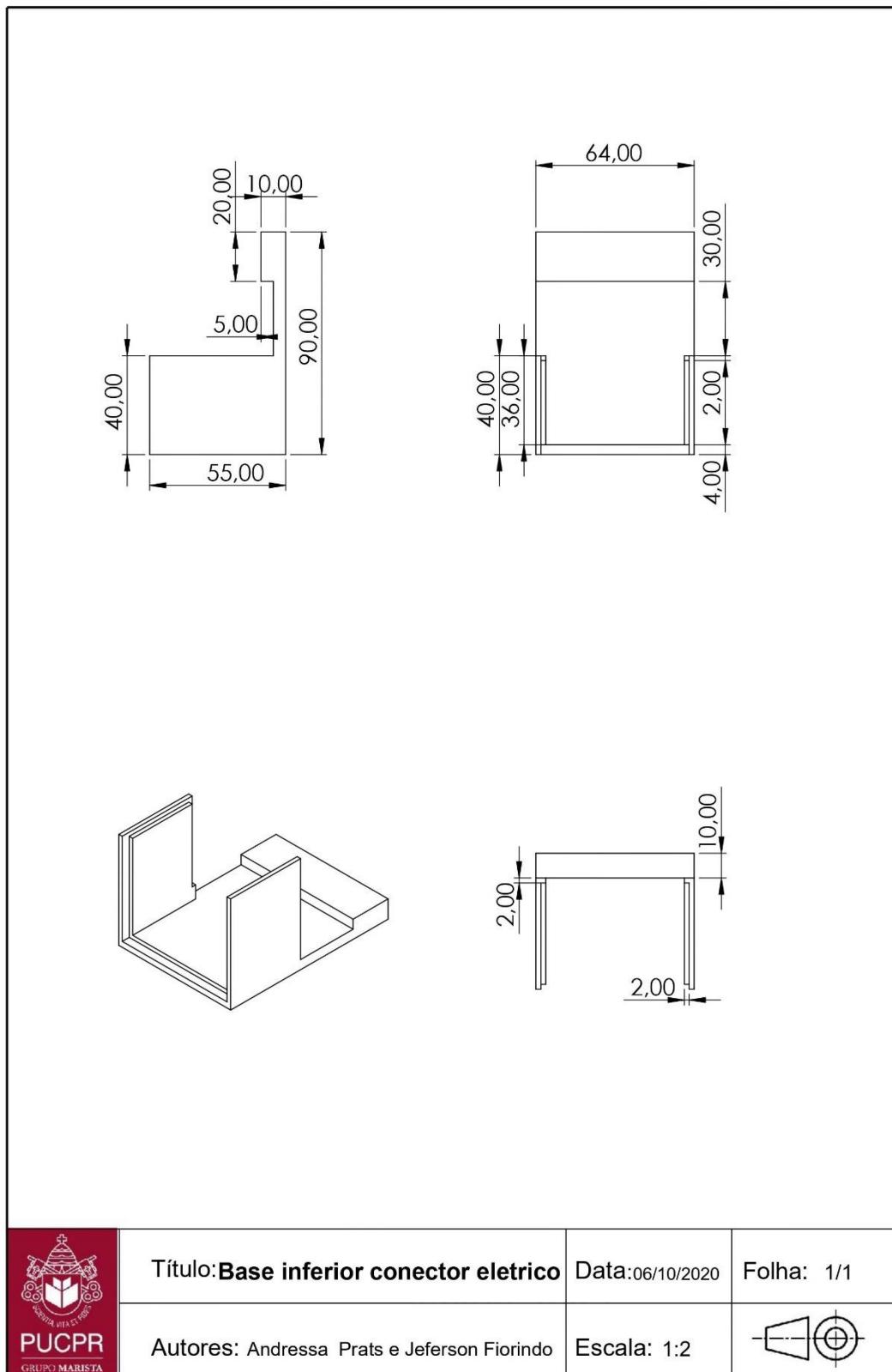


APÊNDICE I – FOLHAS DESENHO TÉCNICO SUPORTE DO SENSOR DE NIVELAMENTO BLTOUCH MODELO FINAL

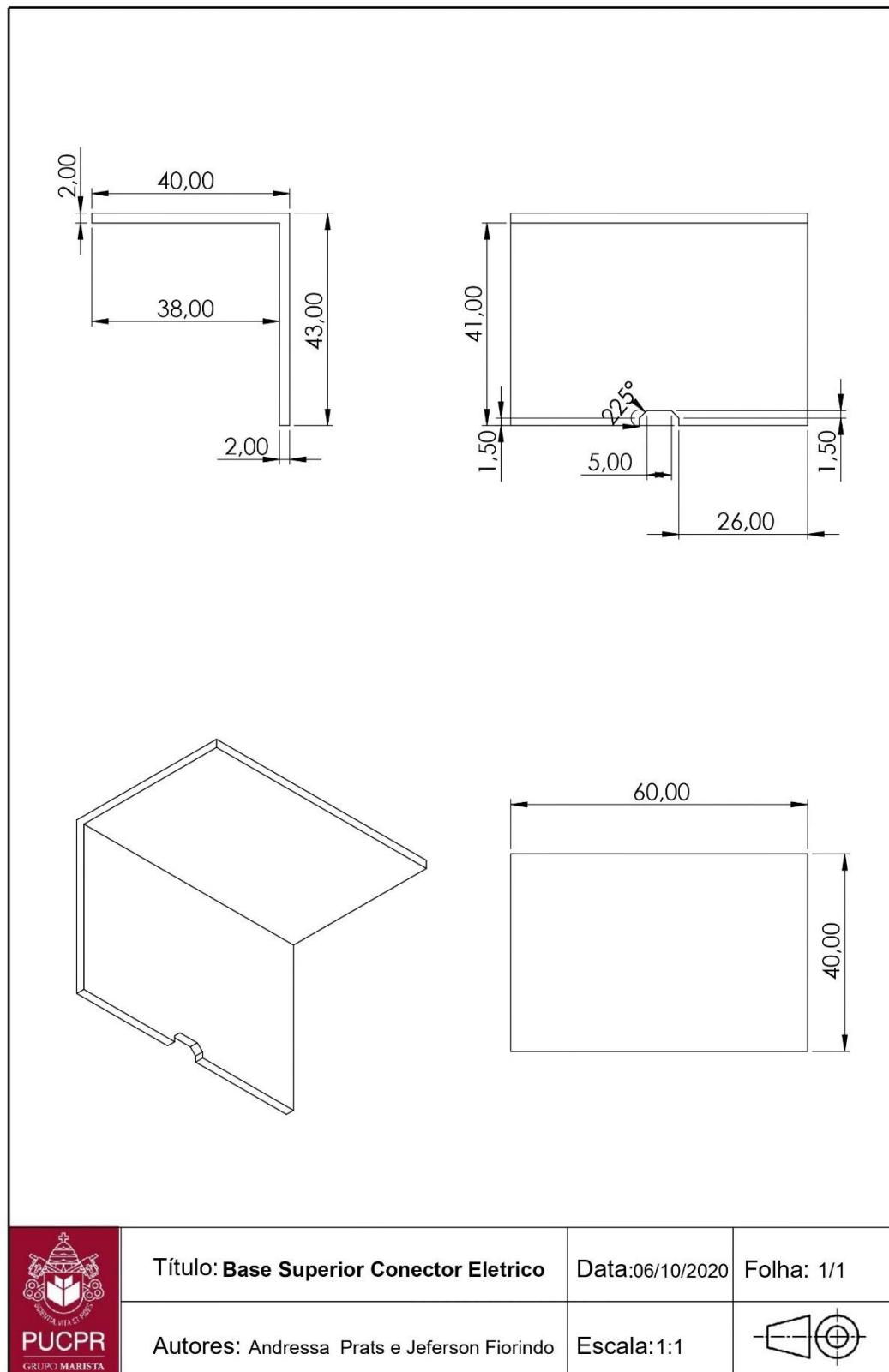


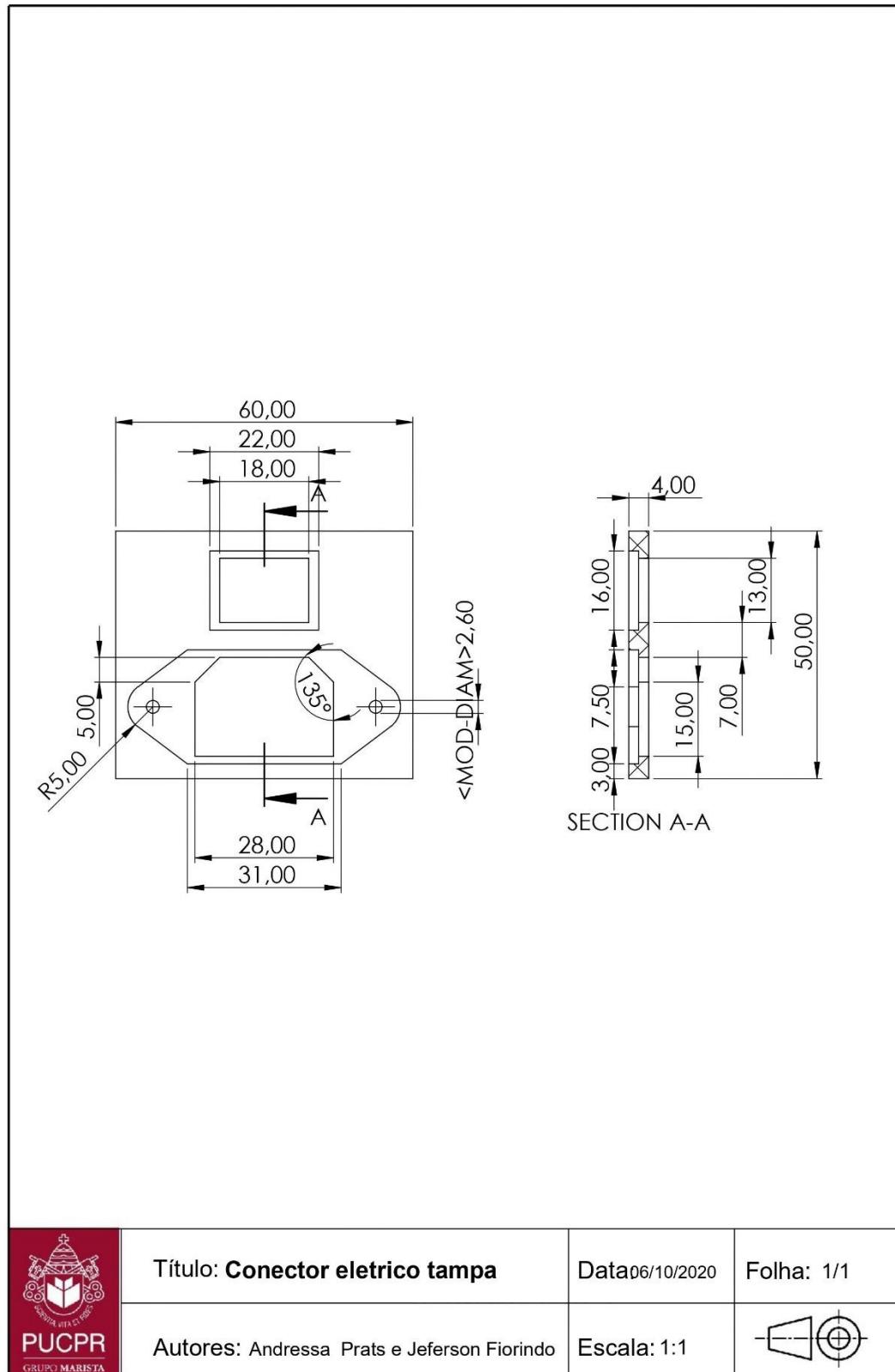


APÊNDICE J – FOLHA DESENHO TÉCNICO BASE INFERIOR SUPORTE CONECTOR DE ENERGIA

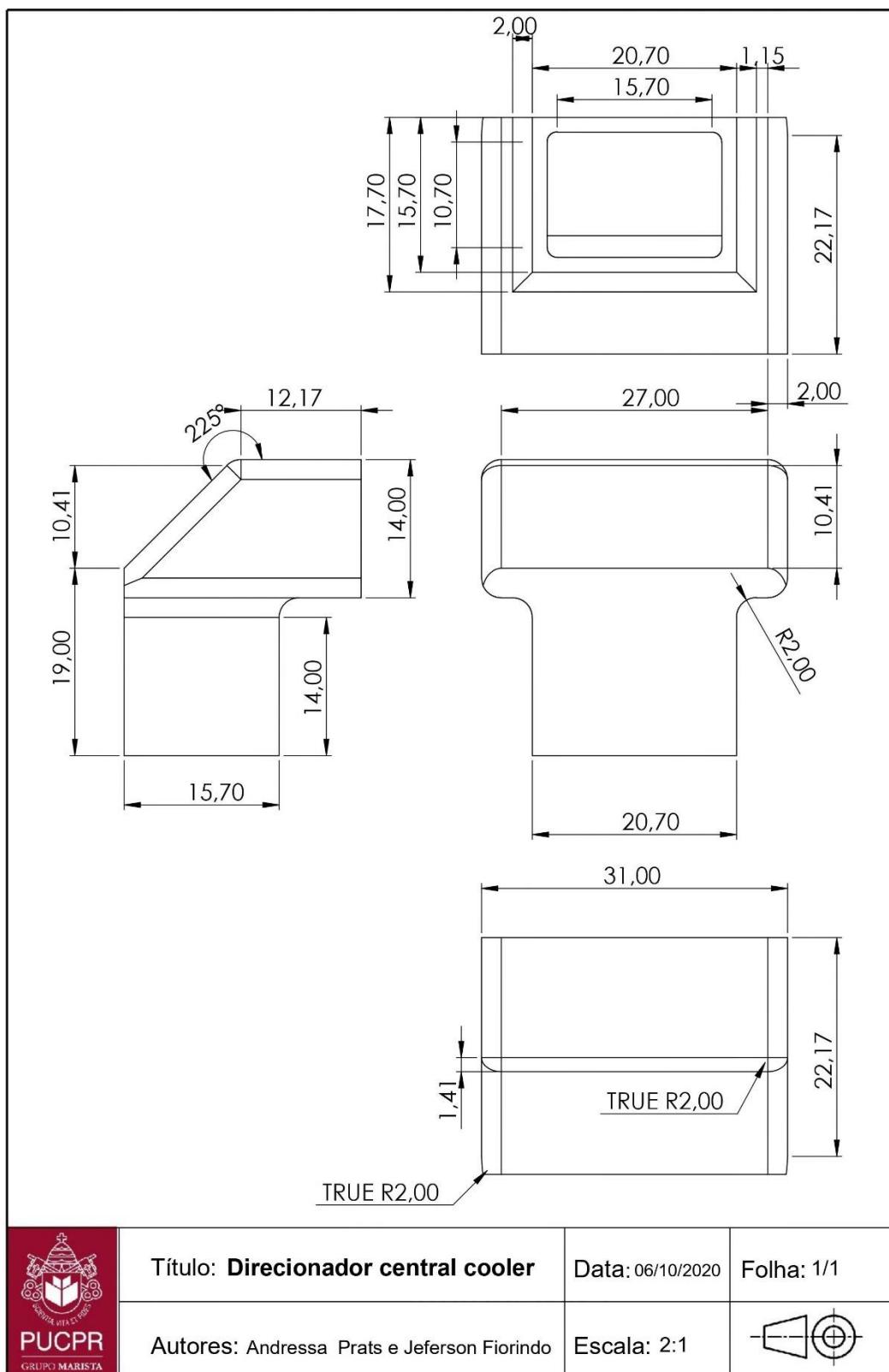


APÊNDICE K – FOLHA DESENHO TÉCNICO BASE SUPERIOR SUPORTE CONECTOR ENERGIA

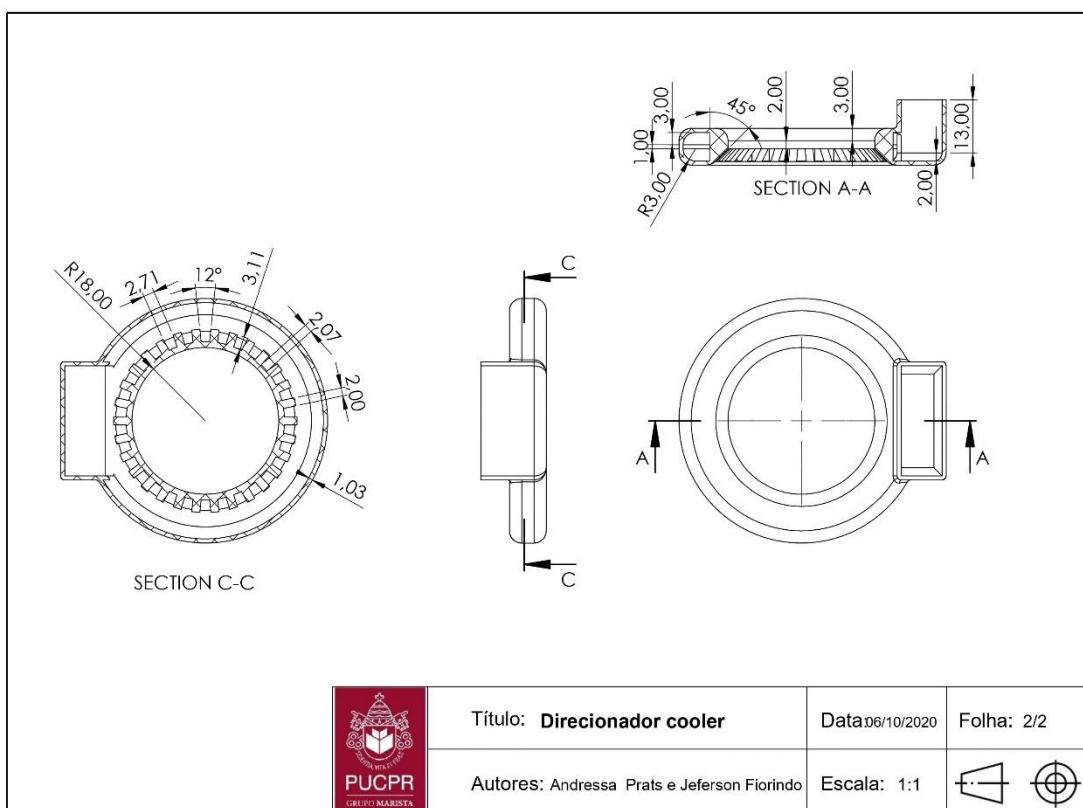
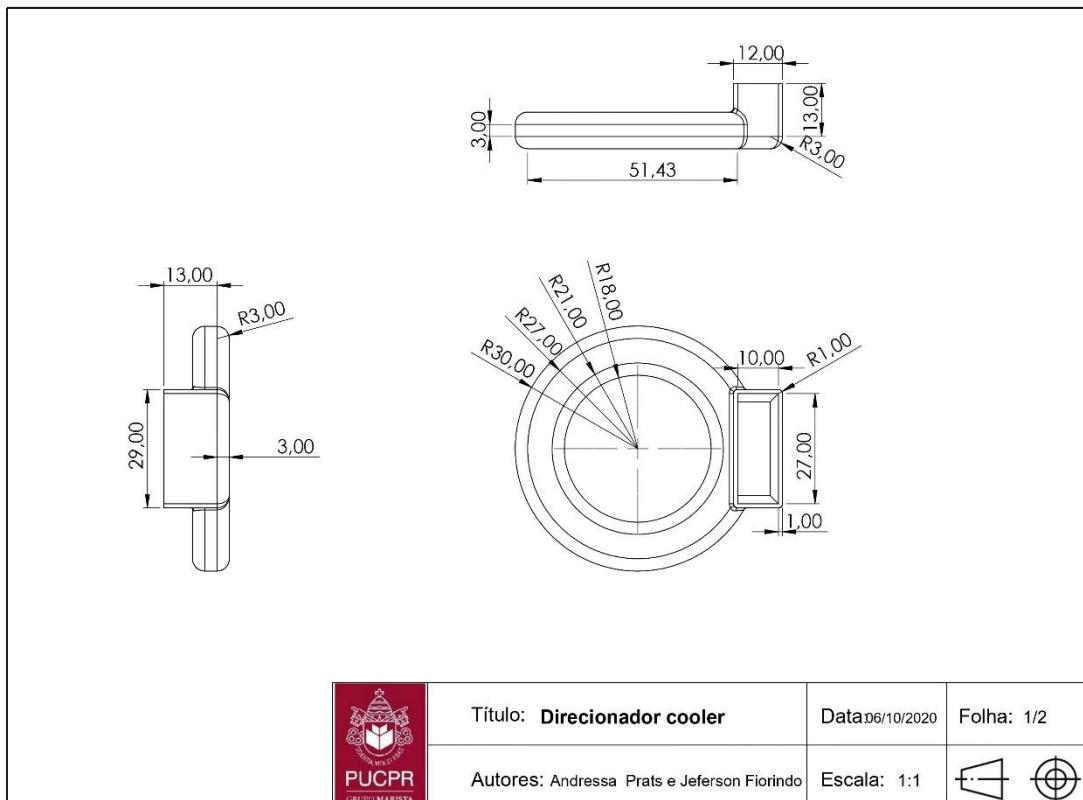


APÊNDICE L – FOLHA DESENHO TÉCNICO TAMPA EXTERNA SUPORTE CONECTOR DE ENERGIA

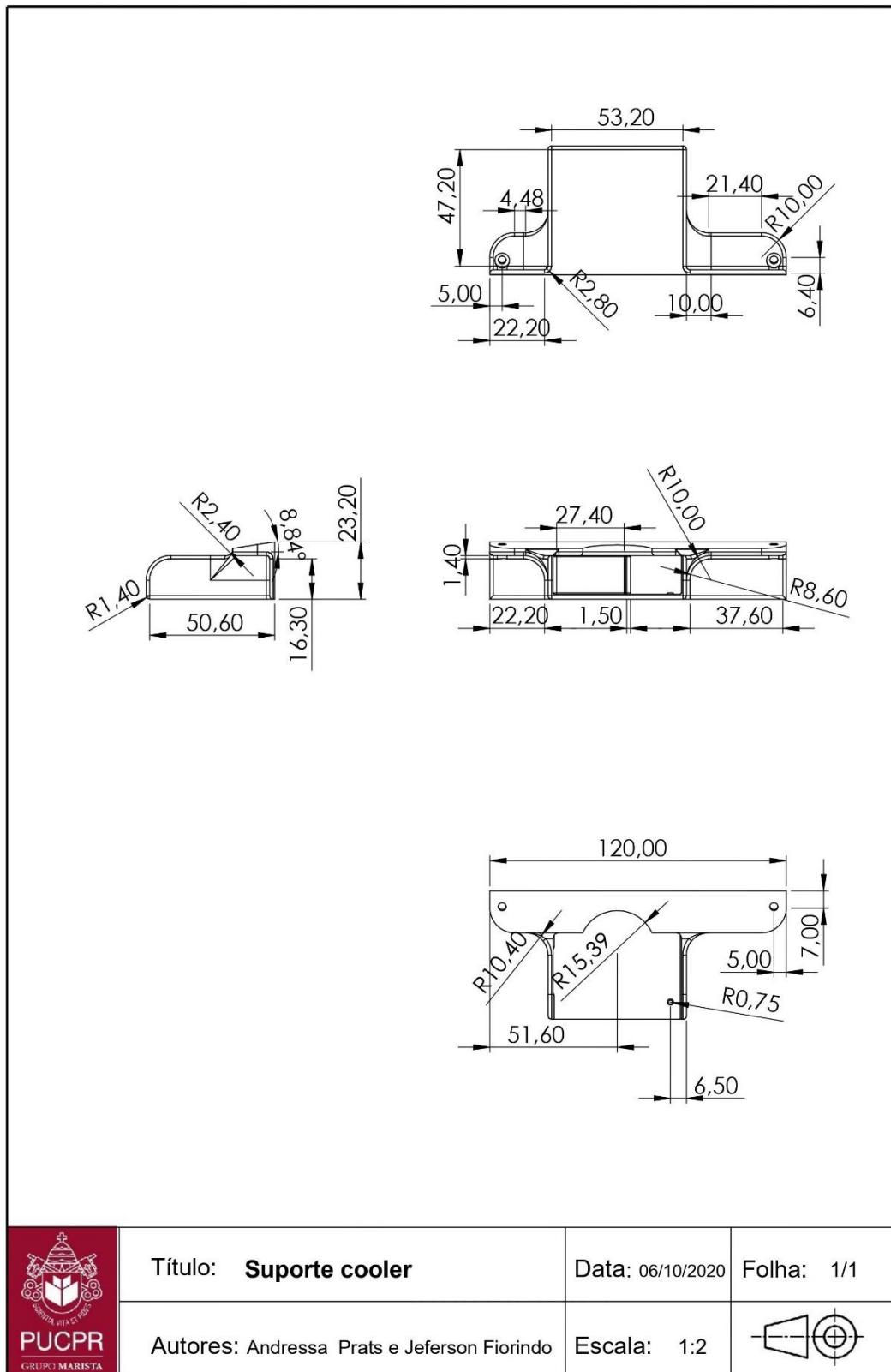
APÊNDICE M – FOLHA DESENHO TÉCNICO DIRECIONADOR CENTRAL DO COOLER



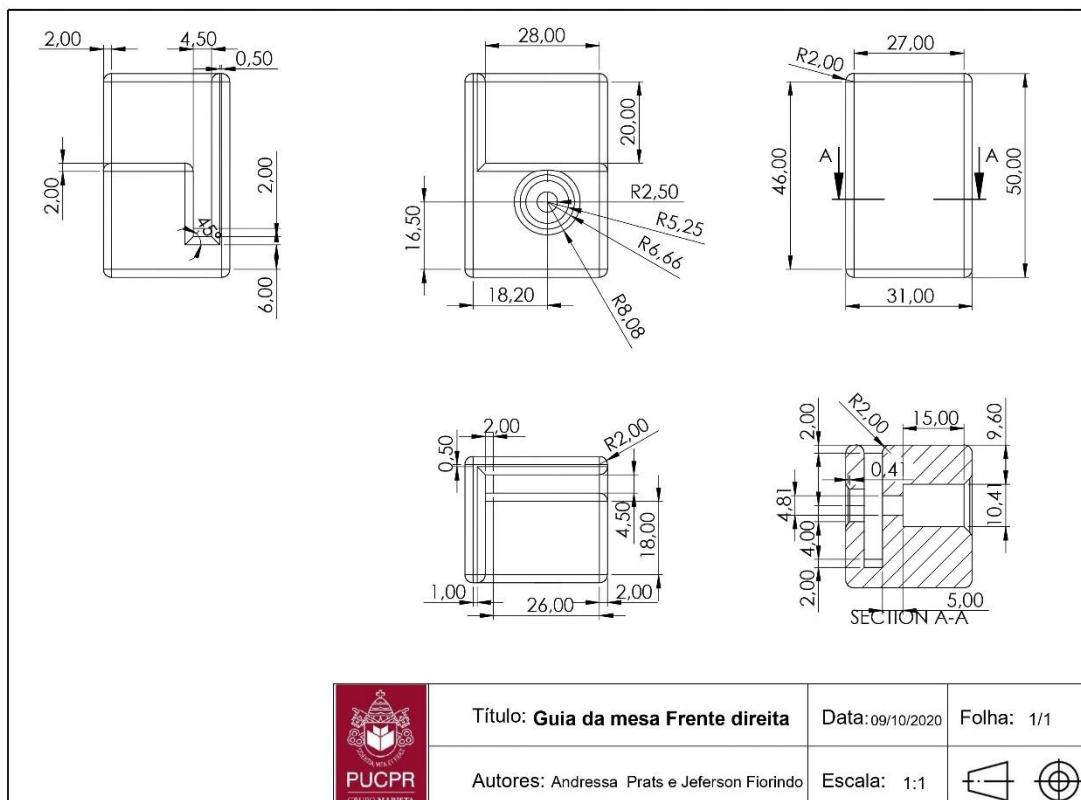
APÊNDICE N – FOLHAS DESENHO TÉCNICO DIRECIONADORES COOLER



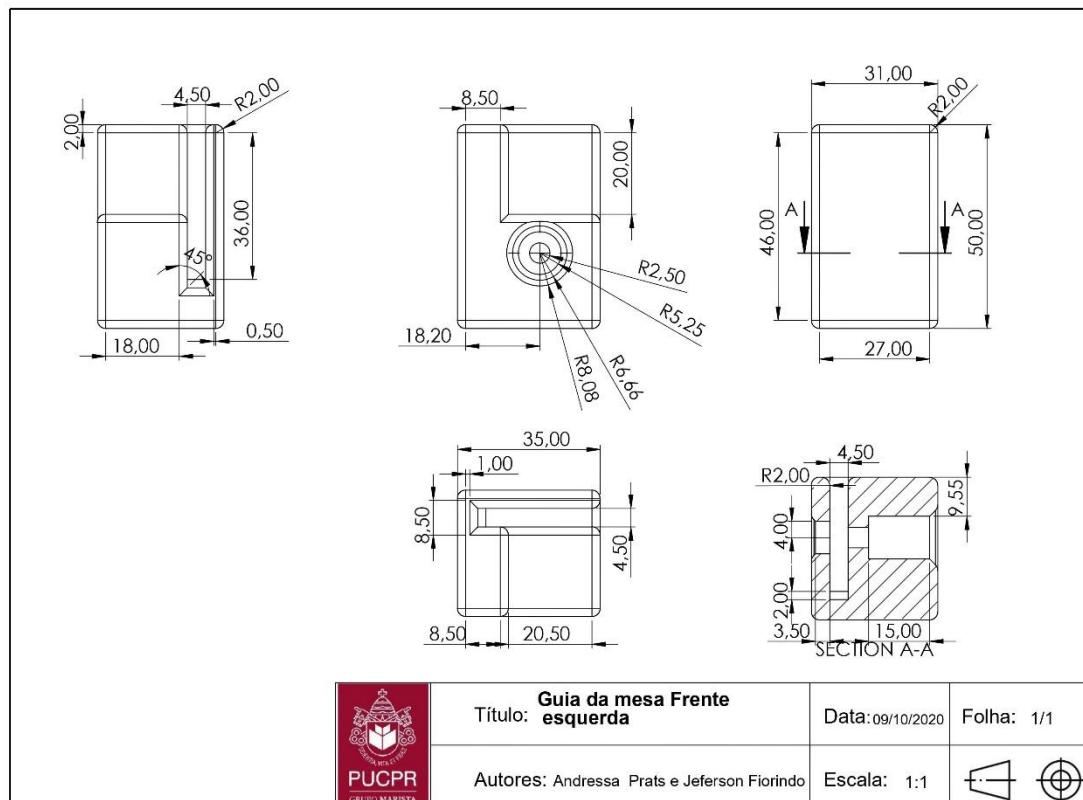
APÊNDICE O – FOLHA DESENHO TÉCNICO SUPORTE COOLER



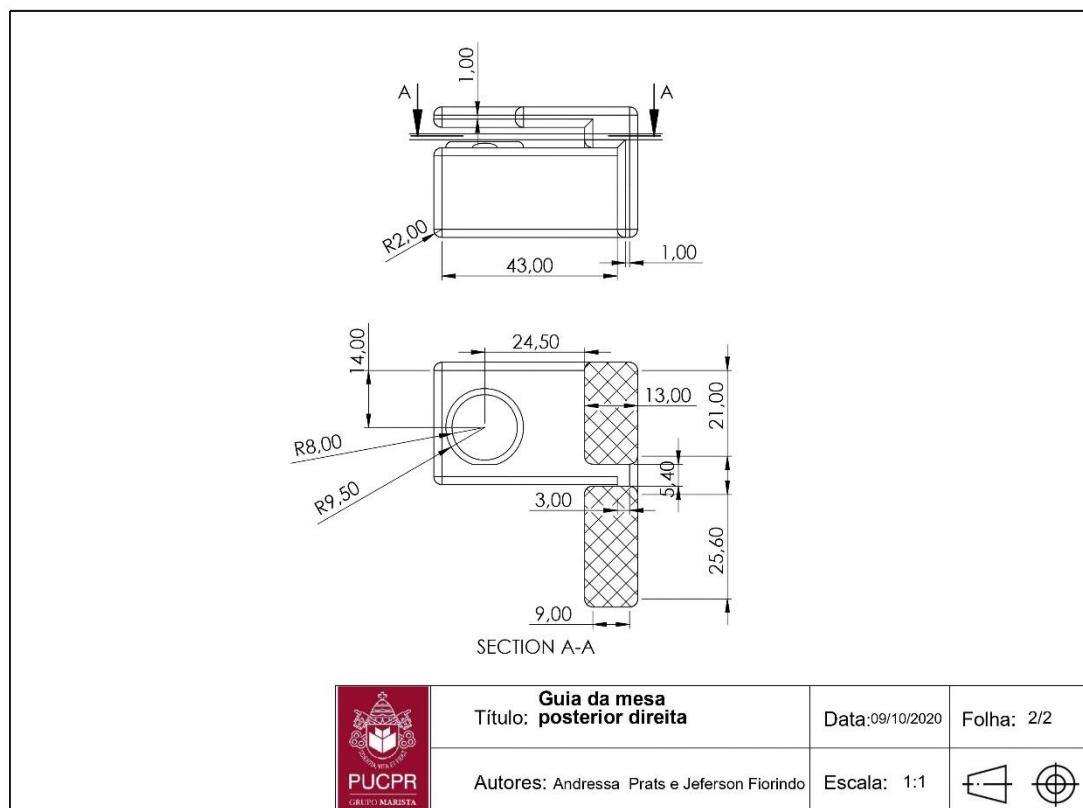
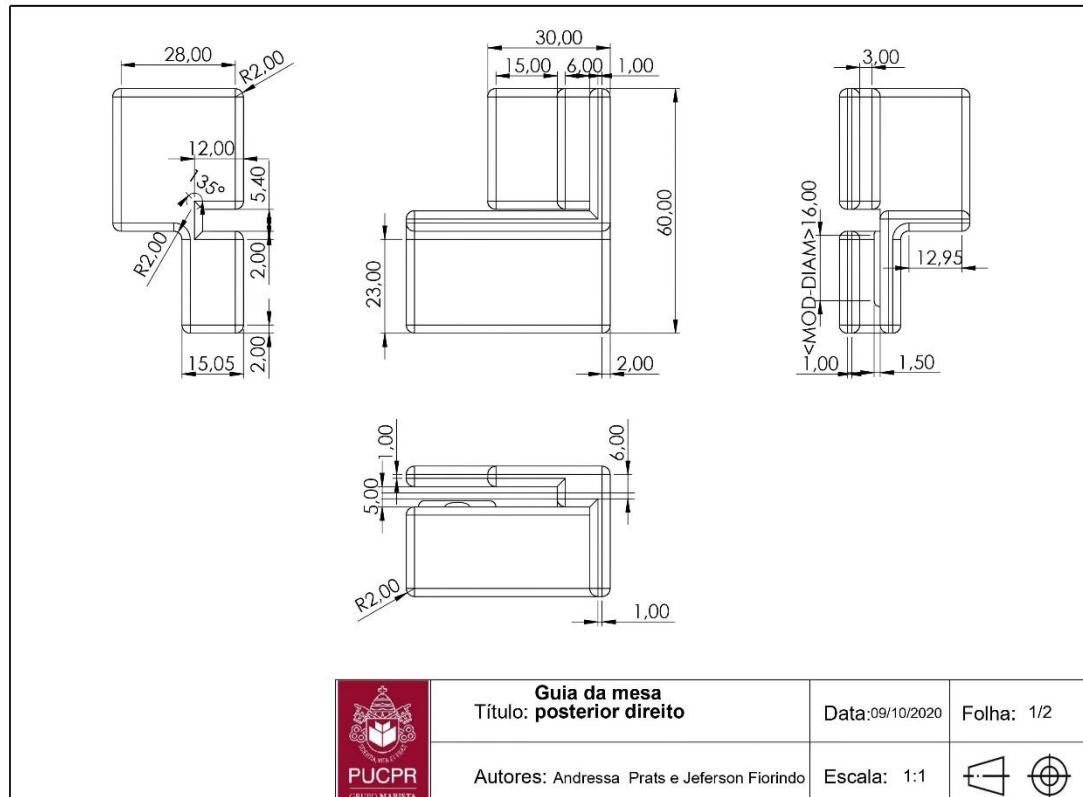
APÊNDICE P – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA FRONTAL DIREITO



APÊNDICE Q – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA FRONTAL ESQUERDO



APÊNDICE R – FOLHAS DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA POSTERIOR DIREITO



APÊNDICE S – FOLHA DESENHO TÉCNICO GUIA DE POSICIONAMENTO DA MESA POSTERIOR ESQUERDO

