



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



SARAH EVEN OLIVEIRA BARBOSA FERNANDES

**Desenvolvimento de uma Extrusora de Filamento PET para
Impressão 3D**

Manaus-AM

2024

SARAH EVEN OLIVEIRA BARBOSA FERNANDES

**Desenvolvimento de uma Extrusora de Filamento PET para
Impressão 3D**

Projeto de pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Almir Kimura Junior

Manaus-AM

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

F363dd Fernandes, Sarah Even Oliveira Barbosa
Desenvolvimento de uma Extrusora de Filamento PET
para Impressão 3D / Sarah Even Oliveira Barbosa
Fernandes. Manaus : [s.n], 2024.
134 f.: color.; 31 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Controle e
Automação; - Universidade do Estado do Amazonas,
Manaus, 2024.

Inclui bibliografia
Orientador: Almir Kimura Júnior

1. Manufatura Aditiva. 2. Filamentos. 3.
Reciclagem. 4. Termoplásticos. 5. Controle de
Temperatura. I. Almir Kimura Júnior (Orient.). II.
Universidade do Estado do Amazonas. III.
Desenvolvimento de uma Extrusora de Filamento PET
para Impressão 3D

Desenvolvimento de uma Extrusora de Filamento PET para Impressão 3D

SARAH EVEN OLIVEIRA BARBOSA FERNANDES

Projeto de pesquisa desenvolvido durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentada à banca avaliadora do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

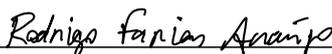
Aprovado por:



Prof. MSc. Moisés Pereira Bastos
Membro (UEA)



Prof. Dr. Israel Mazaira Morales
Membro (UEA)



Prof. Dr. Rodrigo Farias Araujo
Membro (UEA)

Manaus-AM, 27 de Fevereiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pela oportunidades que a vida me proporcionou, por me ajudar nessa longa caminhada e permitir alcançar mais um passo em minha vida.

A minha mãe, Luciane Oliveira Barbosa, por ser a minha base como ser humano, meu principal apoio na minha vida pessoal e acadêmica e uma amiga para toda hora. Nunca teria chegado até aqui se não fosse você!

A todos os amigos e colegas que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho, um agradecimento especial para meus parceiros de trabalho, Vithória Aguiar Alves, Antônio Barbosa, Renan da Silveira e Braynner Queiroz, por estarem sempre dispostos a me ajudar e me dar ótimas ideias.

Aos bolsistas da Ocean, Airton Silva Monteiro e Eduardo Barbosa, pela paciência, pelo apoio nos testes de impressão e a preparação dos vídeos de apresentação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Almir Kimura Junior, pela excelente orientação e confiança depositada em mim para realização deste trabalho. Gostaria de agradecer também por todos os conselhos e apoio para que esta pesquisa fosse concluída.

À Universidade do Estado do Amazonas (UEA), por possibilitar a realização deste curso.

*“Now look around, it’s beautiful.
As far as we can see.
The past has turned to history.
And it’s all happening, finally”*

(Saint Motel, 2021)

RESUMO

O consumo de plástico gera grande preocupação mundial, sendo pauta de discussões sobre seu uso consciente e reaproveitamento. Uma das formas de reduzir a quantidade de plástico descartada e seu impacto no meio ambiente é através da reciclagem. O polímero termoplástico PET (Polietileno tereftalato), comumente modificado com Glicol, pode ser utilizado como matéria-prima de filamentos para impressoras 3D FDM (*Fused Deposition Modeling*). Com o intuito de reduzir resíduos produzidos, este trabalho desenvolveu um sistema de extrusão com controle de temperatura para reciclagem de garrafas PET e criação de filamentos para impressoras 3D. Sua estrutura mecânica foi modelada e impressa por Impressora 3D, dividindo-se em três partes principais: filador, bobinador e carretel de Filamento. Seu esquema elétrico foi projetado para aquecer o bico extrusor até a temperatura de 220°C para a extrusão do PET reciclado e alimentar um motor de passo para movimentar o bobinador para puxar o filamento extrudado, a partir da programação de um Arduino Nano que faz o controle PID do processo. O projeto foi concluído com êxito, alcançando o objetivo de produzir até 18 gramas de filamento a partir de garrafas PET de 2 litros, porém a qualidade do filamento não atendeu totalmente aos padrões para impressão 3D em impressoras FDM devido à variabilidade das garrafas PET. Velocidades de produção mais baixas foram consideradas mais adequadas, mas ainda resultaram em filamentos com formato achatado, devido o arqueamento do filete durante a produção, o que pode afetar a qualidade de impressões 3D. O custo total do projeto foi de aproximadamente R\$ 513,15, contando com os custos de material das peças modeladas e filamentos e impressão das estruturas

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Filamentos, Reciclagem, Termoplásticos, Controle de Temperatura

ABSTRACT

The consumption of plastic raises significant global concern, being the subject of discussions about its conscious use and reuse. One way to reduce the amount of discarded plastic and its environmental impact is through recycling. The thermoplastic polymer PET (Polyethylene terephthalate), commonly modified with Glycol, can be used as raw material for filaments for FDM (Fused Deposition Modeling) 3D printers. With the aim of reducing waste production, this work developed an extrusion system with temperature control for PET bottle recycling and filament creation for 3D printers. Its mechanical structure was modeled and printed by a 3D printer, divided into three main parts: the threader, winder, and filament spool. Its electrical schematic was designed to heat the extruder nozzle to a temperature of 220°C for the extrusion of recycled PET and to feed a stepper motor to move the winder to pull the extruded filament, based on the programming of an Arduino Nano that controls the PID process. The project was successfully completed, achieving the goal of producing up to 18 grams of filament from 2-liter PET bottles.; however, the filament quality did not fully meet the standards for 3D printing in FDM printers due to the variability of PET bottles. Lower production speeds were considered more suitable but still resulted in flattened filaments due to the bending of the filament during production, which may affect the quality of 3D prints. The total cost of the project was approximately \$513.15, including the material costs of the modeled parts and filaments, as well as the printing of the structures.

Keywords: Additive Manufacturing, Filaments, Recycling, Thermoplastics, Temperature Control

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Processos de Manufatura.	24
Figura 2	Técnica de Modelagem - <i>Box modeling</i>	25
Figura 3	<i>Site</i> de Modelos 3D - <i>Thingiverse</i>	26
Figura 4	Digitalização com <i>scanner</i> 3D.	26
Figura 5	Impressão 3D FDM.	29
Figura 6	Bloco Aquecedor.	38
Figura 7	Módulo Driver A4988.	40
Figura 8	Circuito do Módulo Driver A4988.	40
Figura 9	Arduino IDE.	42
Figura 10	Placa Universal Perfurada.	43
Figura 11	Diagrama de malha fechada.	45
Figura 12	Sistema de controle estável/ instável.	46
Figura 13	Fluxograma da Metodologia.	50
Figura 14	Filetador de PET.	51
Figura 15	Bobinador de Filamento.	52
Figura 16	Carretel de Filete.	53
Figura 17	Modelo <i>Petpull</i> - <i>Thingiverse</i>	53
Figura 18	Modelo <i>Pet Bottle Cutter</i> - <i>Cults3D</i>	54
Figura 19	Fatiamento das Peças no <i>Simplify3D</i>	54
Figura 20	Parâmetros de Impressão.	55
Figura 21	Parâmetros de Tempo e Custo.	55
Figura 22	Peças das Estruturas Impressas.	56
Figura 23	Montagem das Estruturas Mecânicas.	56

Figura 24	Diagrama da Montagem Elétrica	57
Figura 25	Bloco Aquecedor utilizado	57
Figura 26	Definição dos componentes Proporcionais e Integrais do controle PID	58
Figura 27	Definição do componente derivativo e valor total de controle PID .	59
Figura 28	Faixa limite de largura de pulso do sinal PWM	59
Figura 29	Controle do sinal PWM - Hot-end	60
Figura 30	Motor com Engrenagem	60
Figura 31	Motor de Passo acoplado ao Bobinador	61
Figura 32	Definição de pinos de direção e passo do motor, botão e potenciô- metro.	62
Figura 33	Definição do intervalo de velocidade através da leitura do potenci- ômetro.	62
Figura 34	Controle de direção de rotação pela leitura de velocidade.	63
Figura 35	Leitura do nível do botão e Inicialização do Motor de Passo.	63
Figura 36	Ventilador.	64
Figura 37	Controle do sinal PWM - Ventilador.	65
Figura 38	Display LCD com Módulo IC2.	65
Figura 39	Inclusão de configuração de biblioteca do display LCD.	65
Figura 40	Configurações iniciais do display LCD.	66
Figura 41	Atualização de valores no display LCD.	66
Figura 42	Amostragem do Display LCD.	67
Figura 43	Fonte de Alimentação.	67
Figura 44	Esquemático de Conexões - Arduino.	68
Figura 45	Esquemático de Conexões - Bloco Aquecedor.	69
Figura 46	Esquemático de conexões - Motor de Passo.	69

Figura 47	Esquemático de conexões - Ventilador.	69
Figura 48	Esquemático de conexões - Potenciômetro, Botão e Display LCD.	70
Figura 49	Esquemático de conexões - Fonte de Alimentação.	70
Figura 50	Circuito Elétrico Físico.	70
Figura 51	Base do Projeto e Estruturas.	72
Figura 52	Estruturas para suporte do bloco aquecedor.	72
Figura 53	Estrutura para guia do fio para o Bobinador.	73
Figura 54	Modificação feitas nas peças Top Spacer.	73
Figura 55	Modelagem do Suporte para o bloco aquecedor.	74
Figura 56	Modelagem do apoio para o bloco aquecedor.	74
Figura 57	Modelagem da guia para o fio extrusado.	74
Figura 58	Filetador Original.	75
Figura 59	Filetador com altura modificada.	76
Figura 60	Modelagem do Filetador modificado.	76
Figura 61	Fatiamento para impressão do novo filetador.	77
Figura 62	Filete cortado manualmente.	77
Figura 63	Filamento com falhas - tamanho e formato indesejáveis.	78
Figura 64	Filamento com inscrições provenientes da garrafa Del Vale.	79
Figura 65	Filamento produzido a partir da garrafa Del Vale.	79
Figura 66	Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Fanta.	80
Figura 67	Filete criado em gramas - garrafa Fanta.	80
Figura 68	Filamento com manchas - garrafa Fanta.	81
Figura 69	Filamento produzido a partir da garrafa Fanta.	81
Figura 70	Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Coca-cola.	82
Figura 71	Filete criado em gramas - garrafa Coca-cola.	82
Figura 72	Filamento com manchas - garrafa Coca-cola.	83

Figura 73	Filamento produzido a partir da garrafa Coca-cola.	83
Figura 74	Filamento com diâmetro menor que o desejado.	84
Figura 75	Filete com tamanho desejado de 5 mm.	84
Figura 76	Bico extrusor com diâmetro de saída de 2 mm.	85
Figura 77	Filamento com tamanho adequado.	85
Figura 78	Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Água. . . .	86
Figura 79	Filete criado - garrafa Água.	86
Figura 80	Filamento produzido a partir da garrafa de água.	87
Figura 81	Diferença de espessura da garrafas.	87
Figura 82	Caneta SCRIB3D para impressões 3D.	90
Figura 83	Processo de Impressão 3D com a <i>3D Printing Pen</i>	90
Figura 84	Impressões feitas com a caneta SCRIB3D.	91
Figura 85	Impressora FDM utilizada nos testes.	91
Figura 86	Teste de impressão - cilindro.	92
Figura 87	Resultado de impressão - cilindro.	92
Figura 88	Parâmetros de impressão - cilindro.	93
Figura 89	Fatiamento - cubo.	93
Figura 90	Parâmetros de impressão - cubo.	94
Figura 91	Resultado de impressão - cubo.	94
Figura 92	Fatiamento - barco <i>Benchy</i>	95
Figura 93	Parâmetros de impressão - barco <i>Benchy</i>	95
Figura 94	Parte impressa do barco <i>Benchy</i>	96
Figura 95	Diferença de diâmetro do filamento produzido.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Modos de Passo.	41
Tabela 2	Resultados dos Testes de Produção de Filamento	89
Tabela 3	Resultados dos Testes de Impressão.	97
Tabela 4	Custo total do Projeto.	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
EBAC	Escola Britânica de Artes Criativas e Tecnologia
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
HDT	Temperatura de distorção ao calor
IDE	<i>(Integrated Development Environment)</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display)</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MDF	<i>Medium-density fiberboard</i>
PC	Polycarbonato
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PE	polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PETG	Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol
PID	Controle Proporcional Integral Derivativo
PLA	Poliácido Láctico
PP	polipropileno
PPR	Pulsos Por Revolução
PTFE	poli(tetraflúor) etileno

PVC	(Policloreto de Vinil
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
STL	<i>STereoLithography</i>
TC	Elemento Controlador
Td	Temperatura de degradação térmica
TE	Elemento sensor
Tg	Transição Vítrea
TI	Elemento Indicador
Tm	Fusão Cristalina
TPU	Poliuretano Termoplástico Fléxivel
TT	Elemento Transmissor
TV	Válvula de Controle
UV	Ultra Violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>C</i>	Celsius
<i>K</i>	Kelvin
cal	Caloria
g	Gramas
mm	Milímetros
<i>A</i>	Ampères
<i>V</i>	Volts
<i>W</i>	Watts
<i>m</i>	metro
<i>c</i>	Calor Específico
<i>k</i>	Conductividade Térmica
$\Delta(T)$	Expansão Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	21
1.1.1	Geral	21
1.1.2	Específicos	21
1.2	Estrutura da Monografia	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Fabricação Digital	22
2.2	Processos de Fabricação	23
2.2.1	Manufatura Aditiva	23
2.2.2	Manufatura Subtrativa	24
2.3	Modelagem 3D	24
2.3.1	Modelagem do zero	25
2.3.2	Utilizando modelos 3D prontos	25
2.3.3	Digitalização de objetos reais	26
2.3.4	Processo de Fatiamento	27
2.4	Impressão 3D	27
2.5	Matérias-Primas de Impressão	29
2.5.1	Poliácido Láctico (PLA)	30
2.5.2	Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)	30
2.5.3	Politereftalato de etileno (PET)	31
2.5.4	Poliuretano Termoplástico Fléxivel (TPU)	32
2.5.5	Policarbonato (PC)	32

2.6	Polímeros	32
2.6.1	Propriedades Térmicas dos Polímeros	34
2.7	Reciclagem de Filamentos	37
2.8	Componentes Eletrônicos	38
2.8.1	Bloco Aquecedor	38
2.8.2	Ventilador	39
2.8.3	Motor de Passo	39
2.8.4	Display LCD	41
2.8.5	Arduino	41
2.8.6	Arduino IDE	42
2.8.7	Placa Universal	42
2.8.8	Alimentação de Sistemas	43
2.9	Controle de Sistemas	44
2.9.1	Malha de Controle	45
2.9.2	Tipos de Controlador	47
2.9.2.1	Controlador Proporcional	47
2.9.2.2	Controlador Integral	47
2.9.2.3	Controlador Derivativo	48
2.9.2.4	Controlador Proporcional Integral	48
2.9.2.5	Controlador Proporcional Derivativo	48
2.9.2.6	Controlador Proporcional Integral Derivativo	49
3	METODOLOGIA	50
3.1	Manufatura da Estrutura Mecânica	51
3.1.1	Filetador (<i>PET Cutter</i>)	51
3.1.2	Bobinador	52

3.1.3	Carretel de Filete	52
3.1.4	Processo de Fatiamento e Impressão	54
3.2	Montagem do Esquema Elétrico	56
3.2.1	Bloco aquecedor	57
3.2.2	Controle PID para Temperatura	58
3.2.3	Controle do Motor de Passo	60
3.2.4	Controle de Velocidade	61
3.2.5	Ventilador	64
3.2.6	Display LCD	65
3.2.7	Fonte de alimentação	67
4	RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
4.1	Esquemático e Layout Físico do circuito elétrico	68
4.2	Montagem final do Projeto.	71
4.3	Realização de Testes	75
4.4	Impressão com Filamento Produzido	89
4.4.1	Impressão com <i>3D Printing Pen</i>	89
4.4.2	Impressão na Impressora 3D FDM	91
5	CONCLUSÕES	99
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	101
	Referências	103
	Apêndice A - Código do Projeto	106
	Apêndice B - Desenhos das Modelagens 3D	111
	Anexo A - Desenhos das Estruturas em STL	118

1 INTRODUÇÃO

Desde seu surgimento no século XIX, o plástico faz parte da vida cotidiana das pessoas, ele está presente em casa, no trabalho, no transporte, na alimentação. Graças a sua versatilidade, leveza, baixa temperatura de trabalho e principalmente seu preço, os polímeros possuem grandes vantagens sobre materiais como os metais e com isso, seu consumo aumentou cada vez mais com o tempo.

Atualmente, o mercado de plástico é colossal, porém, apesar de ser um material amplamente utilizado na sociedade, sua taxa de reaproveitamento ainda é limitada. Estima-se que já foram produzidos no mundo cerca de 9 bilhões de toneladas de plásticos, sendo o Brasil o quarto maior produtor mundial de plástico. Torna-se preocupante que desse montante, cerca de dois terços já foram descartados e somente cerca de 10% foram reciclados ou reutilizados em outras funções. (CONCEIÇÃO *et al.*, 2019)

Graças a sua baixa degradabilidade, os plásticos permanecem na natureza por cerca de 450 a 500 anos, causando tanto poluição visual quanto química no ambiente. Por isso, a redução do impacto dos plásticos e o gerenciamento dos resíduos torna-se imperativa. (XAVIER *et al.*, 2006)

Devido a demandas exigentes das empresas com relação aos custos de produção e resíduos produzidos no meio ambiente, a reciclagem de plástico é crescente no Brasil. Uma dessas demandas é a Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que dispõe diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos que devem ser cumpridas por empresas públicas e privadas. Abrange a gerência de resíduos industriais, de construção civil, agropecuários, de saúde, domiciliares, saneamento público, e até os perigosos. Também apresenta soluções no gerenciamento de resíduos como reciclagem, redução, coleta seletiva, educação sanitária e ambiental e logística reversa. (BRASIL, 2010).

Essas empresas ganham incentivos para o cumprimento dessas soluções e além

de terem reduções de recursos, evitando multas e sanções, otimizam sua imagem no mercado e auxiliam na preservação ambiental. Instituições que promovem a logística reversa encontram cada vez mais mecanismos para a reciclagem de resíduos. Muitas delas conciliando o reaproveitamento de plásticos com a tecnologia da Manufatura aditiva da Impressão 3D. Sendo o PET (Polietileno Tereftalato) considerado o plástico mais utilizado do mundo, sendo comumente empregado na fabricação de garrafas de bebidas, porém também encontrado em fibras, materiais de construção civil devido sua alta resistência mecânica, o PET pode ser reciclado para ser utilizado como matéria-prima de filamentos usados em impressão 3D. (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)

O PET bruto não é utilizado com frequência como matéria-prima de filamentos. Seu derivado modificado com glicol PETG aumenta a performance do material, tornando-o mais claro, durável e flexível. Ambos são boas opções para filamentos como um meio termo entre o PLA e o ABS, com facilidade de impressão, resistência e não produzem fumaça ou odores fortes. (BESKO; BILYK; SIEBEN, 2017)

Há diversos trabalhos desenvolvidos nesse campo para o desenvolvimento de extrusoras para fabricação de filamentos reciclados de vários materiais, focados em obter a maior qualidade desses filamentos e o menor custo a fim de obter nível competitivo e comercial. Neste contexto, este projeto visa a construção de uma extrusora para reciclagem de PET, em especial oriundo de garrafas, para a fabricação de filamentos de impressoras 3D do tipo FDM de forma automatizada com intuito educacional.

Estes filamentos são normalmente produzidos utilizando materiais virgens, porém, considerando que defeitos de fabricação de peças são comuns e após a impressão, a peça é descartada como um bem de consumo, o impacto ecológico desses materiais também pode ser reduzido utilizando materiais reciclados para esse meio. Além de proporcionar uma redução do consumo de matéria prima virgem e economia de energia, o reaproveitamento dos resíduos contribui para a qualidade de vida e o desenvolvimento sustentável. (FERREIRA, 2020)

A obtenção dos filamentos reciclados de baixo custo também auxilia em aplicações dentro de uma universidade, para o fomento de novas pesquisas, oportunidade de aprendizado educacional e aumento do interesse dos alunos em áreas de tecnologia, em especial a manufatura aditiva.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Desenvolver uma extrusora para reciclagem de PET para a fabricação de filamentos de impressoras 3D do tipo FDM.

1.1.2 Específicos

1. Realizar um estudo bibliográfico do tema.
2. Desenvolver o projeto de um equipamento filetador para reciclagem de garrafas PET.
3. Manufaturar o projeto de um equipamento extrusor de filamentos.
4. Construir uma estrutura mecânica de baixo custo e fácil manutenção, capaz de realizar a extrusão do material.
5. Projetar um esquema elétrico que controle a estrutura mecânica.
6. Desenvolver o controle de temperatura para o bico extrusor capaz de fundir o PET em filamento.
7. Programar o controle para funcionamento conjunto do equipamento extrusor e filetador, tornando o processo o mais automatizado possível.
8. Extrudar o filamento com o material reciclado e testar as partes fabricadas em uma impressão 3D.

1.2 Estrutura da Monografia

Este trabalho está organizado conforme os seguintes capítulos. O Capítulo 1 apresenta a Introdução, contendo a contextualização do tema, apresentação do problema e relevância do trabalho. O Capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico utilizado na monografia, reunindo embasamento teórico para a pesquisa. O Capítulo 3 apresenta os Materiais e Métodos empregados para realização do projeto. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na montagem e testes do projeto. Por fim, o Capítulo 5 discorre sobre as considerações finais e conclusão do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fabricação Digital

A inovação tecnológica introduz novas técnicas e métodos de produção não mecânicos, baseados na produção de peças físicas através de modelagem digital em computadores.

Um dos grandes fatores que tornam a fabricação digital, bem como a Prototipagem Rápida, um benefício no processo de produção é a possibilidade de compreensão espacial do modelo, facilitando a produção reproduzindo protótipos de escala reduzida, sendo reconhecida como uma importante etapa para a qualidade do produto final. (BRUSCATO *et al.*, 2013)

A Fabricação Digital utiliza métodos de produção de protótipos a partir de prototipagem rápida e usinagem 3D. Para ambos são desenvolvidos modelos virtuais, desenvolvidos em softwares CAD (*computer-aided design*), que permitem a criação de formas complexas em duas ou três dimensões, possibilitando atribuição de texturas e cores e até encaixes entre peças para montagem e desmontagem de produtos. (BRUSCATO *et al.*, 2013)

Outras ferramentas que também podem ser inseridas em processo de fabricação digital são os sistemas CAE (*Computer-aided engineering*) e sistemas CAM (*Computer-aided manufacturing*). Os sistemas CAE permitem a criação de simulações com o produto para verificar características como resistência a tensões, deformações, condições térmicas, cargas, além de análises estruturais de elementos finitos, dilatação e preenchimento de matrizes. Por outro lado, sistemas CAM permitem a transformação de um modelo virtual para um conjunto de comandos que uma máquina é capaz de compreender e trazer para o mundo físico. (BRUSCATO *et al.*, 2013)

A aquisição dos dados de manufatura, bem como a digitalização de peças em 3D

é possível com o advento do CNC (*Computer numerical control*), um sistema onde um computador assume o controle de uma máquina para realizar um processo de usinagem, através de instruções codificadas na forma de letras e números. Hoje em dia, muitos sistemas tendem a ser controlados pelo CNC, desde máquinas de costura até máquinas de montagem industriais. Essas máquinas auxiliam na otimização do tempo de produção, reduzindo o tempo de trabalho humano. (ORLANDO; FILHO, 2021)

2.2 Processos de Fabricação

Com o avanço da indústria nas últimas décadas, foi inevitável a evolução de novas metodologias aplicadas no processo produtivo a fim de aumentar a qualidade dos produtos, a eficiência de produção e maior economia de materiais. O desenvolvimento do processo produtivo iniciou a utilização de novas tecnologias de manufatura conhecidas como Prototipagem Rápida.

A Prototipagem Rápida envolve a fabricação de produtos ou protótipos através da sucessiva sobreposição de camadas como na Impressão 3D ou por meio de remoção de materiais como na usinagem, como mostrado na Figura 1. Além de acelerar a criação de protótipos, permite o trabalho com materiais mais precisos e com geometrias complexas, possibilitando testes para evitar possíveis falhas e redução de material para confecção das peças.(NISHIMURA *et al.*, 2016)

2.2.1 Manufatura Aditiva

A tecnologia aditiva produz peças através da sobreposição sucessiva das camadas de material a partir da decodificação de um arquivo em 3D e seu fatiamento. Sua grande vantagem é a possibilidade de criação de peças com geometria com os mais diversos níveis de complexidade, com espaços internos detalhados ou negativos, dispensando a necessidade de moldes ou outras ferramentas de fabricação. (GOMES; WILTGEN, 2020)

Existem três tipos principais de tecnologia aditiva: sua criação pode ser baseada em líquidos (resinas), sólidos (filamentos ou lâminas) e pó. As resinas são materiais foto poliméricos, ou seja, as camadas do material são solidificadas a partir do contato de luz UV, o processo FDM se baseia na solidificação do filamento de plástico ou outros polímeros e a solidificação do pó, geralmente gesso, ocorre através de um material

aglutinante, formando assim as camadas que compõem o objeto.(NISHIMURA *et al.*, 2016)

2.2.2 Manufatura Subtrativa

Na tecnologia subtrativa, a peça é construída através da remoção de material a partir de um bloco, que pode ser através de corte, torneamento, fresamento, mandrilhamento, perfuração ou retificação. Possibilita o uso de uma vasta gama de materiais, como madeira, MDF, plástico, alumínio ou acrílico.(NISHIMURA *et al.*, 2016)

Sua vantagem é boa precisão geométrica e acabamento superficial, dependendo da qualidade da máquina e experiência do operador, a produção subtrativa costuma ser mais barata que a produção aditiva em relação ao custo dos insumos.(GOMES; WILTGEN, 2020)

Figura 1: Processos de Manufatura.



Fonte: Adaptado de Gomes e Wiltgen (2020).

2.3 Modelagem 3D

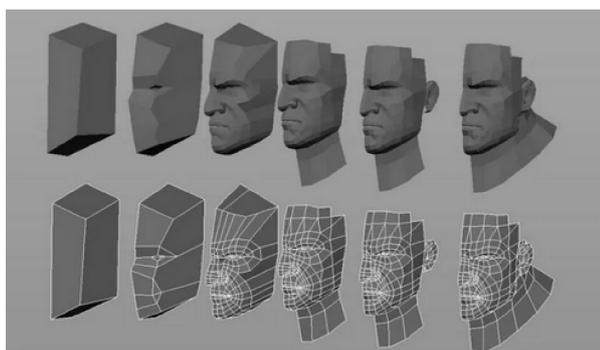
A modelagem 3D é uma tecnologia de representação de modelos tridimensionais, por meio de um espaço virtual que busca simular a realidade, baseado em três eixos, x, y e z. Pode ser desenvolvida de diversas técnicas, podendo ser desenvolvido a partir do zero, obtido por sites dedicados ao compartilhamento de modelos ou a partir de *softwares* de digitalização de objetos reais com uso de câmeras digitais, sensores de movimento e *scanners* dedicados. (SAMPAIO; MARTINS, 2013)

2.3.1 Modelagem do zero

A modelagem do zero exige o uso de um *software* de modelagem 3D. Atualmente, há diversos *softwares* com ferramentas próprias para o projeto de peças 3D, alguns dos mais conhecidos são: *Inventor*, *AutoCAD*, *SolidEdge*, *SolidWorks*, *Blender*, *3Ds Max*, entre outros. Exige certos conhecimentos técnicos sobre as ferramentas e a escolha do *software* deve levar em conta critérios técnicos como compatibilidade de sistema operacional e memória disponível, pessoais como compatibilidade do modelador com o *software* e econômicos, pois a maioria dos *softwares* requerem licença de uso. (AGUIAR, 2016)

As técnicas de modelagem mais comuns são a “*Poly-by-Poly modeling*”, ou técnica dos polígonos, que implica na criação de uma malha, construindo polígono por polígono, definindo a forma do objeto modelado. Outra técnica muito utilizada para peças sem muitos detalhes, geralmente produtos manufaturados em indústrias, é a *Box modeling*, ou modelagem por caixa, que se baseia na criação de objetos a partir de blocos sólidos, como cubos, esferas, entre outros, como pode ser visto na Figura 2. O processo de modelagem se torna mais simples, pois os *softwares* de modelagem possuem ferramentas para a adição ou subtração desses blocos e a peça é construída de forma mais intuitiva. (SAMPAIO; MARTINS, 2013)

Figura 2: Técnica de Modelagem - *Box modeling*.



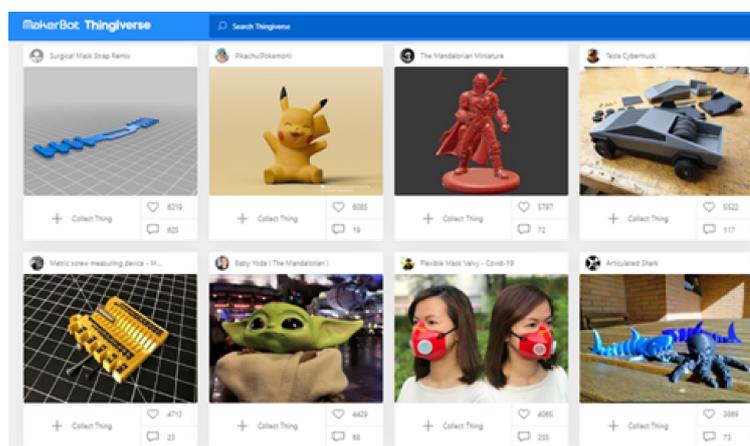
Fonte: EBAC, 2024.

2.3.2 Utilizando modelos 3D prontos

Para quem não tem intimidade com *softwares*, mas deseja utilizar modelos 3D, um grande auxílio são *sites* de modelos prontos a disposição para modeladores disponibilizarem projetos e compartilharem com outras pessoas. Esses *sites* são uma ótima opção

para reduzir o tempo dispendido com as etapas antes da impressão 3D. Alguns dos sites mais conhecidos são o *Thingiverse* (Figura 3), *MyMiniFactory*, *Cults3D*, *GrabCAD*, entre outros (AGUIAR, 2016).

Figura 3: Site de Modelos 3D - *Thingiverse*.



Fonte: Thingiverse, 2024.

2.3.3 Digitalização de objetos reais

Outra maneira simples de obter um modelo 3D é a digitalização de objetos reais desejados a partir de uma câmera digital com sensor ou *scanner*. Um *software* faz a captura de contorno do objeto em 360°, processando as imagens para gerar um modelo 3D. A digitalização 3D proporciona uma modelagem 3D de maneira fácil e fiel ao objeto, principalmente se possuir formas orgânicas como pessoas e animais. Alguns desses *scanners* é o *Sense*, fabricado pela *3D Systems*, que faz a união de imagens capturadas em tempo real, gerando um modelo 3D do objeto, como pode ser visto na Figura 4. (AGUIAR, 2016)

Figura 4: Digitalização com *scanner* 3D.



Fonte: 3D Systems, 2023.

2.3.4 Processo de Fatiamento

Após a obtenção do modelo 3D, até a etapa de impressão, há algumas etapas essenciais para a transformação do objeto virtual em real. O modelo que foi gerado a partir da construção de malha precisa ser transformado em um arquivo STL (*STereo-Lithography*), que contém as informações do objeto.

Essa transformação é necessária para a etapa de “Fatiamento”, uma vez que a Impressão 3D é um processo de manufatura aditiva, as informações do modelo são lidas por um *software* “*slicers*”, que divide o desenho em camadas e gera um código no formato G-Code que a impressora consegue entender e realizar a construção do objeto. (AGUIAR, 2016)

O G-Code é a linguagem de programação das máquinas que utilizam sistemas do tipo CNC tais como Impressoras 3D, Cortadoras a *Laser*, Fresadoras, Tornos, entre outros. O código G tem a função de instruir a máquina através de linhas sequenciais de instruções a se mover nas três dimensões x, y e z com precisão, eficiência e velocidade.

Os *Softwares* “*Slicers*” também possuem outras funcionalidades como corrigir imperfeições das peças, ajusta parâmetros de impressão, cria suportes para partes flutuantes da peça e estruturas anti-derrapante e anti-deformantes, também é possível reposicionar e redimensionar o modelo na mesa de impressão. Alguns *softwares* fatiadores conhecidos são o *Simplify*, *Cura*, *Slicer 3D*, entre outros. Após o processo de fatiamento e seleção de parâmetros, então o arquivo do modelo 3D pode ser exportado para a impressora 3D. (AGUIAR, 2016)

2.4 Impressão 3D

O processo de construção de peças por manufatura aditiva é totalmente computadorizado. Está diretamente relacionado com a manufatura digital, que consiste em simulações, visualização 3D e análises de processos de manufatura computacional.

É necessário um modelo 3D criado em algum *software* de computador (um sistema CAD, por exemplo), geralmente representado por uma malha de triângulos no formato STL. Este será “fatiado”, ou seja, serão obtidas as curvas de nível que definem cada camada a ser depositado o material, considerando estratégias de deposição e estruturas de suporte. Então, a peça é gerada por meio do empilhamento sequencial das camadas,

iniciando da base até o topo, onde dependendo da complexidade e tamanho, o processo pode demorar horas ou dias. E por fim, há o pós-processamento da peça, sendo opcional a remoção de resíduos e limpeza. (PAIVA; NOGUEIRA, 2021)

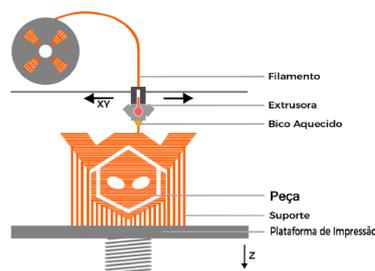
Existem inúmeras tecnologias de deposição de material que atendem a objetivos específicos: a Estereolitografia, método que solidifica resinas líquidas com luz ultravioleta e a Sinterização Seletiva a Laser, que produz objetos 3D a partir da solidificação de materiais granulados como cerâmicas. A mais conhecida de todas é a Modelagem de Deposição Fundida (FDM) que utiliza comumente polímeros como matéria prima de filamentos. (PAIVA; NOGUEIRA, 2021)

Antes da impressão do modelo 3D, há alguns cuidados necessários na preparação da impressora. A base ou plataforma é mantida a uma determinada temperatura para fixação e endurecimento rápido, sobre a mesa de impressão, geralmente espalha-se com um pano uma camada de cola, adesivante ao calor, para garantir a fixação da peça na superfície da impressora. A falta da cola pode gerar problemas de adesão da peça e sua movimentação arruinará todo o processo de impressão. A maioria dos problemas do processo ocorrem logo nas primeiras camadas de impressão, necessitando um acompanhamento inicial, após o funcionamento estável, é possível deixar a impressora sem supervisão. (AGUIAR, 2016)

A impressão ocorre com o aquecimento deste filamento até um estado semilíquido, sob a forma de fio, é depositado através do bico extrusor com uma bobina na base da impressora para a formação das camadas. Dependendo da impressora, a base ou o bico extrusor movimenta-se no plano xy para a construção do modelo e no sentido vertical (eixo z) para a deposição da segunda camada em diante. Este processo é repetido até a construção total da peça. Se necessário, são adicionados suportes para partes “flutuantes” para dar sustentação à peça durante sua produção, como pode ser visto na Figura 5. O material pode ser removido após a peça estar finalizada, dando o tratamento pós-impressão. (ABREU, 2015)

O processo de impressão 3D FDM é mais lento e possui um maior rigor, dado o material utilizado (filamento), já que a peça está sujeita a contrações imprevisíveis e erros de deposição ou fixação da base. Uma vantagem da impressão FDM é a utilização de dois materiais ou mais para a realização da mesma peça, dependendo do nível de compatibilidade, além da realização de várias peças simultâneas. (ABREU, 2015)

Figura 5: Impressão 3D FDM.



Fonte: Wishbox Technologies, 2019.

Graças ao seu enorme potencial na fabricação de peças, a manufatura aditiva tem conquistado cada vez ramos específicos do mercado. No ramo automotivo, ela permite a produção de protótipos 3D com maior rapidez para teste de produtos. Tem grande destaque no ramo da medicina e ortodontia com a produção de próteses biônicas para necessidades de inúmeras pessoas com preços acessíveis. Outros setores como arquitetura, indústria de eletrodomésticos e eletroeletrônicos e fabricação de artigos pessoais também tem implementado essa tecnologia. (PAIVA; NOGUEIRA, 2021)

O principal benefício da manufatura aditiva é a automatização do processo, minimizando a intervenção do operador, mantendo apenas a necessidade da preparação do equipamento, alimentação e parametrização da máquina e retirada e limpeza da peça. Ainda assim, a manufatura possui as vantagens de produção de peças com níveis de qualidade de finalização elevados, com mínima quantidade de resíduos, possibilidade de correção de defeitos ainda em fase de produção e alto nível de produtividade. (ABREU, 2015)

2.5 Matérias-Primas de Impressão

A impressão 3D FDM é uma tecnologia extremamente versátil graças a diversidade de materiais que podem ser utilizados em suas impressões, não havendo grandes limitações, sendo necessário apenas o estudo das propriedades térmicas dos materiais e suas condições de uso. São alguns dos principais materiais utilizados neste método:

2.5.1 Poliacido Láctico (PLA)

Um dos materiais mais utilizados para impressão FDM. É um polímero de característica semicristalina ou amorfa, de origem biodegradável feito pelo processamento de milho, trigo ou cana de açúcar. Bio amigável já que não libera gases tóxicos durante o processo de deposição, não possui odor e seu tempo de degradação varia entre 6 e 24 meses. (ABREU, 2015)

Se funde em temperaturas em torno de 175°C e é depositado em torno de 200°C. Uma das características mais evidentes é a superfície lisa das peças produzidas, com aparência mais brilhante e maior detalhe. Possui propriedades semelhantes aos polímeros comerciais, tendo baixa rigidez, boa processabilidade e estabilidade térmica, porém possui baixa resistência térmica e se distorce em temperaturas elevadas. (FERREIRA, 2020)

2.5.2 Acrilonitrila butadieno estireno (ABS)

O ABS é altamente utilizado em diversas áreas da indústria por suas boas características mecânicas, como resistência, durabilidade, flexibilidade, custo-benefício e ótimo acabamento. Isso se deve ao fato de ser um plástico derivado do petróleo, desenvolvido pela combinação de três monômeros, que dão o nome popular da resina: Acrilonitrila, formado a partir da amoxidação catalítica do hidrocarboneto propileno e amoníaco, confere ótima resistências química e térmica; Butadieno, formado a partir da desidrogenação do butano, confere boa resistência ao impacto e o Estireno, obtido da reação do etileno com o benzeno, confere resistência mecânica, rigidez e moldabilidade. (SANTOS *et al.*, 2018)

Possui uma temperatura de derretimento relativamente alta (entre 230°C a 250°C) com base aquecida entre 80°C a 110°C, sendo não indicado seu uso dependendo da aplicação ou impressora. O ABS também é inflamável quando exposto a altas temperaturas e devido sua derivação do petróleo, libera odores fortes e fumaça quando aquecido. (SANTOS *et al.*, 2018)

2.5.3 Politereftalato de etileno (PET)

O politereftalato de etileno (PET) surgiu pela primeira vez em 1946, criado por dois químicos ingleses, Rex Whinfield e Dickson, a partir de experiências com monômeros a base de trimetileno glicol e do ácido dicarboxílico hexadecametileno. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009)

Começou a ser produzido em formato de fibras na Inglaterra em 1950, porém só foi incluído como matéria-prima de garrafas na década de 70 nos Estados Unidos. O polímero chegou ao Brasil em 1988, inicialmente sendo usado na indústria têxtil. Apenas a partir de 1993 foi liberado o uso do material em embalagens de alimentos e ele começou a ser usado significativamente no mercado, principalmente em embalagens de refrigerantes. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009)

Atualmente, o PET é um dos plásticos mais produzidos no mundo, tendo ao final da década de 90 uma produção mundial de $2,4 \times 10^{10}$ kg. Este sucesso se deve graças as suas propriedades mecânicas, térmicas e custo de produção ideias para diversas aplicações. A que mais se destaca no Brasil é a indústria de embalagens e fibras têxteis. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009)

O PET é um polímero extremamente versátil, sendo utilizado em vários ramos da indústria como alimentos, bebidas, chapas, telhas, etc. É formado por reações de ácido tereftálico e o etileno glicol, composto por suas fases amorfo e cristalino, garantindo boas resistências mecânica e térmica, estabilidade química e facilidade de manuseio. (FERREIRA, 2020)

Devido ao seu fácil processamento, o PET pode ser produzido de várias formas e é facilmente reciclável. Por ser usado em grande escala na fabricação de produtos de uso único e com vida útil curta, preocupa-se com os problemas ambientais causados por seu descarte incorreto e considera-se a reciclagem sistemática uma das melhores formas de resolver este problema. (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009)

Possui uma temperatura de extrusão entre 210°C e 245°C com base de impressora de 70°C. Devido seu fácil processamento e reprocessamento, é facilmente reciclado e fabricado em diversas formas, inclusive como impressões falhas. (SANTOS *et al.*, 2018)

2.5.4 Poliuretano Termoplástico Fléxivel (TPU)

O TPU corresponde a um elastômetro de poliuterano, um copolímero feito de regiões polares não longas que deslizam umas sobre às outras, garantindo a característica principal do material que é a flexibilidade. É um material deformável com alta elasticidade sob pressão a temperatura ambiente. (FERREIRA, 2020)

Além de alta elasticidade, possui também alta resistência mecânica, boa resistência a abrasão, óleos e solventes químicos, possibilitando seu uso como sistemas de freio, solado de calçados, gazetas e vedações que necessitam resistir à degradação. (FERREIRA, 2020)

Possui temperaturas de extrusão por volta de 210°C a 230°C, tem possibilidade de reprocessamento sendo um material reciclável e não-poluente. No entanto, possui um custo maior do que outros plásticos comparáveis, tem maior tempo de impressão e possui um tempo de vida relativamente curto. (FILHO *et al.*, 2019)

2.5.5 Policarbonato (PC)

O policarbonato é um produto da reação entre o bisfenol A (difenilol propano) e ácido carbônico. É um material transparente com boas propriedades mecânicas, térmicas e elétricas, sendo uma alternativa ao ABS, já que suas características são semelhantes. Suas aplicações se resumem ao uso da sua boa resistência a impactos, como: painéis, capacetes, viseiras, janelas, escudos de proteção, para-brisas etc. (ROMANIO; REIS, 2021)

Sua grande desvantagem é a alta temperatura de extrusão e processamento, por volta dos 315°C, sendo inviável para impressoras comerciais. Além disso, a necessidade de altas temperaturas gera problemas de aderência da peça à mesa e probabilidade de fraturas. (FERREIRA, 2020)

2.6 Polímeros

No início do século XX, houve um marco da Química na síntese de produtos. Estruturas conhecidas como colóides, consistiam, na verdade, de macromoléculas que podiam resultar no encadeamento de dezenas de milhares de átomos de carbono. Esses produtos apresentavam repetição de sua estrutura composta de moléculas menores

chamadas monômeros ao longo da cadeia principal, que se unem por meio de ligações covalentes, denominando os Polímeros, do grego *poli*, muitas, e *meros*, partes. (MANO, 1991)

Produtos constituídos pelas macromoléculas são geralmente encontrados na natureza, como a borracha, a madeira, a lã, o DNA, entre outros. No entanto, também há uma variedade de polímeros sintéticos, reproduzidos em laboratório, como o PP (Polipropileno), PE (Polietileno), PET (Polietileno tereftalato), os termofixos, borrachas e fibras. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

Os polímeros podem ser classificados de diversas formas, comumente são diferenciados a partir do seu comportamento mecânico (CALLISTER, 2013):

- Plásticos

São aqueles produzidos a partir do petróleo. Ainda podem ser divididos entre termoplásticos (plásticos que podem ser aquecidos ou resfriados de forma reversível) que apresentam estruturas de arranjos lineares com cadeias flexíveis, termofixos (plásticos que quando aquecidos, fundem resultando em uma estrutura reticulada e infusível) que apresentam ligações cruzadas covalentes entre suas cadeias moleculares e elastômeros (estrutura capaz de se deformar em alto nível e retornar a sua forma original sem fraturas) que são o resultado de ligações covalentes cruzadas com força que permite o retorno da cadeia. (CALLISTER, 2013)

- Fibras

Podem ser produzidas de forma natural, a partir de folhas, frutos ou algodão, ou de forma artificial, a partir da união de dois monômeros diferentes em laboratório. Possuem estrutura filiforme, apresentando elevado comprimento em relação à dimensão transversal. Suas características são a flexibilidade e finura. Apresentam cadeias moleculares longas, podendo ser diferenciadas entre maior ou menor grau de orientação molecular. Esse fator influencia as suas propriedades: maior orientação dos polímeros confere características como pouco alongamento, resistência ao calor e alta resistência a tração, enquanto menor orientação confere maior flexibilidade e confortabilidade. (CALLISTER, 2013)

- Borrachas

São consideradas elastômeros. Da mesma forma, podem ser obtidas de forma natural pela coagulação do látex da seringueira e de forma artificial a partir de derivados do petróleo. Em sua forma natural, é conhecido como poli(isopreno), formado por monômeros de isopreno. A borracha sintética é comumente obtida pela polimerização do acetileno, tornando-a mais resistente a variações térmicas e mecânicas. (CALLISTER, 2013)

2.6.1 Propriedades Térmicas dos Polímeros

A determinação das propriedades de um material é fundamental para a realização de processos, testes e projetos de engenharia com resultados satisfatórios. Se tratando do processo de extrusão de um polímero, ele passa por diversas variações de suas propriedades: É aquecido próximo de sua temperatura de fusão, passa pelo bico extrusor e é resfriado até a temperatura ambiente, tornando-se um polímero termicamente estável. Destacam-se as principais propriedades térmicas dos polímeros (MANO, 1991):

- Calor Específico (c)

Define-se como a quantidade de energia necessária para elevar 1° grau de temperatura do material. Depende principalmente das forças intermoleculares que compõem o material, quanto maior a força de ligação, maior deve ser a energia necessária para romper as ligações e efetuar transformações no material. Outro fator que pode implicar na quantidade de energia necessária são as impurezas presentes no material. Os plásticos, no geral, exigem valores de 0,2 cal/ g°C e 0,5 cal/ g°C devido a mobilidade dos segmentos moleculares, valores altos em comparação aos metais, que apresentam valores abaixo de 0,1 cal/ g°C. (MANO, 1991)

- Condutividade Térmica (k)

Define-se como a quantidade de calor transferido através de uma espessura entre duas superfícies de área, sendo 1°C a diferença de temperatura. Polímeros são conhecidos por serem maus condutores de calor, apresentando valores de condutividade térmica de até 10^{-3} W/m/K, enquanto os dos metais, conhecidos por serem bons condutores, são bem mais altos, começando na faixa dos 100 para cima.

Esses valores dependem de quatro fatores que afetam a taxa de condução do calor: a espessura do material, a área transversal onde transfere o calor, a diferença de temperatura entre os lados do material e a constante de condutividade térmica k . Essa constante é a principal variável que determina a facilidade de transferência de calor entre os materiais, sendo maior para materiais condutores (metais) e menor para materiais isolantes (ar, madeira, borracha). (MANO, 1991)

- Expansão Térmica

Também conhecida como Dilatação Térmica, define-se como as variações de dimensão de um corpo ao ser submetido a variações de temperatura. Acontece graças ao aumento da vibração dos átomos que constituem o corpo quando ocorre o aumento da temperatura, resultando no distanciamento desses átomos e assim, o aumento das dimensões. Quando a temperatura diminui, essas vibrações diminuem e os átomos se acomodam novamente, resultando no retorno das dimensões normais do corpo.

O coeficiente de dilatação térmica dos polímeros é elevado, chegando até $2,3 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$, em comparação a materiais não-poliméricos como os metais. Isso ocorre devido a mobilidade das ligações covalentes dos segmentos macromoleculares que é mais exposta do que das ligações iônicas. (MANO, 1991)

- Fusão cristalina (T_m)

Quando aquecidos, os polímeros se fundem em uma massa irregular com suas cadeias macromoleculares emaranhadas em diferentes graus. Dependendo da velocidade de resfriamento, as cadeias dessa massa assumem determinadas conformações de estrutura ordenada, descontínua e cristalina. Define-se como a temperatura da fusão cristalina, aquela que as regiões ordenadas se desagregam e fundem. Para os termoplásticos, a temperatura de fusão cristalina é inferior a 300°C , para plásticos termorrígidos, não há essa fusão, pois, sofrem carbonização por aquecimento, para outros materiais como os metais, essa temperatura é muito alta.

Existem alguns fatores que podem alterar a temperatura de fusão tais como a presença de grupos rígidos ou polaridade no polímero. É importante conhecer essa característica do polímero antes de aplicá-lo em alguma atividade pois a cristalinidade se altera próximo a temperatura de fusão, logo algumas propriedades como a rigidez, elasticidade e resistência à tração do material podem ser

alteradas. (MANO, 1991)

- Transição Vítreia (T_g)

Trata-se de uma transição de segunda ordem associada à região amorfa dos polímeros semicristalinos. A temperatura de transição vítreia é marcada pela passagem de um estado vítreo do polímero, onde suas cadeias moleculares não possuem mobilidade, para um estado emborrachado, onde as moléculas passam a ter mobilidade.

No geral, a temperatura de transição vítreia dos polímeros não passa de 110 °C, sendo a das borrachas menor do que a temperatura ambiente. Essa característica se reflete diretamente nas propriedades dos polímeros, tais como suas propriedades viscoelásticas, coeficiente de expansividade e capacidade calorífica. (MANO, 1991)

- Temperatura de distorção ao calor (HDT)

Também conhecida como temperatura de Deflexão Térmica, define-se como aquela a partir da qual o escoamento viscoso do polímero fica exposto, ou seja, uma deformação específica de uma tensão pré-estabelecida fica exposta após um período sob aquecimento constante.

É uma medida empírica obtida a partir do ensaio de deflexão térmica, seu resultado é a temperatura de distorção ao calor, determinada com o decréscimo das propriedades mecânicas do polímero.

Geralmente utilizado para caracterizar os termoplásticos como ABS e poliamidas como o *Nylon*, que são produtos amplamente empregados no mercado devido sua rigidez, resistência mecânica e resistência ao calor. (MANO, 1991)

- Temperatura de degradação térmica (T_d)

Se tratando da degradação dos polímeros, suas cadeias moleculares são configuradas pelas ligações covalentes por terem predominantemente átomos de carbono e hidrogênio. Tais ligações possuem mais mobilidade e necessitam de pouca energia para serem rompidas, sendo sensíveis ao aumento de temperatura.

Define-se a temperatura de degradação térmica aquela a partir da qual ocorre a quebra das ligações, acarretando a dissolução da cadeia e o prejuízo de suas propriedades. Os polímeros possuem uma faixa de processamento de 100°C a 200°C e temperatura de uso ainda mais baixas. A resistência das ligações

depende dos grupos químicos presentes na molécula, por exemplo o PTFE (Politetrafluoretileno), que com a presença do átomo flúor em sua estrutura, possui a temperatura de degradação cerca de 100 °C mais elevada do que o PE.(ALMEIDA; SOUZA, 2015)

2.7 Reciclagem de Filamentos

Os termoplásticos possuem a capacidade de moldabilidade em altas temperaturas, tornando-se fluidos e passíveis de reprocessamento por ação isolada ou conjunta de calor e pressão. Devido a estas propriedades, o consumo de polímero cresce no Brasil, assim como sua reutilização. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

O valor de um polímero pós-consumo varia de acordo com suas condições (sujo, limpo, granulado, inteiro) e sua origem (coleta seletiva, sucata, triagem). Os polímeros mais reciclados no Brasil são PET, PVC, PP, PE e PEAD. Porém eles não podem mais ser utilizados em contato com alimentos, bebidas e materiais hospitalares por risco de contaminação e possuem uma vida útil menor do que antes. Suas novas áreas de uso são como fibras têxteis, cordas, embalagens e filamentos para impressoras. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

Para promover a melhora das propriedades mecânicas dos produtos reciclados, são normalmente utilizados aditivos à base de alcóxidos de titanatos ou zirconatos em polímeros como policarbonato, PET e PP. Também podem ser adicionados pequenas concentrações de material virgem dependendo do material processado. O método por extrusão é o mais comumente usado nos processos de obtenção de novos produtos com materiais reciclados, devido a homogeneização prévia para depois processar a injeção e termoformagem. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

A heterogeneidade do material reciclado pode acabar gerando problemas mecânicos no produto acabado, devido os vários tipos de degradação que podem acarretar ao material, como degradação por cisalhamento, oxidação e hidrólise, algumas delas podem acontecer nas etapas do processo (moagem, lavagem, secagem, etc). Por isso, é de suma importância eliminar do material o máximo possível de resíduos e umidade para preservar suas características. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

Se referindo especialmente ao PET, existe um limite de até três ciclos de processamento até o material perder totalmente suas propriedades, se tornando duro e

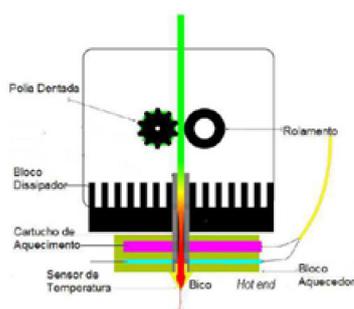
quebradiço e, conseqüentemente, não podendo mais utilizá-lo. (SPINACÉ; PAOLI, 2005)

2.8 Componentes Eletrônicos

2.8.1 Bloco Aquecedor

O bloco aquecedor é parte mais importante no projeto de uma impressora 3D. É o elemento responsável por transmitir calor para o material, derretendo-o para a produção da peça e protegê-la do calor irradiado. Além de dar a capacidade da impressora de imprimir com determinados materiais, será responsável pela resolução da impressora, ou seja, a precisão do fio de material que será depositado na mesa, garantindo a qualidade da peça. (SCHIFLER *et al.*,)

Figura 6: Bloco Aquecedor.



Fonte: (PINTO; MAGALHÃES, 2015)

O bloco aquecedor (ou *hotend*) é composto por três partes principais: bico nozzle, sensor de temperatura e cartucho de aquecimento, como pode ser visto na Figura 6. O bico *nozzle* é a parte final do *hotend*, responsável por determinar a resolução da impressora no plano XY. Seu diâmetro afeta diretamente na qualidade da peça e na capacidade da impressora de utilizar certo material, definindo as limitações de velocidade e pressão. Geralmente feito de latão que permite seu aquecimento rápido (de 1 a 3 minutos), garantindo alto desempenho em impressoras 3D. (FERREIRA; MINCHIO, 2022)

O cartucho aquecedor fica inserido no bloco aquecedor, consiste em uma alta resistência, que quando uma corrente passa por ela, transmite calor para o bloco aquecedor a uma temperatura máxima de aproximadamente 300°C. (FERREIRA; MINCHIO, 2022)

O termistor é um resistor variável com altas temperaturas. Responsável por medir a temperatura do bloco aquecedor, opera numa faixa de -50°C a 320°C com alta precisão e em projetos de impressora 3D, mede a temperatura da mesa aquecida também. O modelo do termistor possui um conector do tipo Dupont utilizado em placas Ramps de Impressoras 3D. (FERREIRA; MINCHIO, 2022)

2.8.2 Ventilador

Em um sistema de impressão em FDM, um sistema de resfriamento a ar ou *cooler* atrelado à extrusora é essencial no processo de extrusão para esfriar tanto o conjunto de bloco aquecedor quanto a peça para garantir que as camadas se depositem da maneira certa, uma vez que haja falta de ventilação podem ocorrer problemas de entupimento do bico graças a dilatação do filamento dentro do sistema. (CARDOSO *et al.*, 2020)

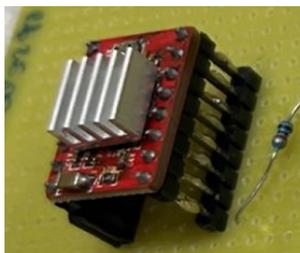
A utilização desse cooler não é recomendada para todos os materiais. Plásticos como ABS e TPU devem ser utilizados com o cooler desligado devido aos problemas ocasionados pelo mesmo, que são o empenamento ou a fraca adesão entre camadas. (BAUM, 2021)

2.8.3 Motor de Passo

O motor de Passo é um motor do tipo bipolar, possui duas fases com um rolamento por fase, ou seja, permite que o circuito energize o motor em dois sentidos da corrente. Por isso, possui mais torque e uma precisão maior. (ANDRADE *et al.*,)

O motor de passo é altamente indicado para projetos de impressoras 3D, fresadoras ou automação em geral, os quais comumente utilizam o módulo *driver* A4988, podendo ser visualizado na Figura 7. Ele controla as bobinas do motor de passo que forma mais rápida, acionando-as sequencialmente permitindo o giro do motor. Cada pulso enviado faz o avanço de um passo na porta STEP. O sentido de rotação é controlado pela polarização das bobinas na porta DIR. A velocidade é determinada pela frequência de pulsos no circuito. (ANDRADE *et al.*,)

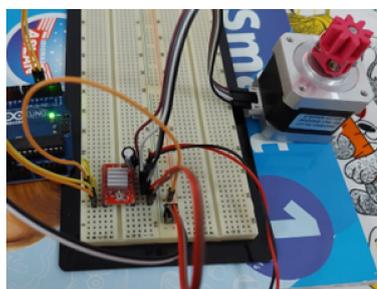
Figura 7: Módulo Driver A4988.



Fonte: Autor, 2023.

Deve ser utilizado um capacitor em paralelo na entrada de alimentação do módulo para armazenar uma carga de arranque do motor, ou seja, quando o botão é acionado, a carga de partida é somada com a carga armazenada no capacitor para o motor acionar de forma mais rápida, como mostrado na Figura ???. Ele também possui um potenciômetro de ajuste de corrente máxima. Se a corrente ultrapassar o limite, o chip será desativado para proteção dos circuitos.

Figura 8: Circuito do Módulo Driver A4988.



Fonte: Autor, 2023

Uma volta completa possui 360° graus, sendo equivalente a uma revolução. Comumente, os motores giram 1,8 graus por passo. Calcula-se um parâmetro PPR (Passos Por Revolução) para esses motores:

$$PPR = 360/1,8 = 200 \text{ passos}$$

Um motor no modo passo completo possui o menor número PPR, porém produz o maior torque, devido ao aumento de corrente usada. (NICOLAI *et al.*, 2022)

O módulo *driver* A4988 possui portas de controle de velocidade MS1, MS2 e MS3, as variações dos níveis lógicos mudam o modo de sequência dos passos do motor, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Modos de Passo.

Resolução Micro-Passo	MS3	MS2	MS1
Passo Completo	0	0	0
Meio Passo	0	0	1
1/4 Passo	0	1	0
1/8 Passo	0	1	1
1/16 Passo	1	1	1

Fonte: Adaptado de (NICOLAI *et al.*, 2022)

2.8.4 Display LCD

Os módulos de *Display* LCD de caracteres alfanuméricos são dispositivos de comunicação visual criados a partir da tecnologia desenvolvida com o uso de cristal líquido (*Liquid Crystal Display*) para apresentar informações através de uma interface gráfica provenientes de um circuito. Podem ser encontrados em quase todos os aparelhos eletroeletrônicos, automóveis, instrumentos de medição etc. (PUHLMANN, 2015)

O módulo LCD I2C é ideal para ser utilizado em projetos envolvendo LCDs, para fazer a comunicação do display alfanumérico com o microcontrolador. Desta forma, são reduzidas as ligações no protótipo e economizadas várias portas do Arduino, utilizando apenas quatro pinos, VCC e GND de alimentação, o pino de Clock (SCL) e o pino de data (SDA). (MÉDIO *et al.*,)

2.8.5 Arduino

A plataforma Arduino é uma placa de prototipagem integrada pelo microcontrolador ATmega328, muito utilizada em projetos de impressoras 3D *open source*, graças a sua facilidade de elaboração de soluções e grande documentação. Seu modelo Arduino nano é o menor da série e compatível com outras desta, sendo ideal para conexão direta no protoboard e placas de circuito impresso. (PINTO; MAGALHÃES, 2015)

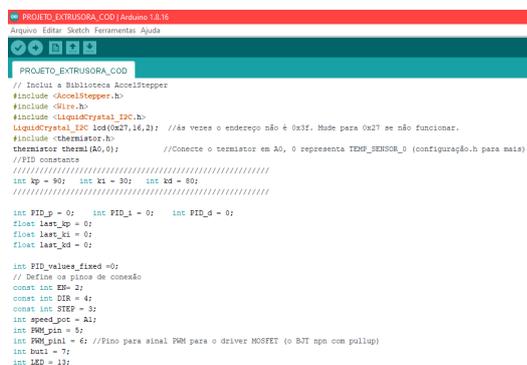
O Arduino Nano 3.0 possui 14 pinos de entrada/saída, dos quais 6 oferecem saída PWM (*Pulse Width Modulation*), possui 8 pinos de entrada analógica, 2 pinos de comunicação UART TTL. Sua voltagem de operação é de 5 volts, aceita uma tensão de

entrada de 6 a 20 V. Possui as mesmas funcionalidades do Arduino Uno com uma configuração compacta. (NANO, 2018)

2.8.6 Arduino IDE

O Arduino IDE (Integrated Development Environment) é o ambiente de desenvolvimento utilizado para a programação de todas as placas da categoria Arduino, sendo assim, um software gratuito próprio da Arduino que permite o desenvolvimento e gravação de códigos no microcontrolador da placa integrada, através de linguagem C/C++, como mostrado na Figura 9. (ISMAILOV; JO‘RAYEV *et al.*, 2022)

Figura 9: Arduino IDE.



```

PROJETO_EXTRUSORA.COD | Arduino 1.8.16
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

PROJETO_EXTRUSORA.COD
// Inclui a biblioteca AccelStepper
#include <AccelStepper.h>
#include <drv.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //às vezes o endereço não é 0x27, se não funcionar.
#include <thermist.h> //Conecte o termistor em A0, 0 representa TEMP_SENSOR_0 (configuração.h para mais)
thermistor therm1(A0,0);
//PID constants
////////////////////////////////////
int kp = 90; int ki = 30; int kd = 80;
////////////////////////////////////

int PID_p = 0; int PID_i = 0; int PID_d = 0;
float last_kp = 0;
float last_ki = 0;
float last_kd = 0;

int PID_value_fixed = 0;
// Define os pinos de conexão
const int EE = 2;
const int DIR = 4;
const int STEP = 3;
int speed_pot = A1;
int PWM_pin = 5;
int PWM_signal = 6; //Pino para sinal PWM para o driver MOSFET (o BJT nqm com pullup)
int but1 = 7;
int LED = 13;

```

Fonte: Autor, 2024

O espaço de desenvolvimento reúne diversas funcionalidades que permitem a escrita e análise do código na placa, tais com bibliotecas prontas para controlar componentes como sensores, motores, LEDs etc., gerenciador de placas, ferramentas de depuração, compilador e monitor serial. Outras versões também incluem outros recursos como Debugger, recurso que permite o teste e depuração de programas em tempo real. (ISMAILOV; JO‘RAYEV *et al.*, 2022)

2.8.7 Placa Universal

A parte mais importante no desenvolvimento de um projeto eletroeletrônico é a confecção do circuito montado no protoboard em uma placa. Conhecidas como PCB, as placas de circuito impresso podem ser feitas através de diversos programas disponíveis, que incluem um grande inventário de componentes com placas e módulos de Arduino.

Uma vez montado o circuito, é possível fazer a conversão das ligações entre os componentes para a confecção das camadas de materiais condutores que ficarão responsáveis pela condução elétrica.

A confecção dos “caminhos” é baseada na retirada de material da placa para gerar ilhas isolantes onde os componentes se comunicam entre si. A retirada do material pode ser feita a partir da corrosão com o uso de produtos químicos como o perclorato ou com uma máquina CNC adequada, porém sem conhecimentos prévios sobre esses processos e sem os materiais disponíveis, o processo pode se tornar demorado e dificultoso. (SANTOS *et al.*, 2020)

Logo, em casos de circuitos mais simples, uma ótima opção é o uso de placas universais perfuradas de fenolite. Elas contam com material indutor em somente um dos lados e previamente perfurada, facilitando a confecção do circuito e necessitando somente a soldagem dos componentes nas devidas conexões, como pode ser visualizado na Figura 10. (SANTOS *et al.*, 2020)

Figura 10: Placa Universal Perfurada.



Fonte: Autor, 2023

2.8.8 Alimentação de Sistemas

O sistema de alimentação pode ser definido como a junção de componentes para transformar, distribuir, gerenciar e proteger a alimentação de uma máquina. A fonte de alimentação é o principal equipamento, sendo a parte responsável pela transformação, distribuição e gerenciamento da energia. Possui a função de transformar e reduzir a energia elétrica monofásica e/ou trifásica (tensão/corrente elétrica Alternada) para o padrão que atende à segurança na operação de máquinas e equipamentos (tensão/corrente elétrica Contínua). (HART, 2016)

A norma de segurança do trabalho em máquinas e equipamentos NR-12 aponta que “Os componentes de partida, parada, acionamento e controles devem operar em extrabaixa tensão de até 25VCA (vinte e cinco volts em corrente alternada) ou de até

60VCC (sessenta volts em corrente contínua)”. Atualmente, as fontes de alimentação do mercado comumente possuem saída de 24VCC, facilitando a padronização de diversos equipamentos que trabalham nessa faixa. (HART, 2016)

2.9 Controle de Sistemas

O controle de processo se baseia na análise e monitoramento das variáveis do processo, padronizando seus comportamentos para o funcionamento desejado, eficiente e ágil. Envolve a constante mensuração de resultados, acompanhamento da execução de tarefas e implementação de ajustes quando necessário. (RIBEIRO, 2005)

O controle de temperatura é um bom exemplo de controle de processo. Um sensor converte a variável de processo em um sinal eletrônico e enviado para um transmissor, que o condiciona e o converte em um sinal padrão de corrente. Este é enviado para um controlador, registrador ou indicador que gera um sinal de comando para um atuador eletrônico, geralmente um aquecedor ou motor de bomba. Em uma malha de controle de temperatura, os principais básicos funcionais são: TE, TT, TC, TV e TI.

A variável do processo é qualquer quantidade física que possui o valor alterável com o tempo e com o espaço. Pode ser considerada, dentro de determinada tolerância e intervalo de tempo, como constante. Algumas das variáveis envolvidas na malha de controle são:

- Variável Controlada

É aquela que deseja se manter constante, mesmo com a influência de outras. Em uma malha de temperatura, a temperatura é a variável controlada.

- Variável Medida

É qualquer variável que possa produzir um movimento, uma força mecânica ou variação de grandeza elétrica, que pode ser medida por sensores. A medição de temperatura através do termopar mede diretamente uma tensão elétrica.

- Variável Manipulada

É aquela que é monitorada pelo controlador para influir no valor da variável controlada. Ela determina o tipo de elemento final de controle como uma válvula com atuador na maioria dos processos. Por exemplo, o controle de temperatura

(variável controlada) pode ser realizado através da atuação na vazão (variável manipulada) de vapor.

- Distúrbio

São aquelas variáveis que afetam o desempenho do processo. Seu controle direto é muito difícil, deve-se aprender a ajustar o sistema para compensar sua influência. Podem ser distúrbios: condições de operação, condições ambientais, o desgaste de equipamentos, fenômenos internos ao processo, entre outros. (RIBEIRO, 2005)

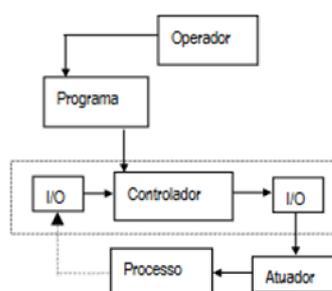
2.9.1 Malha de Controle

Um processo automático é realizado através da malha de controle. Ela é uma série de instrumentos, interligados entre si, para controle das variáveis independentes, produzindo um resultado útil e desejado. Sob o ponto de vista de configuração, pode ser classificada em dois tipos: Malha aberta e Malha Fechada. (RIBEIRO, 2005)

A malha aberta possui um princípio e um fim diferentes entre si, ou seja, não há retorno de registro de sinais. O controle manual é um exemplo de malha aberta, onde um operador de controle deve gerar manualmente o sinal que atua diretamente em uma válvula de controle. (RIBEIRO, 2005)

A malha fechada é percorrida continuamente, saindo-se e chegando ao mesmo ponto, constituindo um processo fechado. Nela, há instrumentos colocados na entrada e saída interligados entre si, retornando o valor de saída para comparação, como mostrado na Figura 11. O controle automático é um exemplo de malha fechada, durante a operação se faz medição, comparação e correção automaticamente. (RIBEIRO, 2005)

Figura 11: Diagrama de malha fechada.

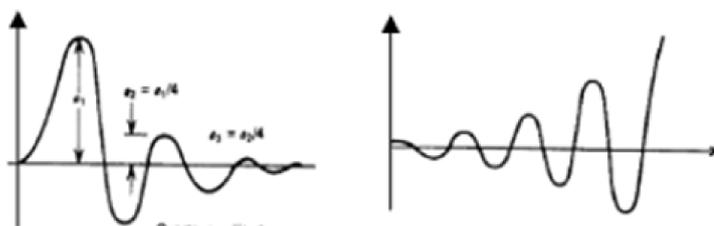


Fonte: (RIBEIRO, 2005)

A realimentação pode ser positiva (*feedforward*) ou negativa (*feedback*). A realimentação é positiva quando deseja-se aumentar o desvio entre a medição e o ponto de referência, neste caso, o sistema vai para um dos extremos, mínimo ou máximo. A realimentação é negativa quando se deseja estabilizar o processo, diminuindo o ganho e otimizando seu funcionamento.

A finalidade de um sistema de controle é sempre produzir um processo estável, com uma resposta desejada aos distúrbios do processo. O sistema é estável, se para qualquer entrada limitada, a saída também é limitada. O sistema é instável quando os distúrbios geram uma resposta indefinida e provocam oscilações que podem crescer continuamente, como mostrado na Figura 12. (RIBEIRO, 2005)

Figura 12: Sistema de controle estável/ instável.



Fonte: (RIBEIRO, 2005)

Há vários critérios de estabilidade para sistemas lineares de controle, como o método de *Nyquist*, o critério de *Routh Hurwitz* que analisam a resposta do sistema através das raízes e polos da função de transferência. Quando se trabalha com os elementos do processo, é necessário possuir uma equação simples e concisa que descreva o desempenho dos elementos: A função de transferência.

A função de transferência é a relação entre sua saída e sua entrada, no domínio da frequência. Na prática, ela fornece as informações acerca da estabilidade, da resposta transitória e das características de frequência do processo. (RIBEIRO, 2005)

O principal componente da malha de controle é o controlador. Ele detecta os erros infinitesimais entre o valor da variável de processo e o ponto de ajuste desejado, os compara e gera automaticamente um sinal de saída para o atuador. O controlador deve estar ligado diretamente ao processo, quando possui um elemento sensor determinado pela variável medida. (ARAÚJO, 2007)

2.9.2 Tipos de Controlador

A escolha de ação do controlador depende da ação do atuador de controle e a lógica de processo. As dificuldades encontradas no processo variam muito e por isso existem diversos tipos de controladores com diferentes modos de controle. (ARAÚJO, 2007)

2.9.2.1 Controlador Proporcional

Neste tipo de controle, o sinal de controle aplicado a cada instante à planta é proporcional à amplitude do valor do sinal de erro. Segue a seguinte fórmula, onde a ação corretiva ou sinal de controle é igual ao ganho proporcional do controle multiplicado pelo erro ou diferença entre o *setpoint* e o valor medido.

$$u(t) = u_0 + K_c e(t), \quad (2.1)$$

Atua no regime transitório e regime permanente do sistema, ou seja, tem efeito quando o sistema sai do ponto de partida e vai até o valor desejado (transitório) e quando o sistema apresenta pouca ou nenhuma variação (permanente). Porém o controle P não garante erro 0 no regime permanente, ou seja, se houver um distúrbio, o controlador P não é capaz de levar o erro a 0. (ARAÚJO, 2007)

2.9.2.2 Controlador Integral

Neste tipo de controle, a ação integral corresponde o sinal de correção depende da integral do desvio, seu efeito corresponde a um somatório do valor do desvio de forma a eliminar o erro acumulado. Segue a seguinte fórmula, onde a ação corretiva é igual erro acumulado multiplicado pelo ganho integral do controle, sendo o erro acumulado a sua soma inicialmente nula com o desvio.

$$u(t) = \frac{K_c}{T_i} \int e(t) dt, \quad (2.2)$$

Atua principalmente do regime permanente, pois o erro vai sendo acumulado infinitamente. É capaz de levar o erro a zero caso o sistema apresente algum distúrbio, porém o sistema fica mais lento e oscilatório, pois o erro pode demorar a acumular ou

desacumular, gerando atraso na resposta do sistema. (ARAÚJO, 2007)

2.9.2.3 Controlador Derivativo

Neste tipo de controle, a ação de controle atua na variável controlada a partir da variação do erro, ou seja, ele considera a diferença entre o erro atual e o erro anterior. Segue a seguinte fórmula, onde a ação corretiva é igual a diferença de erro atual e o erro anterior multiplicado pelo ganho derivativo.

$$u(t) = K_c \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (2.3)$$

A ação derivativa só responde ao regime transiente, então nunca é utilizada sozinha, resultando em um controlador altamente sensível. Aumentando seu ganho deixa a resposta do sistema mais rápida, porém um aumento excessivo pode deixar o sistema oscilatório. (ARAÚJO, 2007)

2.9.2.4 Controlador Proporcional Integral

O controlador PI combina os controladores P e I em um só. A atuação de um controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral. Desta forma, pode-se melhorar a resposta transitória com a contribuição da ação proporcional, enquanto a integral corrige o erro de estado estacionário. Segue a seguinte fórmula, onde a ação corretiva é igual ao desvio multiplicado pelo ganho proporcional somado ao erro acumulado multiplicado pelo ganho integral. (ARAÚJO, 2007)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right); U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s), \quad (2.4)$$

2.9.2.5 Controlador Proporcional Derivativo

O controlador PD combina os controladores P e D em um só. Embora o controlador puramente derivativo não seja implementável na prática, quando associado a ação proporcional, corresponde ao acréscimo de um zero ao sistema, beneficiando no regime transitório, tendendo a aumentar a estabilidade relativa do sistema e reduzindo

o tempo de acomodação, porém aumentando o tempo de subida e não sendo capaz de corrigir o erro de estado estacionário. Segue a seguinte formula, onde a ação corretiva é igual ao erro atual multiplicado pelo ganho proporcional somado a diferença do erro atual e o erro anterior multiplicado pelo ganho derivativo. (ARAÚJO, 2007)

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right); U(s) = (K_p + K_d s) E(s), \quad (2.5)$$

2.9.2.6 Controlador Proporcional Integral Derivativo

O controle PID elimina o erro de regime a partir da estabilização do processo por meio de derivações e integrações do sinal de entrada em comparação com a referência, conseguindo uma estabilização do processo e retorno rápido ao equilíbrio. O PID gera a saída proporcional ao erro, proporcional à integral do erro e proporcional à derivada do erro. (JUNIOR *et al.*, 2019)

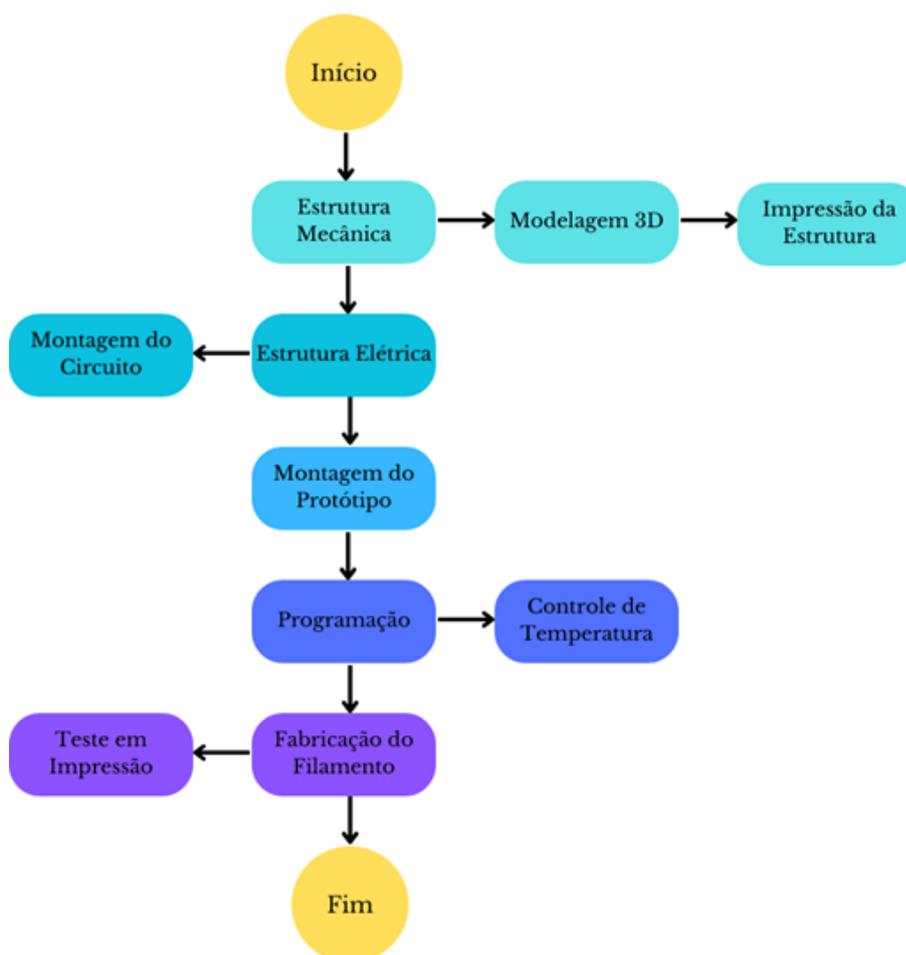
$$u(t) = K_p \left(e(t) + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right); U(s) = (K_p + K_d s) E(s), \quad (2.6)$$

Junta as melhores características de cada tipo de controle, atua efetivamente no regime transitório e no regime permanente. Pode melhorar a estabilidade do sistema, tendo uma resposta rápida do sistema com aumento cauteloso dos ganhos derivativo e integral. (ARAÚJO, 2007)

3 METODOLOGIA

Com base nos objetivos - Manufaturar um equipamento extrusor de filamentos com uma estrutura mecânica capaz de realizar a extrusão do material; Projetar um esquema elétrico e Desenvolver o controle de temperatura para a estrutura; Extrudar o filamento com o PET reciclado e testá-lo em uma impressão 3D, o progresso do projeto foi dividido em etapas de acordo com o fluxograma da Figura 13, definidas a partir do desenvolvimento da construção.

Figura 13: Fluxograma da Metodologia.



Fonte: Autor, 2023.

3.1 Manufatura da Estrutura Mecânica

A estrutura do projeto será composta por três partes principais para o funcionamento do sistema: Filetador, Carretel de Filete e Bobinador.

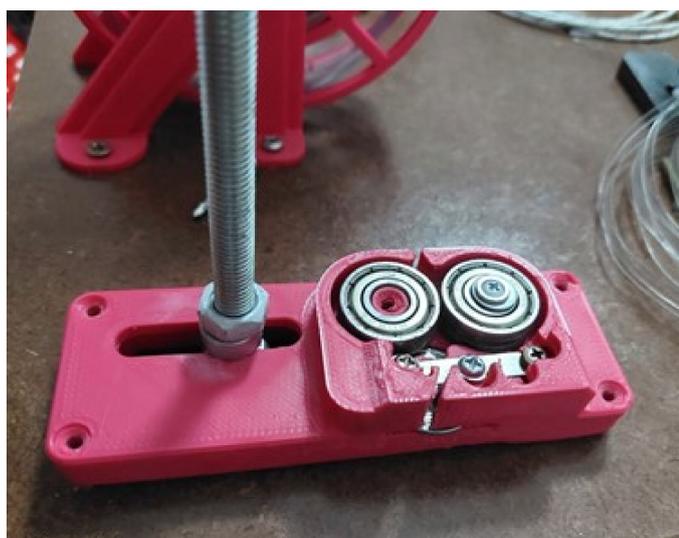
3.1.1 Filetador (*PET Cutter*)

O projeto requer que as garrafas sejam cortadas em finas tiras de PET para a criação do filamento, por isso necessita da construção de uma estrutura para fatiar as garrafas PET recicladas em filetes.

A estrutura corta as garrafas de PET em tiras, mantendo o tamanho com máximo de 6 mm para inserção no bico extrusor de forma que o filamento se mantenha em um tamanho contínuo para impressão. Ela conta com 120 mm de comprimento, 42 mm de largura e 22 mm de altura total, como mostrado na Figura 14.

Possui um espaço para inclusão de um suporte de haste para barra roscada M8 para a garrafa se manter fixada enquanto for cortada e um sistema de rolamento para puxar o filete a ser cortado por uma lâmina de apontador ou estilete. A fim de evitar que o filete de PET desgaste a parte interna da peça, foi adicionado uma base em aço para não aumentar o tamanho do filete, conseqüentemente interferindo na extrusão.

Figura 14: Filetador de PET.



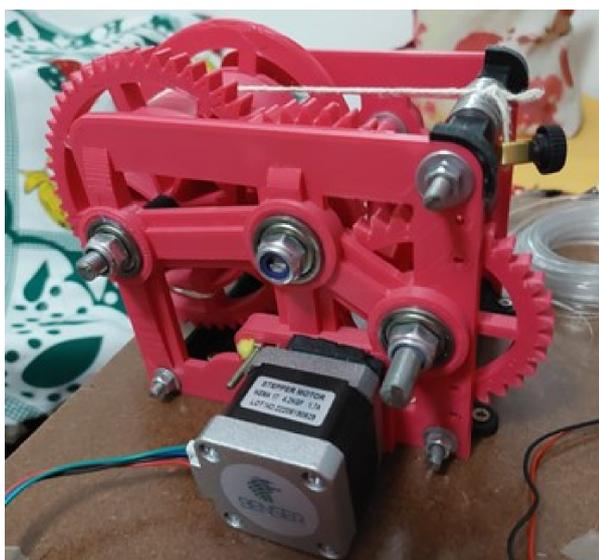
Fonte: Autor, 2024.

3.1.2 Bobinador

O bobinador é um conjunto de peças responsável por puxar o filamento extrudado pelo bico e coletado em um carretel. O filete de PET, ao ser aquecido pelo *hot-end*, será puxado por uma garra através de uma estrutura de engrenagens, passando por um ventilador para esfriá-lo e enrolado no carretel, para ser retirado depois.

A estrutura tem aproximadamente 160 mm de comprimento, 100 mm de largura e 120 mm de altura. Um motor é acoplado na lateral para girar uma engrenagem principal com diâmetro externo de 108 mm e interno de 73,5 mm, e duas engrenagens de diâmetro externo de 71 mm e interno de 13,5 mm para a coleta do filamento após passar pelo bico extrusor, como mostrado na Figura 15.

Figura 15: Bobinador de Filamento.



Fonte: Autor, 2024.

3.1.3 Carretel de Filete

Juntamente com o conjunto de peças impressas para a construção do bobinado, foi modelado pelo mesmo perfil na plataforma uma estrutura de carretel de 23 mm de largura e 110 mm de diâmetro externo e 31 mm interno para recolher o filete de PET cortado pelo filetador, como mostrado na Figura 16.

Figura 16: Carretel de Filete.



Fonte: Autor, 2023.

Os modelos de estruturas do Bobinador e do Carretel de filete foram obtidos da plataforma de modelos 3D para impressão *Thingiverse* no perfil “*Sapienz*” pelo nome “*PetPull-2*”, como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17: Modelo *Petpull - Thingiverse*.



Fonte: Autor, 2023.

A estrutura do Filetador foi obtido na plataforma de modelos 3D para impressão *Cults3D* no perfil “*Gypsyrobot*” pelo nome “*Pet Bottle Cutter*”, como pode ser visto na Figura 18..

Figura 18: Modelo *Pet Bottle Cutter* - *Cults3D*.



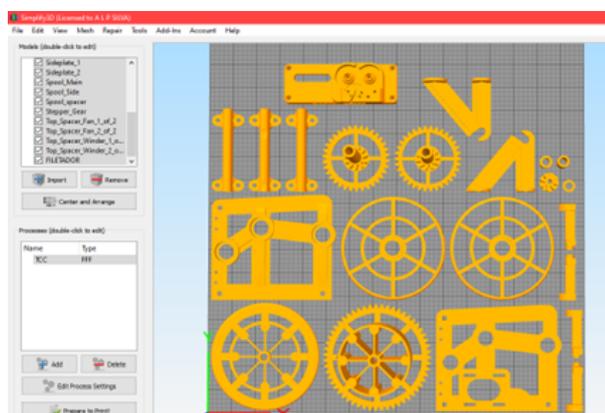
Fonte: Autor, 2023.

Todas as estruturas e suas peças integradas acima citadas foram obtidas de maneira ética e transparente, respeitando integralmente os direitos autorais associados à obra. As estruturas foram impressas com auxílio das impressoras *Sethi3DS4X* da Academia STEM, enquanto a autora era membro/estagiária do Projeto. Os desenhos dos modelos das estruturas utilizadas podem ser visualizados no Anexo A deste trabalho.

3.1.4 Processo de Fatiamento e Impressão

O fatiamento das peças foi feito no programa “*Simplify3D*” (Figura 19.), um fatiador de alta performance que possui parceria com as impressoras *Sethi3D*, contando com perfis pré-configurados.

Figura 19: Fatiamento das Peças no *Simplify3D*.

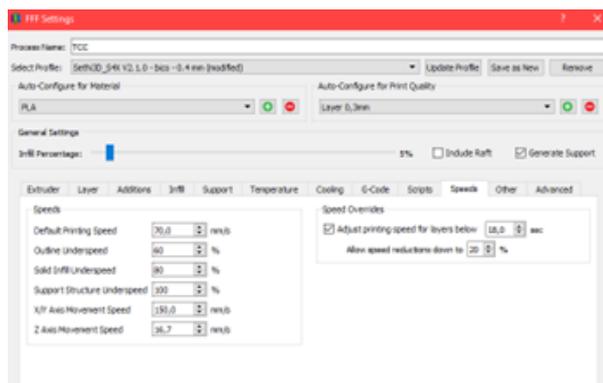


Fonte: Autor, 2023.

Os materiais utilizados nas impressões foram PLA das cores Rosa e Preto nas es-

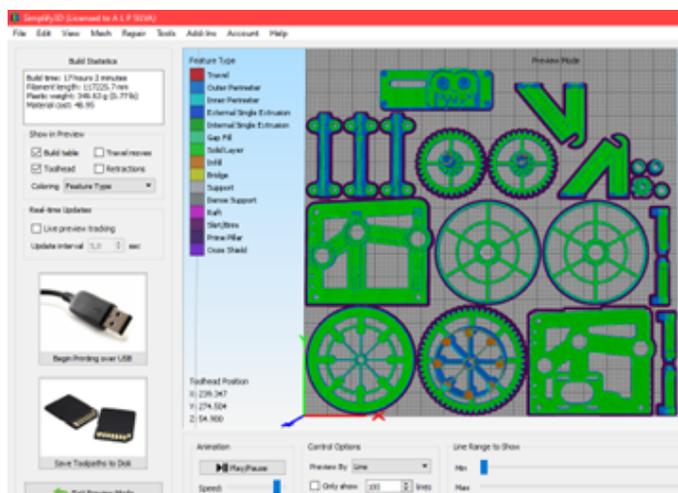
truturas. A impressão foi feita com um bico do hotend de 0,4 mm, em uma velocidade média de 70 mm/s. Como a peças da estrutura não necessita tanta definição, foi utilizado uma resolução de 0,3 mm. Foi incluído a geração de suporte e brim nas laterais das peças para não deformar e preenchimento de 5% em formato losango, como pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Parâmetros de Impressão.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 21: Parâmetros de Tempo e Custo.



Fonte: Autor, 2023.

O tempo total para impressão de todas as estruturas foi de, aproximadamente, 17 horas, não incluindo tempo de troca de filamento e erros de impressão. O total de filamento PLA em peso para impressão das estruturas foi de, aproximadamente, 367,92 gramas. (Figura 21)

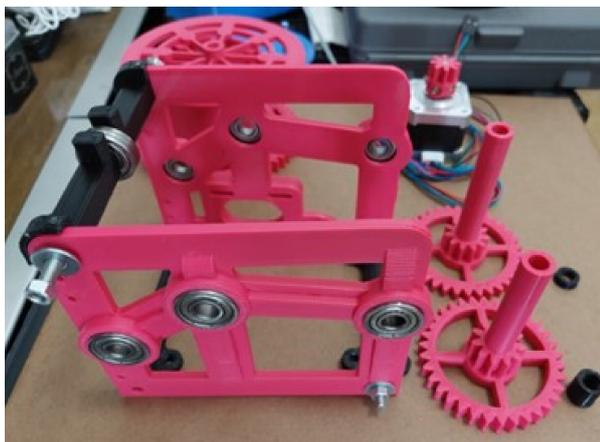
Figura 22: Peças das Estruturas Impressas.



Fonte: Autor, 2023.

Após a impressão de todas as peças (Figura 22), as estruturas foram montadas a partir do modelo original, foram utilizados 7 rolamentos de 12 mm de diâmetro, as fixações foram feitas com barras roscadas M8 e M4 e fixadas com porcas travantes M8 e M4. (Figura 23)

Figura 23: Montagem das Estruturas Mecânicas.



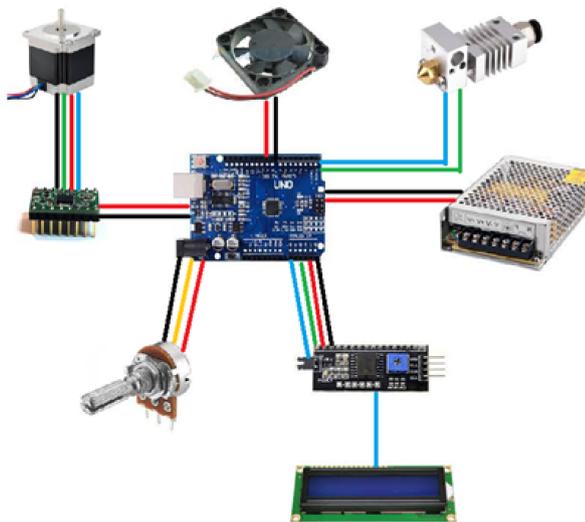
Fonte: Autor, 2023.

3.2 Montagem do Esquema Elétrico

O projeto elétrico consiste em alimentar cinco dispositivos, sendo estes, o bloco aquecedor, ventilador, motor de passo, display LCD, Arduino, bem como, as resistên-

cias elétricas adicionais, de acordo com o esboço elétrico da Figura 24.

Figura 24: Diagrama da Montagem Elétrica



Fonte: Autor, 2023.

3.2.1 Bloco aquecedor

O modelo do bloco aquecedor utilizado possui um cartucho aquecedor de 12V/50W com um termistor (sensor de temperatura) de 100 kohms, como mostrado na Figura 25. Para este projeto, ele aquece em uma temperatura entre 20°C e 230°C, sendo 220°C a temperatura ideal de extrusão.

Figura 25: Bloco Aquecedor utilizado



Fonte: Autor, 2023.

O bico extrusor não possui a mesma finalidade que ele teria em um projeto de impressora 3D, onde invés de dar a melhor resolução para a peça, ele define o diâmetro

necessário para o filamento que será utilizado nas impressoras 3D. O filetador corta um filete de PET com uma largura de no máximo 5mm, por sua vez, o filete passa por um bico de diâmetro de 6 mm e sairá através da ponta de 1,75 mm, transformando-se em filamento.

3.2.2 Controle PID para Temperatura

Para o controle de temperatura, foi utilizado o PID para calcular um sinal de controle que ajusta a potência do bloco aquecedor com o objetivo de manter a temperatura medida o mais próximo possível da desejada no sistema. O ajuste é feito através dos parâmetros Kp, Ki e Kd, que influenciam nas características da resposta, na estrutura clássica de um controlador tipo PID.

O sinal de entrada é a temperatura medida pelo Termistor conectado ao pino analógico “A0”, onde é armazenado na variável “*temperature_read*”. Para que seja feito o ajuste da temperatura medida e desejada é calculado o erro pela diferença entre a temperatura desejada “*set_temperature*”, previamente definida como 200°C, e a temperatura medida. O erro de temperatura é armazenado na variável “*PID_error*”.

Para obter os parâmetros Kp, Ki e Kd do controle PID, foi calculado com base no modelo comportamental de ganhos. O componente Proporcional “*PID_p*” é calculado multiplicando o erro “*PID_error*” pelo ganho proporcional Kp. O componente Integral “*PID_i*” é calculado somando-se o erro acumulado ao longo do tempo ao ganho integral Ki. O componente Derivativo “*PID_d*” é calculado dividindo a diferença entre o erro atual e o anterior pelo tempo decorrido “*elapsedTime*” ou "tempo de amostragem" e multiplicando pelo ganho derivativo Kp, como mostrado no código da Figura 26.

Figura 26: Definição dos componentes Proporcionais e Integrais do controle PID

```
//Controle de Temperatura
//Em seguida, calculamos o erro entre o ponto de ajuste e o valor real
PID_error = set_temperature - temperature_read;
//Calcular o valor P
PID_p = 0.01*kp * PID_error;
//Calcule o valor I em um intervalo
PID_i = 0.01*PID_i + (ki * PID_error);
```

Fonte: Autor, 2024.

A variável “*elapsedTime*” armazena o tempo anterior” *timePrev*” para começar a

processar a iteração atual do loop e em seguida registra o tempo atual “*Time*” através da função “*millis*”, a diferença é multiplicada por mil para gerar o resultado, sendo o tempo de amostragem entre duas iterações do loop em segundos. Essa variável é crucial para garantir que os cálculos do controle PID sejam sensíveis ao tempo e adequados para a taxa de amostragem do sistema. Está especificamente no cálculo do componente derivativo pois ele prevê e reage a mudanças rápidas na temperatura, suavizando a resposta do sistema e evitando oscilações indesejadas, melhorando a estabilidade, como mostrado código da Figura 27.

Com os parâmetros obtidos, construí-se o valor total de controle PID “*PID_value*” pela soma dos componentes P, I e D. Quanto maior o valor de controle total, maior a potência que deve ser aplicada ao aquecedor para aumentar a temperatura.

Figura 27: Definição do componente derivativo e valor total de controle PID

```
//Para derivada, precisamos de tempo real para calcular a taxa de mudança de velocidade
timePrev = Time;           // a hora anterior é armazenada antes da leitura da hora real
Time = millis();          // leitura em tempo real
elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000;
//Agora podemos calcular o valor D
PID_d = 0.01*kd*((PID_error - previous_error)/elapsedTime);
//O valor total final do PID é a soma de P + I + D
PID_value = PID_p + PID_i + PID_d;
```

Fonte: Autor, 2024.

Como o valor PID calculado será usado para determinar a largura de pulso do sinal PWM e controlar a potência do bloco aquecedor, foi colocada a limitação para garantir que ele esteja dentro de uma faixa segura entre 0 e a variável “*max_PWM*”, com valor definido como 255, como mostrado na Figura 28.

Figura 28: Faixa limite de largura de pulso do sinal PWM

```
//Definimos a faixa de PWM entre 0 e 255
if(PID_value < 0){
    PID_value = 0;
}
if(PID_value > max_PWM){
    PID_value = max_PWM;
}

if(PID_value < 0){
    PID_value = 0;
}
if(PID_value > max_PWM){
    PID_value = max_PWM;
}
```

Fonte: Autor, 2024.

Por fim, o sinal de controle calculado pelo controle PID é convertido em um sinal PWM através da função “*analogWrite*” e a modulação da largura de pulso controla a potência do bloco aquecedor no pino “*PWM_pin*” (5), como mostrado na Figura 29.

Figura 29: Controle do sinal PWM - Hot-end

```
//Agora podemos escrever o sinal PWM para o mosfet no pino digital D5
analogWrite(PWM_pin, PID_value);
previous_error = PID_error; //Lembre-se de armazenar o erro anterior para o próximo loop.
```

Fonte: Autor, 2024.

A variável “*previous_error*” armazena o erro atual para ser usado na próxima iteração do loop. Desta forma, o controle de temperatura do bloco aquecedor, conforme implementado no projeto, configura-se como um controle de malha fechada. O sensor de temperatura é usado para medir a temperatura atual do sistema. Essa medição é comparada com um valor de referência predefinido (*setpoint*), que representa a temperatura desejada. Com base nessa diferença (erro), um controlador (nesse caso, um controlador PID) calcula a ação de controle necessária para ajustar o sistema e manter a temperatura dentro do limite desejado.

3.2.3 Controle do Motor de Passo

Para o controle de movimento da estrutura do Bobinador, foi utilizado o motor de passo NEMA 17 (Figura 30), o qual foi acoplado na base do bobinador para o giro das engrenagens e o transporte do filamento para o carretel (Figura 31).

Figura 30: Motor com Engrenagem

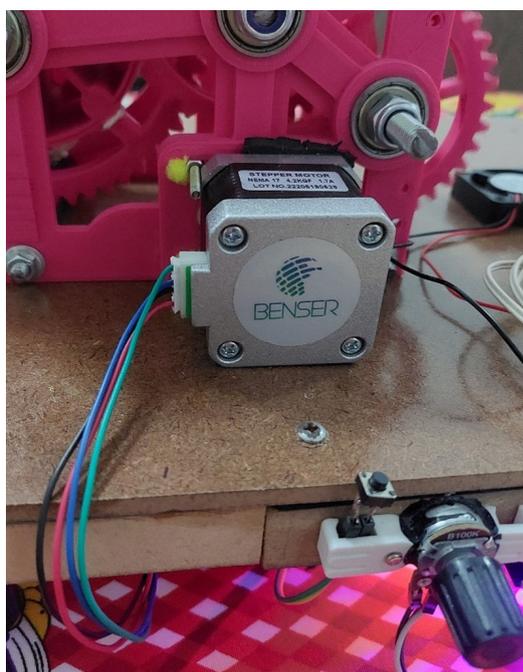


Fonte: Autor, 2023.

Para este projeto, será utilizado um potenciômetro para o controle da velocidade,

não necessitando da conexão das portas de controle de passo MS3, MS2 e MS1 do módulo, configurando um controle em malha aberta. O potenciômetro controla a direção de giro das engrenagens do bobinador, puxando o filamento independente da montagem e a velocidade que o motor gira as engrenagens do bobinador. A entrada da tensão variável do potenciômetro será lida pelo microcontrolador que recebe esse sinal e converte de acordo com o controle do potenciômetro para a porta de direção e passo do módulo A4988, transmitindo o comando para o motor de passo.

Figura 31: Motor de Passo acoplado ao Bobinador



Fonte: Autor, 2023.

Uma vez que o filamento for extrusado pelo *Hot-end*, ele necessita ser preso a uma garra para ser puxado para o carretel do bobinador, por este motivo, um botão auxiliar faz o *start* do motor para somente quando o filamento estiver em posição ele possa ser puxado. Quando o botão for acionado, o *ENABLE* no módulo A4988 recebe o nível lógico 0, ativando o módulo para controlar o motor, e quando acionado novamente, recebe o nível lógico 1 que o desativa.

3.2.4 Controle de Velocidade

O controle de dispositivos utilizados no projeto será feito a partir da programação no microcontrolador Arduino Nano.

O motor de passo controla o movimento do bobinador ao puxar o filamento de PET do bico extrusor. A temperatura necessária para tornar o filete de PET em filamento não é alcançada pelo bloco aquecedor de imediato e o tempo para chegar ao *setpoint* desejado pode variar dependendo das condições que o bloco aquecedor se encontra e a temperatura do ambiente em que ele se encontra.

Por isso, foi implementado um botão para o acionamento manual do motor, devido ao tempo necessário para a temperatura do bloco aquecedor chegar até a desejada e a velocidade do motor de passo é ajustada em tempo real de acordo com a leitura de um potenciômetro, garantindo o tempo correto para o ajuste de temperatura e evitando problemas de sobrecarga nas engrenagens do bobinador.

O valor do potenciômetro conectado ao pino de entrada analógico “*speed_pot*” (A1) é lido utilizando a função “*analogRead (speed_pot)*”. Da mesma forma, foi declarado os pinos digitais do botão de inicialização do motor “EN” (2), de direção “DIR” (4) e passo do motor “STEP” (3) (Figura 32). Quando o pino de direção receber nível lógico alto (5V), o motor gira em uma direção e quando receber nível lógico baixo (0V), o motor gira na direção oposta. O pino de passo recebe pulsos que converte em passos, a taxa ou frequência deles determina a velocidade de rotação do motor, o potenciômetro determina essa taxa e ajusta a velocidade do motor.

Figura 32: Definição de pinos de direção e passo do motor, botão e potenciômetro.

```
// Define os pinos de conexão
const int EN= 2;
const int DIR = 4;
const int STEP = 3;
int speed_pot = A1;
```

Fonte: Autor, 2024.

A leitura retorna um valor entre 0 e 1023, representando a posição do potenciômetro. A função “*map*” mapeia o valor para um intervalo de velocidade desejado. Esse intervalo é definido de seu valor mínimo e máximo para “*main_speed*” e “*max_speed*”, como mostrado no código da Figura 33.

Figura 33: Definição do intervalo de velocidade através da leitura do potenciômetro.

```
void loop() {
  if (millis() % 1000 == 0){
    rotating_speed = map(analogRead(speed_pot), 0, 1024, main_speed, max_speed);
```

Fonte: Autor, 2024.

A velocidade lida pelo potenciômetro é atualizada na variável “*rotating_speed*” através da função “*setSpeed*”. Para controle da direção de rotação do motor, foi atribuído que a velocidade máxima assumisse um valor positivo e a velocidade mínima um valor negativo, ou seja, se o valor de velocidade lido na variável “*rotating_speed*” for positivo, motor de passo assume uma direção e se o valor de velocidade for negativo, assume a direção oposta, , como mostrado no código da Figura 34.

Figura 34: Controle de direção de rotação pela leitura de velocidade.

```
//Variáveis de passo
int max_speed = 50;
int main_speed = -50;
bool but1_state = true;
bool activate_stepper = false;
int rotating_speed = 0;
```

Fonte: Autor, 2024.

O acionamento do botão, por fim, determina a inicialização do driver A4988. Uma vez que ele for ativado, um sinal do nível lógico baixo é enviado a variável “EN”, acionando o motor de passo e sinalizando o seu funcionamento com um LED com nível lógico alto, o motor recebe o valor lido pelo potenciômetro e ajusta a velocidade de acordo. Se o botão for desativado, EN recebe valor lógico alto, desligando o driver do motor e desligando o LED, , como mostrado no código da Figura 35. Uma função de interrupção “*stepper.runSpeed*” foi adicionada para lidar com a execução do motor.

Figura 35: Leitura do nível do botão e Inicialização do Motor de Passo.

```
if(!digitalRead(but1) && but1_state){
  but1_state = false;
  activate_stepper = !activate_stepper;
  delay(10);
}
else if(digitalRead(but1) && !but1_state){
  but1_state = true;
}

if(activate_stepper){
  digitalWrite(LED, HIGH);
  digitalWrite(EN, LOW); //Ativamos driver de passo
  stepper.setSpeed(rotating_speed);
}
else
{
  digitalWrite(EN, HIGH); //Desativamos o driver de passo
  digitalWrite(LED, LOW);
  stepper.setSpeed(0);
}
stepper.runSpeed();
```

Fonte: Autor, 2024.

Foi escolhido o controle do motor de passo em malha aberta devido a simplicidade do sistema, não necessitando um posicionamento absolutamente preciso para o Bobinador. Para caso de falha devido a carga variável no motor de passo, não há maiores problemas porém, em operações de longo prazo, especialmente em baixas velocidades, os motores de passo podem perder a sincronização, resultando em erros de posicionamento. Nesses casos, deve-se garantir a confiabilidade do motor de passo para o sistema, mesmo que a precisão do passo do motor não seja um fator maior.

3.2.5 Ventilador

O filamento, ao sair pelo bico extrusor, se encontra em uma temperatura elevada que pode ser um problema ao ser puxado pelo bobinador, pois tencionando o filamento, o diâmetro diminui.

Por isso, utiliza-se um cooler de 12V de 30x30x10 mm (Figura 36) posicionado na saída do bloco aquecedor para resfriar o filamento extrusado a fim de que não haja ruptura ou afinamento quando ele for puxado pelo bobinador.

Figura 36: Ventilador.



Fonte: Autor, 2023.

Para controlar o ventilador, foi utilizado um transistor MOSFET, que funciona como uma chave liga-desliga mais rápida que um relé, para fazer o acionamento por meio de um pulso. Este pulso chaveia o transistor de forma que ele passa uma corrente 0,15mA para o ventilador, ligando-o.

A velocidade do ventilador é controlada indiretamente pelo valor de controle “*PID_value*” utilizado no controle de temperatura do bloco aquecedor. Ele determina o ciclo de trabalho do sinal PWM enviado ao pino PWM do ventilador “*PWM_pin1*”, como mostrado no código da Figura 37.

Figura 37: Controle do sinal PWM - Ventilador.

```
analogWrite(PWM_pin1, PID_value);
previous_error >= PID_error;
```

Fonte: Autor, 2024.

Sendo necessário a utilização do ventilador para dissipar o excesso de calor, o ciclo de trabalho dele se adequa a temperatura através do sinal PWM. Quando o valor de controle PID é alto (grande diferença entre temperatura desejada e medida), o ciclo de trabalho do PWM aumenta, aumentando a velocidade do ventilador. Quando o valor de controle PID é baixo (pequena diferença entre temperatura desejada e medida), o ciclo de trabalho do PWM reduz, diminuindo a velocidade do ventilador.

3.2.6 Display LCD

Foi utilizado no projeto um *display* LCD 16x2 (Figura 38) para mostrar o valor de temperatura medida no sensor de temperatura do bloco aquecedor e o valor de velocidade do motor a partir da variação de tensão que o potenciômetro controla.

Figura 38: Display LCD com Módulo IC2.



Fonte: Autor, 2023.

Os parâmetros 16 e 2 indicam o número de colunas e linhas do *display*, respectivamente.

Figura 39: Inclusão de configuração de biblioteca do display LCD.

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

Fonte: Autor, 2024.

Sua utilização necessita de inicialização de biblioteca adequada (Figura 39) e configurações iniciais para mostrar os valores medidos conforme desejado. Sua programação define uma luz de fundo, a posição do cursor no *display* para primeira e segunda linha, imprime os textos nas posições especificadas referentes aos valores de temperatura “**Tmp:**” e velocidade “**Spd:**” e limpa o conteúdo do *display* à medida que os valores mudam, como mostrado no código da Figura 40.

Figura 40: Configurações iniciais do display LCD.

```
void setup() {
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Tmp: ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Spd: ");
}
```

Fonte: Autor, 2024.

O display é atualizado a cada 4 segundos com as informações de temperatura “*temperature_read*” e velocidade do motor de passo “*rotating_speed*” (Figura 41).

Figura 41: Atualização de valores no display LCD.

```
if (millis() % 4000 == 0){
  lcd.setCursor(5,0);
  lcd.print(temperature_read);
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(5,1);
  lcd.print(rotating_speed);
}
```

Fonte: Autor, 2024.

Com a utilização do módulo de comunicação I2C, ambos foram dispostos em um protoboard próprio e são alimentados com 5V. O módulo permite que várias portas de entrada do Arduino sejam poupadas, permitindo a utilização do Arduino Nano.

A variável “*rotating_speed*” é calculada a partir da leitura do potenciômetro e, em seguida, mapeada para um intervalo específico de velocidade que determina a velocidade do motor de passo. O intervalo de temperatura mostrado no *display* se apresenta em Celsius, no entanto, o intervalo de velocidade mostrado no *display* vai de -25

a 24, sendo suas velocidades máximas no sentido anti-horário e horário, respectivamente (Figura 42). A unidade de velocidade mostrada no display seria a mesma que a unidade de velocidade configurada no código, ou seja, "passos por segundo"(pps), considerando que o motor de passo utilizado seja confiável e não tenha problemas de posicionamento em meio ao funcionamento.

Figura 42: Amostragem do Display LCD.



Fonte: Autor, 2024.

3.2.7 Fonte de alimentação

A fonte de tensão utilizada fornece 12V 10A 120W (Figura 43) com um adaptador de 5V. A tensão de 110V da rede alimenta a fonte de alimentação do circuito, que oferece 12V para os componentes e 5V para o Arduino através de um conversor de tensão.

Figura 43: Fonte de Alimentação.



Fonte: Autor, 2023.

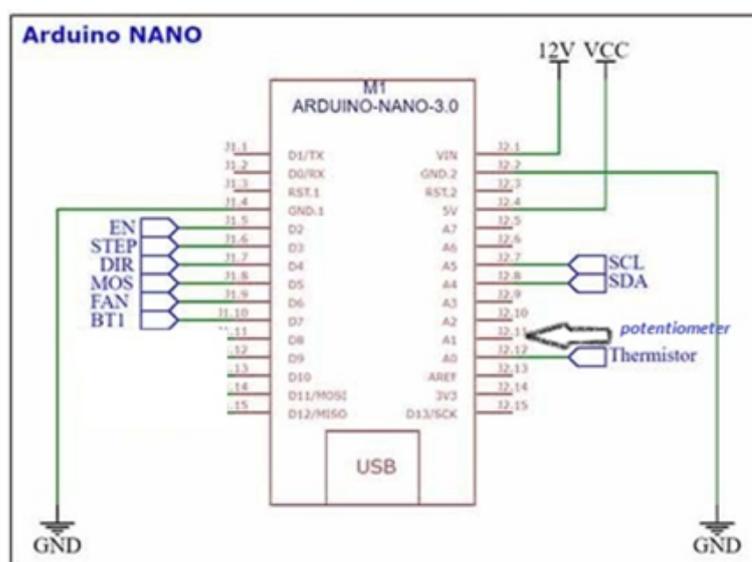
4 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Esquemático e Layout Físico do circuito elétrico

Com base no desenvolvimento do projeto, foi elaborado o esquemático do circuito elétrico na plataforma *EasyEDA*, uma ferramenta *online* de *design* de circuitos eletrônicos e placas de circuito impresso, totalmente gratuita. Possui uma interface simples e intuitiva e uma extensa biblioteca de componentes.

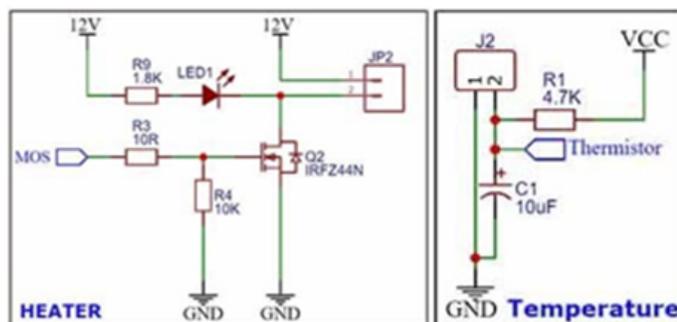
A plataforma permite a montagem do circuito em partes, ou seja, blocos de montagem de componentes podem estar separados para melhor compreensão do circuito, porém a plataforma subentende suas interligações. O *layout* do circuito obtido pode ser expresso nas seguintes figuras: Arduino (Figura 44), Bloco aquecedor (Figura 45), Motor de Passo (Figura 46), Ventilador (Figura 47), Potenciômetro, Botão e *Display* LCD (Figura 48) e Fonte de Alimentação (Figura 49).

Figura 44: Esquemático de Conexões - Arduino.



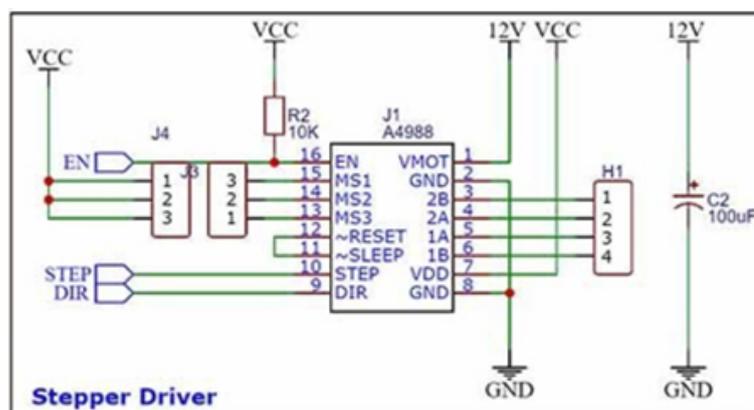
Fonte: Autor, 2024.

Figura 45: Esquemático de Conexões - Bloco Aquecedor.



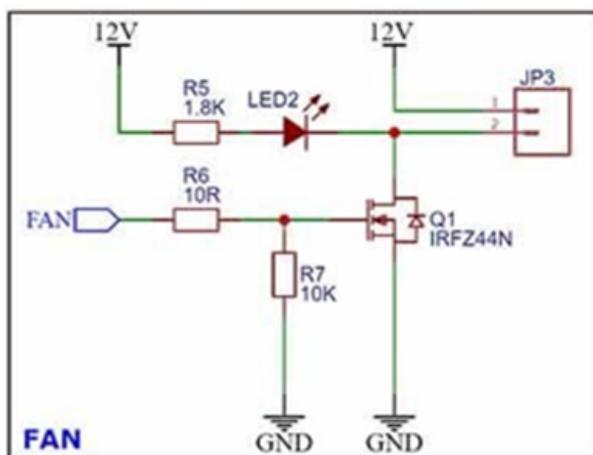
Fonte: Autor, 2024.

Figura 46: Esquemático de conexões - Motor de Passo.



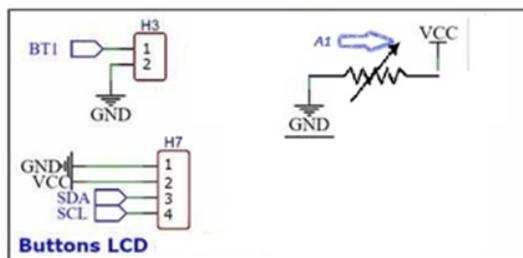
Fonte: Autor, 2024.

Figura 47: Esquemático de conexões - Ventilador.



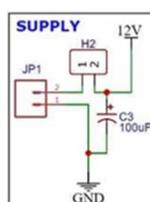
Fonte: Autor, 2024.

Figura 48: Esquemático de conexões - Potenciômetro, Botão e Display LCD.



Fonte: Autor, 2024.

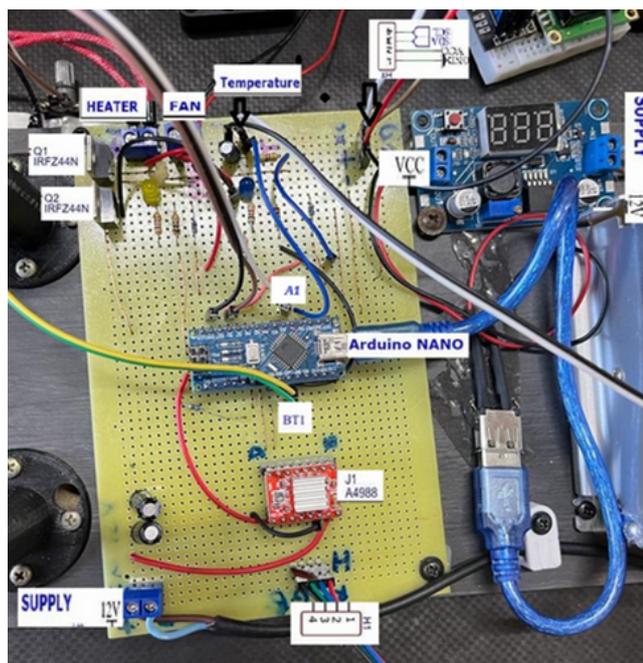
Figura 49: Esquemático de conexões - Fonte de Alimentação.



Fonte: Autor, 2024.

Apesar da plataforma disponibilizar a montagem do *layout* do circuito em PCB (placa de circuito impresso), foi preferível utilizar o *layout* para montagem em uma placa universal perfurada, onde os componentes foram montados e soldados.

Figura 50: Circuito Elétrico Físico.



Fonte: Autor, 2024.

Com a utilização da placa perfurada, foram realizados testes de continuidade para assegurar a integridade e eficácia do projeto, sendo essenciais independentemente do método de construção escolhido, para garantir que todas as conexões estejam corretas e que não haja falhas que possam comprometer o funcionamento do circuito.

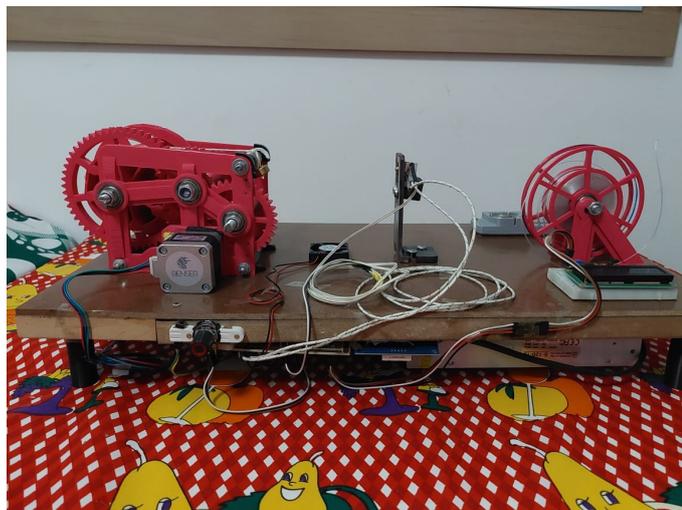
As pinagens dos componentes podem ser identificadas tanto no *layout* do circuito (Figura 50) quanto na programação completa, disponíveis no Apêndice A deste trabalho. Resumindo o esquema de ligação dos pinos de entrada e saída:

- H1 – Motor de Passo
- H2 - Fonte de alimentação
- H3 - Botão de start do motor
- H7 - Módulo IC2
- J1 – Driver A4988
- J2 - Thermistor
- J3 – Modos de Passo – Motor
- JP1 - Conversor de 12V/5V
- JP2 - Bico Extrusor
- JP3 - Ventilador

4.2 Montagem final do Projeto.

Todas as estruturas mecânicas e o circuito elétrico foram fixadas em uma base de MDF de 55cm x 30cm x 5cm com quatro pés de apoio de 56 mm de altura e 19,7 mm de diâmetro e deixando a estrutura com uma altura de 78,6 mm, como mostrado na Figura 51.

Figura 51: Base do Projeto e Estruturas.



Fonte: Autor, 2024.

Para a montagem final e melhor alinhamento do bloco aquecedor com a estrutura do bobinador, foi modelado três estruturas para servir de guia para o filamento (Figura 53), assim como um suporte com a altura necessária para posicionar o bico extrusor e um apoio para o bloco aquecedor (Figura 52).

Figura 52: Estruturas para suporte do bloco aquecedor.



Fonte: Autor, 2024.

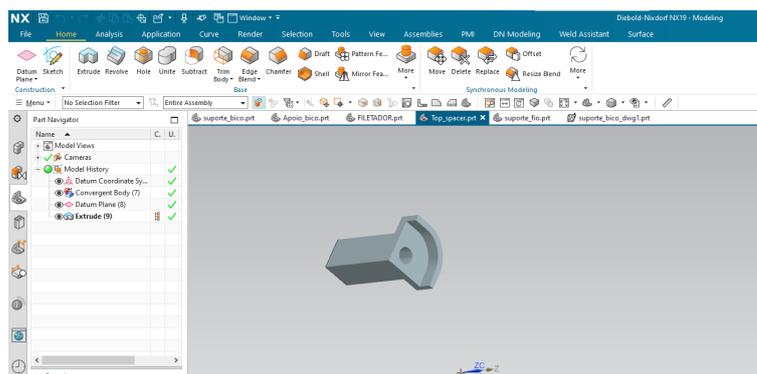
Para tornar a guia do filamento maior e manter os 90 mm de largura da estrutura do bobinador, foi feita uma modificação nas peças do Top spacer 1 e Top spacer 2, diminuindo 16 mm de comprimento de ambos, conforme mostrado na Figura 54.

Figura 53: Estrutura para guia do fio para o Bobinador.



Fonte: Autor, 2024.

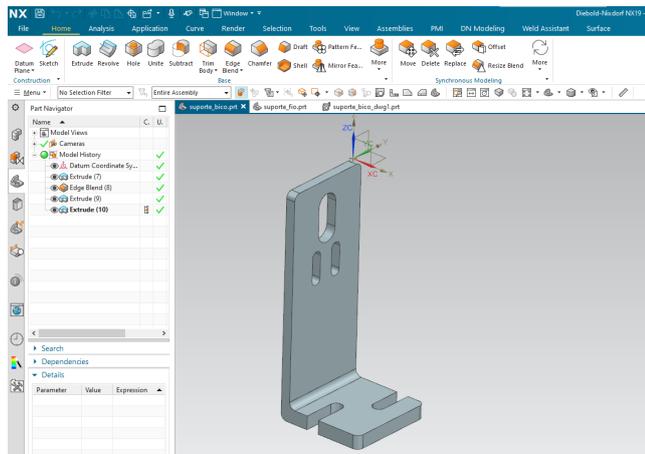
Figura 54: Modificação feitas nas peças Top Spacer.



Fonte: Autor, 2024.

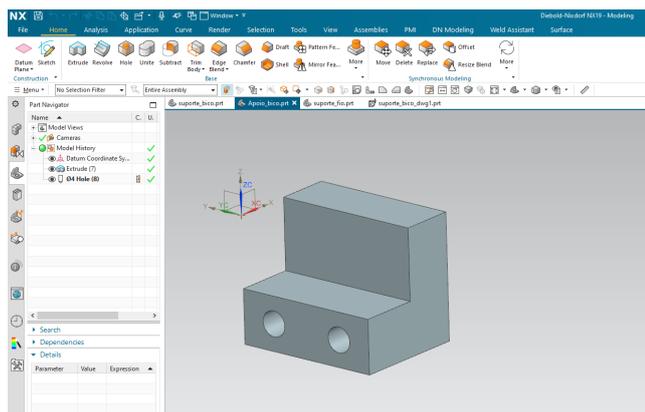
As três estruturas foram modeladas no programa “NX Siemens” (Figuras 55, 56 e 57), *software* licenciado utilizado nas atividades de modelagem 3D, desenvolvimento de projetos e manufatura da empresa "Diebold Nixdorf", onde a aluna é estagiária. As peças foram obtidas a partir de partes de alumínio sobressalentes da produção. Foram feitas as modificações necessárias com as ferramentas presentes no laboratório da empresa, as chapas cortadas a laser, dobradas em prensa dobradeira, os furos feitos a partir de fresadora e os cortes da guia do filamento em torno mecânico. Os desenhos das peças podem ser visualizados no Apêndice B deste trabalho.

Figura 55: Modelagem do Suporte para o bloco aquecedor.



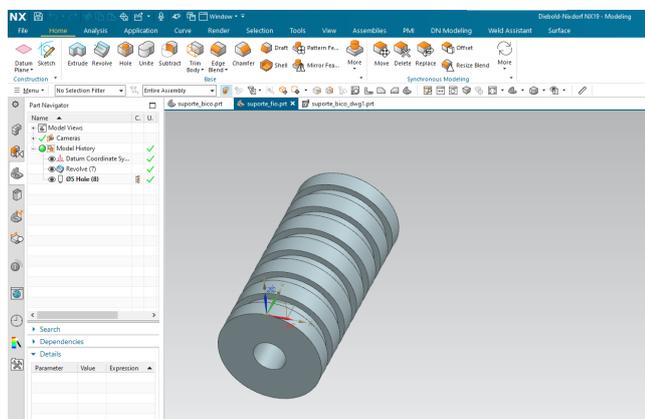
Fonte: Autor, 2024.

Figura 56: Modelagem do apoio para o bloco aquecedor.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 57: Modelagem da guia para o fio extrusado.



Fonte: Autor, 2024.

4.3 Realização de Testes

Antes da realização dos testes do processo de extrusão do filamento, as garrafas foram higienizadas, de forma que o rótulo foi retirado e a cola residual foi raspada para não interferir no filamento. O corte da garrafa com o filetador é um processo rápido se realizado em uma base fixa para o esforço necessário, dependendo da situação, pode ser necessário uma pessoa para segurar a base. O pré-aquecimento do bloco aquecedor antes da extrusão também é necessário para o processo, o bico extrusor começa a aquecer assim que o projeto inicia e a ponta do filete deve ser cortada em até 2 mm para a passagem através do bico. Ao chegar na temperatura de 220°C, o processo de extrusão pode ser iniciado e o filamento é preso na garra do bobinador.

Foram feitos seis testes na Extrusora de Filamento com cinco tipos de garrafas diferentes:

- Teste 1

O primeiro teste foi feito com parte de uma garrafa de refrigerante de 2 litros da marca Guaraná Antartica para verificar a qualidade de corte do filetador e o tamanho do filete gerado. Foi observado que a modelagem do filetador necessitava modificações para este projeto, pois o filete não estava sendo cortado continuamente devido a lâmina utilizada e o tamanho do filete estava em 8 mm e 10 mm, diferente do indicado (5 mm), como mostrado na Figura 58.

Figura 58: Filetador Original.

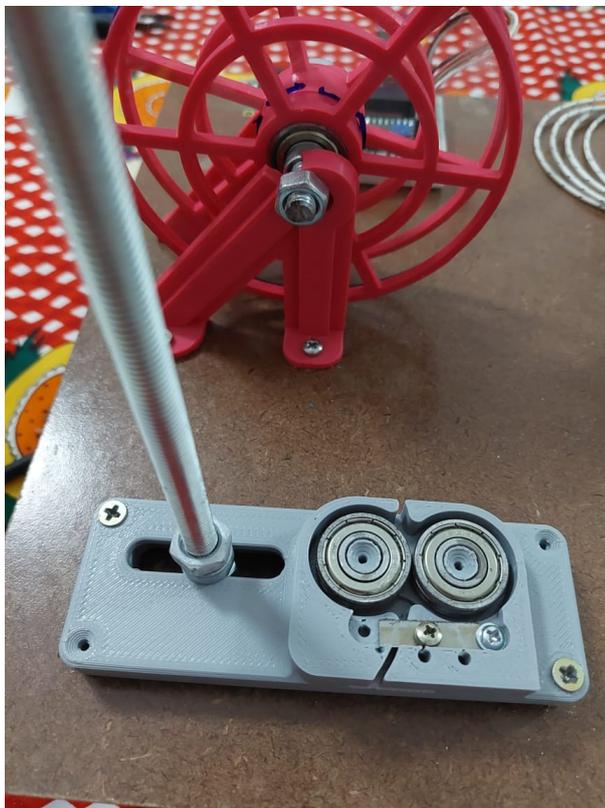


Fonte: Autor, 2023.

Devido a este problema, foi modelado outro filetador a partir do utilizado anteriormente, também utilizando o programa “NX Siemens” (Figura 60), e impresso em ABS

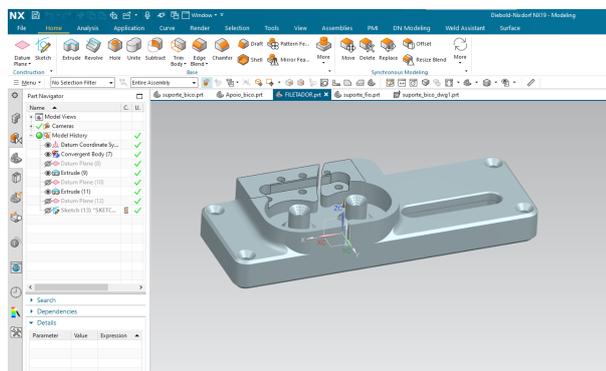
cinza (Figura 59) na impressora FDM do modelo Funmat PRO 610 HT, localizada no laboratório da empresa onde a aluna é estagiária.

Figura 59: Filetador com altura modificada.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 60: Modelagem do Filetador modificado.

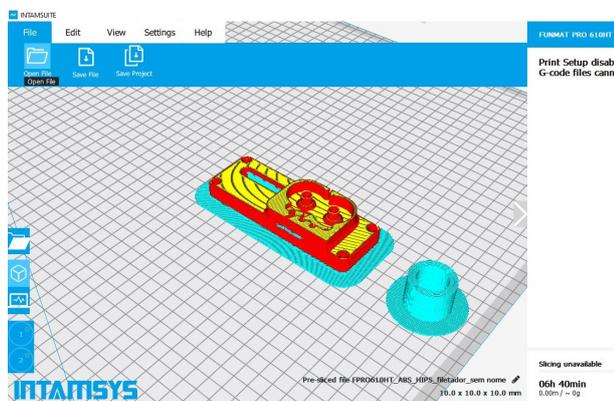


Fonte: Autor, 2023.

O *software* de fatiamento utilizado para impressão do novo Filetador foi o Intamsuit 4.0 (Figura 61), de uso próprio da impressora da marca Funmat. Foi feito a

correção da altura da lâmina e correção de pontos de fixação. A impressão levou cerca de 6 horas e 40 minutos, usando 25 gramas de filamento.

Figura 61: Fatiamento para impressão do novo filetador.



Fonte: Autor, 2023.

O desenho do filetador modificado pode ser visualizado no apêndice B deste trabalho. A altura do filete foi diminuída e uma lâmina de estilete foi colocada.

- Teste 2

O segundo teste foi feito utilizando uma garrafa larga de 1,5 litros de suco da marca Del Valle Frut. O teste foi feito sem o uso do filetador, que ainda estava sendo modelado, portanto o filete foi cortado com o auxílio de uma tesoura de forma totalmente manual. O filete resultante foi um filete com tamanho inconsistente e com falhas. Por não passar por um corte constante, o filete apresentou várias pontas devido o recuo da tesoura, ocasionando também a inconstância do tamanho, conforme Figura 62.

Figura 62: Filete cortado manualmente.



Fonte: Autor, 2024.

Este filete foi dividido para utilização de dois testes separados, um com a velocidade máxima do bobinador, onde o filamento é puxado para o carretel principal de 73,5 mm do bobinador e outro com velocidade maior, utilizando uma das engrenagens de diâmetro de 13,5 mm.

O filamento produzido com a velocidade máxima do carretel principal do bobinador resultou um filamento com formato circular, porém espinhoso devido as falhas de corte enquanto o filamento produzido com a velocidade maior que a do carretel resultou em um filamento com formato curvado espinhoso, sem tempo suficiente para o PET se fundir em um formato circular, o filamento ficou rígido e com dobras, como pode ser visualizado na Figura 63.

Figura 63: Filamento com falhas - tamanho e formato indesejáveis.



Fonte: Autor, 2024.

Ambos os filamentos também apresentaram manchas e um deles até apresentou marcas do que provavelmente seria a inscrição de lote ou validade da garrafa, como mostrado na Figura 64.

Figura 64: Filamento com inscrições provenientes da garrafa Del Vale.



Fonte: Autor, 2024.

A quantidade de filamento produzido da garrafa no total foi de 14 gramas conforme mostrado na Figura 65, parte da causa da perda aproximada de 2 gramas da massa total deve-se ao fato da divisão do filete para os testes individuais e a retirada de partes não utilizáveis do filamento, levando 25 minutos de tempo de extrusão para cada parte.

Figura 65: Filamento produzido a partir da garrafa Del Vale.



Fonte: Autor, 2024.

- Teste 3

O terceiro teste foi feito com uma garrafa de 1,5 litros de refrigerante da marca Fanta (Figura 66). Desta vez, utilizando o filetador modelado com uma altura de corte

de 5 mm, resultando em cerca de 16 gramas de filete com tamanho consistente, sem pontas e com formato liso sem ondas (Figura 67).

Figura 66: Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Fanta.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 67: Filete criado em gramas - garrafa Fanta.



Fonte: Autor, 2024.

O filamento foi criado na velocidade máxima do bobinador, sendo recolhido pelo carretel principal devido o observado no teste anterior, resultando em um filamento sem falhas de tamanho, com formato circular e sem “espinhos”, um filamento com forma apropriada. Porém foi observado a presença de manchas no filamento produzido. Apesar da higienização de todas as garrafas utilizadas juntamente da retirada do rótulo

e raspagem da cola residual, ainda pôde-se observar a presença da cola no filamento em intervalos uniformes, como mostrado na Figura 68.

Figura 68: Filamento com manchas - garrafa Fanta.



Fonte: Autor, 2024.

Devido a garrafa utilizada, o filamento apresentou uma aparência transparente de cor clara. Foi observado que a média de filamento produzido de uma garrafa de 1.5 litros é de 14 gramas, sendo aproximadamente 11 metros de comprimento, devido a retirada de partes não utilizáveis do filamento, como mostrado na Figura 69.

Figura 69: Filamento produzido a partir da garrafa Fanta.



Fonte: Autor, 2024.

- Teste 4

O quarto teste foi feito com uma garrafa de 2 litros de refrigerante da marca Coca-cola (Figura 70). Utilizando o filetador, foi obtido cerca de 18 gramas de filete com tamanho consistente, porém devido ao formato estrutural da garrafa, o filete apresentava ondas ou deformações, não ficando totalmente liso (Figura 71).

Figura 70: Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Coca-cola.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 71: Filete criado em gramas - garrafa Coca-cola.



Fonte: Autor, 2024.

Ao ser filetado, foi observado uma certa resistência nas partes mais extremas da garrafa e que nessas partes, a estrutura da parede da garrafa PET era mais espessa do que no meio, necessitando um esforço maior na hora de cortar o filete.

Apesar das ondas no filete, o filamento resultante não apresentou problemas na estrutura, ficando com um formato circular e com tamanho consistente. Devido a garrafa utilizada e, possivelmente os aditivos do líquido, o filamento apresentou uma aparência transparente escura. Também foi observado, assim como nos outros testes, manchas ao longo do filamento devido aos resíduos de cola, porém, de forma não tão aparente devido a cor escura, tendo o melhor resultado dentre os filamentos produzidos, conforme mostrado na Figura 72.

Figura 72: Filamento com manchas - garrafa Coca-cola.



Fonte: Autor, 2024.

O filamento total resultante de uma garrafa de 2 litros foi de 17 gramas, sendo aproximadamente 11,6 metros de comprimento, com a retirada de partes não utilizáveis, tendo o maior aproveitamento do filete obtido, conforme mostrado na Figura 73.

Figura 73: Filamento produzido a partir da garrafa Coca-cola.



Fonte: Autor, 2024.

- Teste 5

O quinto teste foi feito da mesma garrafa de refrigerante de 2 litros do teste anterior para verificar o critério de velocidade de extrusão.

A velocidade máxima que o carretel principal, onde o filamento é estocado, do bobinador é de aproximadamente 3,3 mm/s. Velocidades acima desta interferem na qualidade do filamento que fica fora do padrão do diâmetro desejado. Porém, o filamento produzido com a velocidade utilizada também não estava atendendo o diâmetro necessário para impressão, ficando com uma margem de erro de 0,1 mm, como mostrado na Figura 74.

Figura 74: Filamento com diâmetro menor que o desejado.



Fonte: Autor, 2024.

Mesmo que o filete de PET tenha sido cortado com o tamanho adequado (5mm) (Figura 75) para este projeto e o bico extrusor tenha o diâmetro exato de 1,75 mm de diâmetro (Figura 76) para a geração de filamento, o material resultante teve um diâmetro menor que o desejado.

Figura 75: Filete com tamanho desejado de 5 mm.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 76: Bico extrusor com diâmetro de saída de 2 mm.



Fonte: Autor, 2024.

É possível que a velocidade utilizada no projeto ainda tenha sido acima do indicado, onde o PET pode ter sofrido uma deformação com a força de tração do bobinador, afunilando o filamento em alta temperatura e conseqüentemente diminuindo seu diâmetro. Por isso, foi testado uma velocidade menor de 2 mm/s e 1,7 mm/s, velocidades 14 e 12 mostradas no display, respectivamente.

Em ambas, foi observado uma diferença no diâmetro do filamento onde foi permitido que o filete se fundisse entre si com a temperatura assumindo um formato mais circular, se assemelhando a um filamento. O filamento resultante teve um diâmetro satisfatório de 1,73 mm (Figura 77), porém devido a menor velocidade, o processo levou o dobro de tempo para ser finalizado.

Figura 77: Filamento com tamanho adequado.



Fonte: Autor, 2024.

- Teste 6

O sexto teste foi feito com uma garrafa de 2 litros de água mineral da marca Água Crim (Figura 78). O filete obtido, embora sem falhas para a obtenção do filamento, não gerou bons resultados na extrusora (Figura 79). Não foi possível concluir o processo completo da geração do filamento devido fragmentação do filete durante o aquecimento do PET.

Figura 78: Garrafa utilizada para fabricação do filamento - garrafa Água.



Fonte: Autor, 2024.

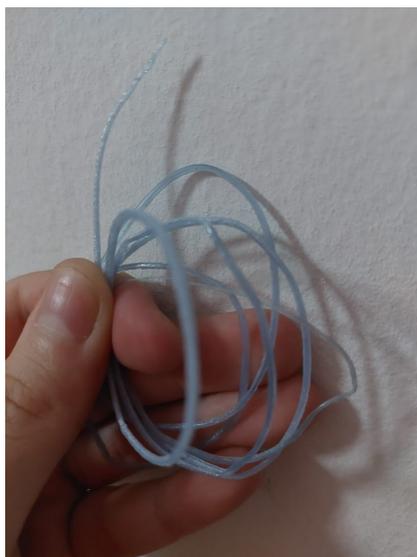
Figura 79: Filete criado - garrafa Água.



Fonte: Autor, 2024.

O pouco filamento produzido no processo resultou em um filamento branco, resultado de formação de bolhas no interior, e quebradiço, não servindo para a impressão. Este fator pode ser devido a superexposição do calor, levando a atingir a temperatura de degradação térmica do material, onde o PET está passando por uma liberação de subprodutos de decomposição ao ter sido exposto a altas temperaturas por um tempo prolongado, como pode ser visualizado na Figura 80.

Figura 80: Filamento produzido a partir da garrafa de água.



Fonte: Autor, 2024.

Acredita-se que este resultado foi devido a utilização de uma garrafa PET própria para armazenamento de água. Foi observado durante o corte dos filetes que garrafas possuem diferentes espessuras de PET entre elas e entre as suas próprias partes da estrutura, como motrado na Figura 81.

Figura 81: Diferença de espessura da garrafas.



Fonte: Autor, 2024.

Apesar de todas serem feitas de Polietileno Tereftalato, as garrafas podem ter composições ligeiramente diferentes em si, dependendo da adição de aditivos no processo de fabricação e produto armazenado. As garrafas de suco devem conter bebidas que possuem vários aditivos e pH diferentes, afetando a estabilidade do PET, isso se aplica também nas garrafas de refrigerante que necessitam suportar líquidos pressurizados. A maioria das garrafas próprias para refrigerante apresentam ondulações na sua estrutura para reter o gás carbônico presente no líquido e absorver choques de expansão ou contração de volume, aguentando a pressão.

Todos esses fatores esclarecem o problema da degradação térmica precoce e diferença de espessura de parede, proporcionando uma baixa resistência ao calor excessivo. Se fosse necessário a utilização do PET dessas garrafas em específico, seria necessário a diminuição da temperatura e/ou aumento da velocidade de extrusão com a implementação de um controle de escolha de *setpoint*, o que não pôde ser incluído no projeto, porém poderia ser considerado para uma melhoria futura.

O processo de extrusão do filamento a partir do filete leva cerca de 30 minutos, com uma velocidade média de 3.3 mm/s, sendo a velocidade máxima do bobinador, porém para a geração de um filamento com tamanho de diâmetro adequado, sem falhas ou bolhas, leva cerca de 1 hora e 30 minutos, com uma velocidade média de 1.7 mm/s. Considerando o tempo de aquecimento do bloco aquecedor de cerca de 7 minutos mais o tempo utilizado para cortar a garrafa em filete de cerca de 1 minuto, o processo completo de fabricação de filamento com o projeto é de aproximadamente 1 hora e 38 minutos.

Para reunir os resultados obtidos da realização dos testes de extrusão de forma resumida, foi elaborado a Tabela 2:

Tabela 2: Resultados dos Testes de Produção de Filamento

Teste	Garrafa utilizada	Qtd. Filete	Tempo de Extrusão	Vel. de Extrusão	Qtd. de Filamento
1	Guaraná (2 litros)	-	-	-	-
2	Del Valle (1.5 litros)	15 gramas	25 minutos cada	3.3 mm/s e 4mm/s	14 gramas
3	Fanta (1.5 litros)	16 gramas	30 minutos	3.3 mm/s	14 gramas
4	Coca- cola (2 litros)	18 gramas	33 minutos	3.3 mm	17 gramas
5	Coca- cola (2 litros)	18 gramas	1 hora e 30 minutos	1.7 mm/s	17 gramas
6	Água Crim (2 litros)	18 gramas	2 minutos	3.3 mm/s	-

Fonte: Autor, 2024

4.4 Impressão com Filamento Produzido

Os filamentos de impressora 3D FDM são os principais insumos utilizados na impressão 3D, por isso foi feito o teste final do filamento produzido onde ele foi utilizado na impressão de um modelo 3D para verificação da qualidade.

Foram realizados dois tipos de testes com o filamento no laboratório da Ocean Samsung, localizado nas dependências da universidade:

4.4.1 Impressão com *3D Printing Pen*

Para os filamentos não ideais para a impressão como os fabricados a partir de filetes cortados sem o auxílio do filetador, com pontas, com tamanho inconsistente e no formato arqueado, foi pensado na utilização da *3D Printing Pen* SCRIB3D (Figura 82), uma caneta de impressão 3D que pode ser usada para fabricação de peças e trabalhos manuais de forma simples e acessível.

Figura 82: Caneta SCRIB3D para impressões 3D.



Fonte: Autor, 2024.

Apesar dela ser ajustável para temperaturas de materiais ABS (210-235°C) e PLA (160-210°C), foi possível realizar o teste com o ajuste de temperatura para ABS em 235°C, considerando que o PET é usado em impressões com temperatura de extrusão entre 235°C a 255°C. Foi utilizado uma placa de acrílico em temperatura ambiente como base para as impressões, como pode ser visualizado na Figura 83.

Figura 83: Processo de Impressão 3D com a *3D Printing Pen*.



Fonte: Autor, 2024.

As impressões foram feitas pela aluna de forma dinâmica resultando em peças simples, com camadas desregulares, estrutura desalinhada, “gaps” e sem acabamento.

Apesar da qualidade das peças, o filamento não apresentou problemas na fabricação dos modelos, sem apresentação de manchas, como mostrado na Figura 84.

Figura 84: Impressões feitas com a caneta SCRIB3D.



Fonte: Autor, 2024.

4.4.2 Impressão na Impressora 3D FDM

Com o filamento produzido a partir do filete cortado com o filetador, o qual apresentava uma qualidade de formato e tamanho maior, foram feitos testes com impressoras 3D de bancada. A primeira utilizada foi a impressora FDM Sethi3DS4X, mostrada na Figura 85.

Figura 85: Impressora FDM utilizada nos testes.



Fonte: Autor, 2024.

Para escolha dos melhores parâmetros de impressão com o filamento produzido,

um modelo de cilindro e cubo foram obtidos do *site* de modelos 3D *Thingiverse* para teste do filamento. O fatiamento dos modelos foi feito no *software* "*Simplify*", como pode ser visto na Figura 89, onde devido ao diâmetro menor do filamento obtido, retirou-se a opção de retração do filamento e aumentou-se o multiplicador de fluxo de saída.

Figura 86: Teste de impressão - cilindro.



Fonte: Autor, 2024.

A impressão do cilindro de 20 mm de diâmetro de 0,5 mm de altura levou cerca de 10 minutos (Figura 86), usando 2 gramas, tendo um resultado satisfatório sobre a temperatura do bico e acabamento do filamento, como mostrado na Figura 87.

Figura 87: Resultado de impressão - cilindro.



Fonte: Autor, 2024.

A partir desta impressão, concluiu-se que a temperatura de 245°C para o bico extrusor e 75°C para a mesa de impressão são adequadas para o tipo de filamento produzido (Figura 88), similarmente aos parâmetros utilizados no PETG.

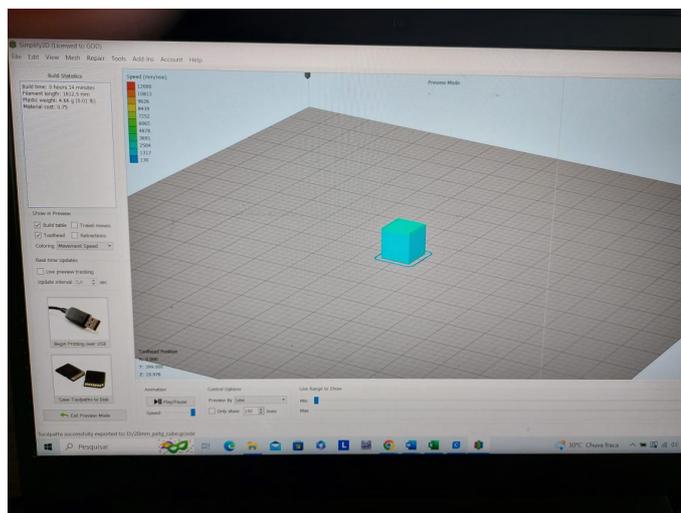
Figura 88: Parâmetros de impressão - cilindro.



Fonte: Autor, 2024.

O teste com o modelo do cubo 2x2x2 cm foi feito em outra impressora de bancada presente no laboratório *Ocean*, do modelo GTMAX 3D H5. A impressão levou cerca de 16 minutos e usando 5 gramas do filamento, como mostrado na Figura 90.

Figura 89: Fatiamento - cubo.



Fonte: Autor, 2024.

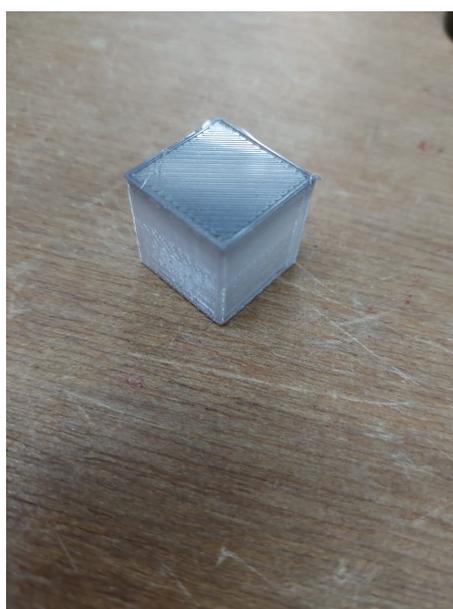
Figura 90: Parâmetros de impressão - cubo.



Fonte: Autor, 2024.

Devido um deslize da impressora, ela não parou o aquecimento depois da impressão ser finalizada e o filamento da base do cubo queimou, como pode ser visualizado na Figura 91.

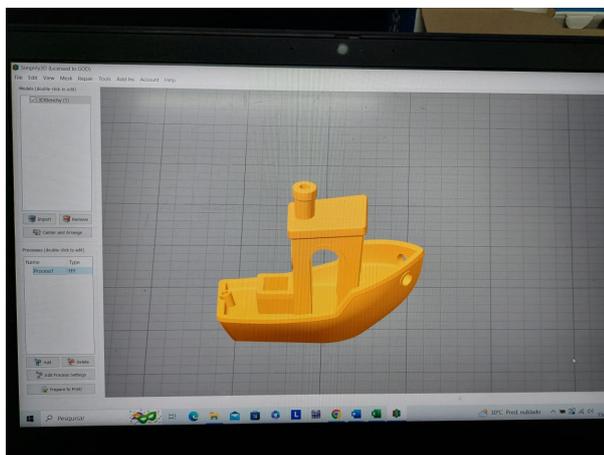
Figura 91: Resultado de impressão - cubo.



Fonte: Autor, 2024.

Após os dois modelos simples de impressão serem feitos com sucesso, para um teste de parâmetros de impressão, foi escolhido mais um modelo do *site Thingiverse*, o famoso barquinho *Benchy*.

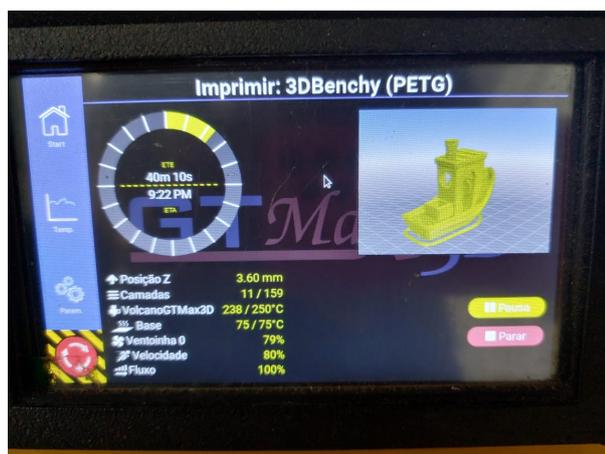
Figura 92: Fatiamento - barco *Benchy*.



Fonte: Autor, 2024.

O modelo também foi fatiado no *software "Simplify"* (Figura 92), levaria cerca de 35 minutos, com os mesmos parâmetros de impressão do cubo (Figura 93), usando 9 gramas de filamento produzido.

Figura 93: Parâmetros de impressão - barco *Benchy*.



Fonte: Autor, 2024.

A impressão teve de ser interrompida devido a um erro de continuidade na impressora. Parte do barco foi feito, porém em determinada camada, o filamento não estava sendo extrusado na peça, resultando na impressão de metade do modelo, como mostrado na Figura 94.

Figura 94: Parte impressa do barco *Benchy*.



Fonte: Autor, 2024.

Acredita-se que o problema foi causado por um erro de subextrusão, comum na impressão 3D. A causa pode ser diversos fatores como a velocidade ou a temperatura de extrusão, diâmetro do filamento, o fluxo de filamento ou o bico extrusor obstruído. No caso, o fluxo estava sendo interrompido pois mesmo que o diâmetro obtido do filamento estivesse dentro do parâmetro, utilizando uma velocidade de 1.7 mm/s, não é possível evitar que o filete assumia um formato arqueado. Dependendo da forma como o filete se arranja no bico, ele se dobra para ser extrusado, mantendo a largura correta do bico, porém sem a altura correta, como pode ser visto na Figura 95.

Figura 95: Diferença de diâmetro do filamento produzido.



Fonte: Autor, 2024.

Para este problema ser corrigido, seriam necessários mais testes verificando outros tamanhos de filete sendo extrusados em diferentes velocidades, levando muito mais tempo no processo. Também incluindo a implementação de escolha de temperaturas variáveis para o bico extrusor e um controle de velocidade de malha fechada para evitar falhas de posicionamento do motor de passo.

Para reunir os resultados obtidos da realização do testes de impressão com os filamentos produzidos de forma resumida, foi elaborado a Tabela 3:

Tabela 3: Resultados dos Testes de Impressão.

Tipo de Impressão	3D Printing Pen	Impressora Sethi 3DS4X	Impressora GTMAX 3D H5
Adesão a mesa	Ótimo	Bom	Bom
Temperatura Hot-end	235°C	245°C	245°C
Temperatura Mesa	25°C	75°C	75°C
Tempo de Impressão	6 minutos	10 minutos	1° 8 minutos 2° 35 minutos
Extrusão	Fluxo Uniforme	Fluxo Uniforme	Subextrusão
Camadas	Desreguladas e com falhas	Uniforme	Subextrusão
Vel. de Impressão	=~ 15 mm/s	60 mm/s (80%)	60 mm/s (80%)
Qualidade das peças	Baixa	Ótima	Boa - base queimada e subextrusão

Fonte: Autor, 2024

Fazendo o levantamento de custos com o projeto, com o objetivo de estimar todos os recursos necessários, desde materiais até despesas indiretas e contingências, foi elaborado a Tabela 4:

Tabela 4: Custo total do Projeto.

Componentes/Materiais	Preço
Arduino Nano 3.0	R\$ 40,00
Motor de Passo Nema 17	R\$ 80,00
Driver A4988 Motor de Passo	R\$ 17,40
Conj. Hot-end Bico + cartucho	R\$ 45,00
Cooler 12V	R\$ 19,00
Potenciometro	R\$ 4,00
Botão	R\$ 0,25
Display LCD 16x2	R\$ 29,90
Módulo Serial I2C	R\$ 14,50
Fonte de Alimentação 12V	R\$ 66,90
Resistores	R\$ 3,00
Transistores IRF44N	R\$ 39,80
Barra de Pinos Fêmea	R\$ 3,50
Barra de Pinos Macho	R\$ 3,00
Conectores Borne	R\$ 7,80
Barra roscada M8/ M4	R\$ 25,00
Base MDF	R\$ 20,00
Rolamentos/Parafusos/Porcas	R\$ 25,00
Filamentos da construção das Estruturas	R\$ 39,00
Estruturas modeladas em Alumínio	R\$ 30,00
PREÇO TOTAL	R\$ 513,15

Fonte: Autor, 2024

O custo total do projeto foi de aproximadamente R\$ 513,15, contanto com os custos de material das peças modeladas e filamentos e impressão das estruturas, sendo utilizado cerca de 370 gramas de PLA para a estrutura mecânica e cerca de 25 gramas de ABS para o filetador.

5 CONCLUSÕES

Considerando que o projeto alcançou o status onde foi possível a fabricação de filamento a partir de garrafas PET, pode-se considerar que este trabalho foi parcialmente um sucesso. Apesar do filamento gerado no projeto não estar totalmente qualificado para a utilização de impressão 3D em impressoras FDM, o projeto foi concluído com êxito.

Ao longo da realização do projeto, verificou-se a presença de diversos desafios na fabricação de filamentos a partir de filete de garrafas PET. A principal dificuldade está no processo do corte do PET, uma vez que as garrafas vêm em diferentes tamanhos e espessuras, o que pode levar a variações de qualidade e uniformidade dos filamentos (diferenças de resistência, tamanhos e transparência).

Além disso, a fabricação requer um controle do processo de reciclagem e cuidados na preparação do PET, pois o mesmo pode conter impurezas como resíduos de cola, rótulos e outros contaminantes que precisam ser removidos através de limpeza e purificação. Todos esses fatores tornam o processo longo e o filamento resultante não possui qualidade garantida. Além de que o PET é um material para filamento pouco utilizado nas impressões devido seus parâmetros de alta temperatura de extrusão e necessidade de reposição de cola na base de impressão para adesão.

Quanto às dificuldades na construção do projeto, mesmo um algoritmo de controle que funcione teoricamente seja desenvolvido, sua implementação prática pode ser desafiadora. Em sistemas onde a velocidade e a temperatura são variáveis relacionadas, sua interação deveria ser estudada com mais cuidado através da validação e teste para garantia da qualidade final. A largura e espessura do filete de PET, a velocidade de extrusão e temperatura do bico extrusor não são variáveis constantes e suas combinações precisam ser testadas para estudo da performance e desenvolvimento de um controle ro-

busto que funcione conforme o esperado em uma variedade de condições operacionais, o que infelizmente não foi possível de realizar neste projeto por levar tempo.

A modelagem estrutural mecânica também necessita maior estudo para prever o funcionamento do sistema. Pelo fato do projeto utilizar o desenho de uma estrutura pronta, sem avaliar as condições de carga, distribuição de tensão, requisitos de peso e desempenho, o sistema é suscetível de falhas prematuras que reduzem a sua confiabilidade. Com a modelagem mecânica do projeto, a estrutura garante um funcionamento adequado para melhorar a qualidade dos testes de filamento.

Outra dificuldade do projeto foi a ausência de uma zona de fusão para manter o filete cortado. Diferente de um projeto de impressora 3D que possui a estrutura do Hot-end, o projeto não possui um sistema de polia dentada com dissipador para esperar o tempo de extrusão, ocasionando problema de deformação do filete ao atingir a alta temperatura de extrusão. Sem uma área isolada, era necessário cortar o filete até um tamanho menor que o diâmetro do bico extrusor para passagem direta no bloco aquecedor já quente e puxá-lo pelo bico até atrelar à garra do bobinador, para assim começar o processo de tração do filamento.

Desta forma, a utilização do ventilador na saída do bloco aquecedor se tornou obsoleta, uma vez que o equipamento não possui a potência devida para esfriar o filamento, e por estar muito próximo do bico, pode comprometer o processo de aquecimento do bloco aquecedor.

Além da implementação de um controle mais preciso para a temperatura, é fundamental a utilização de um controle de velocidade com motor de passo com malha fechada, uma vez que uma configuração de malha aberta, sempre haverá o risco de perda de passos, e não há garantia absoluta de controle sobre a posição do motor em todos os momentos. Por isso que, em aplicações onde a precisão é crítica, é geralmente preferível utilizar um sistema de malha fechada, que forneça feedback sobre a posição real do motor e permita correções em tempo real.

A maior parte dos filamentos foram produzidos na velocidade máxima do bobinador, em uma média de 3.3 mm/s, levando cerca de 40 minutos no processo completo. Não houve grande diferença em relação ao diâmetro do filamento quando utilizado uma velocidade menor, porém percebe-se que, ao utilizar velocidades de extrusão menores como no teste de 1.7 mm/s, o filamento se forma de maneira mais circular a partir da deformação do filete ao passar pelo bico, resultando numa aparência mais uniforme.

Conclui-se que velocidades menores que 2 mm/s são as mais indicadas para a fabricação do filamento, pois a força de tração do bobinador não afetará de forma prejudicial o formato do filamento produzido. Para estas velocidades, o processo completo de fabricação do filamento leva pelo menos 1 hora e 40 minutos. Porém, neste projeto, é inevitável que o filamento assuma um formato achatado, com diferença de diâmetro, pois o bloco aquecedor não alcança temperatura necessária para fusão do filete e consequentemente, o filamento será formado apenas do arqueamento do filete.

Como visto nos testes com o filamento, esse achatamento pode ser um problema para a impressão das peças dependendo do equipamento utilizado para realizar a impressão. Enquanto que, utilizando a *3D Printing Pen*, para impressões manuais não houve problemas referentes ao fluxo, impressoras de bancada, que geralmente possuem sensores de fluxo e configurações de retração para aumentar a qualidade da peça, podem ter problemas na extrusão de filamento com diâmetros fora do padrão.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de dar continuidade à pesquisa, abordando aspectos não estudados no presente trabalho ou de melhorar as formulações apresentadas, faz-se a seguir algumas sugestões e considerações para trabalhos futuros:

- a) Observa-se a falta de um controle de temperatura apropriado para diferentes tamanhos e tipos de filete de PET, de acordo com as diferenças de estruturas das garrafas observadas nos testes de extrusão. A presença de um controle de temperaturas variadas permite a tentativa de eliminar o arqueamento do filete e possibilitar a fusão do filete em um filamento uniforme.
- b) O projeto requer um controle de velocidade apropriado, sem a regulagem manual pelo potenciômetro. A modelagem de um sistema de engrenagens eficiente para o bobinador pode auxiliar no ajuste da velocidade para a fabricação de um filamento com os parâmetros adequados, sem a necessidade de um processo longo.
- c) A criação do design de uma placa de circuito impresso própria do projeto em uma atualização futura garante a otimização do layout, minimiza interferências e melhora a eficiência elétrica. Além disso, a criação de uma PCB personalizada pode simplificar o processo de fabricação em larga escala, trazendo precisão e confiabilidade na implementação do circuito.

- d) A modelagem mecânica de uma estrutura que permita o trituração e fusão do PET e a fabricação de filamento por **extrusão aglutinada** tornaria o processo mais automático e permitiria um estudo completo de fabricação de filamentos a partir de polímeros reciclados, não apenas do PET, mas de outros materiais como ABS e PLA.
- e) Sendo uma abordagem muito utilizada para aumentar a eficiência e conveniência de sistemas, é pensado no desenvolvimento de um aplicativo de controle dedicado via celular para promover uma automatização mais inteligente e integrada do processo. Desta forma, o operador pode gerenciar e monitorar todas as operações do sistema de forma remota, com ajuste de configurações, análise de dados em tempo real e acesso ao históricos de dados.
- f) A implementação de controle via celular e sensores inteligentes pode permitir a implementação de recursos mais avançados, como aprendizado de máquina e inteligência artificial, para otimizar o desempenho, identificar padrões e fornecer dados de produtividade do sistema.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. A. C. Impressão 3d baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo. 2015.
- AGUIAR, L. D. C. D. Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3d na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2016.
- ALMEIDA, G. S. G. D.; SOUZA, W. B. D. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015.
- ANDRADE, K. *et al.* Construção de uma mini cnc plotter de baixo custo.
- ARAÚJO, F. M. U. Apostila de sistema de controle. **Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Natal, RN, 2007**.
- BAUM, L. T. Determinação do impacto do resfriamento forçado na aderência entre camadas na manufatura aditiva. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2021.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3d. **Gestão Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 3, p. 9–18, 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010. ISSN 1677-7042. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12305&ano=2010&ato=e3dgXUq1keVpWT0f1>>.
- BRUSCATO, U. M. *et al.* Uso da fabricação digital e prototipagem no desenvolvimento do projeto de produto: Análises do produto através de simulações digitais. In: **Proceedings Of The XVII Conference Of The Iberoamerican Society Of Digital Graphics-Sigradi: Knowledge-Based Design**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. [S.l.]: LTC, 2013.
- CARDOSO, L. *et al.* Desenvolvimento de um projeto para impressão 3d multimaterial utilizando um módulo extrusor duplo para impressões pessoais. **GESTÃO DA PRODUÇÃO: ORGANIZAÇÃO E PLANEJAMENTO**, Editora Científica Digital, v. 1, n. 1, p. 127–137, 2020.
- CONCEIÇÃO, M. M. *et al.* O plástico como vilão do meio ambiente. **Revista Geociências-UNG-Ser**, v. 18, n. 1, p. 50–53, 2019.
- FERREIRA, C. D. C.; MINCHIO, I. M. Projeto de uma extrusora de filamento 3d para a reciclagem de resíduos plásticos. Instituto Federal do Espírito Santo, 2022.

FERREIRA, F. F. Estudo e desenvolvimento de filamento de pet reciclado para impressoras 3d fdm. 2020.

FILHO, E. G. *et al.* **Desenvolvimento e fabricação de moldes flexíveis (TPU) de baixo custo por manufatura aditiva para produção de próteses cranianas de PMMA.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

GOMES, J. F. B.; WILTGEN, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas. **Revista Tecnologia**, v. 41, n. 1, 2020.

HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos.** [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2016.

ISMAILOV, A. S.; JO'RAYEV, Z. B. *et al.* Study of arduino microcontroller board. **Science and Education**, v. 3, n. 3, p. 172–179, 2022.

JUNIOR, E. S. S. *et al.* Desenvolvimento de um controlador pid aplicado no controle de temperatura de uma impressora 3d. **IV Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica-EnICT (ISSN: 2526-6772)**, 2019.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia.** [S.l.]: Editora Blucher, 1991.

MÉDIO, E. *et al.* Sistema de irrigação automatizada construído com arduino para aproveitar a água proveniente de ar condicionado.

NANO, A. Arduino nano. **A MOBICON Company**, 2018.

NICOLAI, G. D. *et al.* Automatização no processo de armazenamento e coleta em estoques. 2022.

NISHIMURA, P. L. G. *et al.* Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa. **Blucher Design Proceedings**, v. 2, n. 9, p. 4481–4491, 2016.

ORLANDO, A. J.; FILHO, R. R. Evolução do comando numérico computadorizado. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 606–617, 2021.

PAIVA, T. N.; NOGUEIRA, C. C. Estudo comparativo das principais tecnologias de impressão 3d no brasil. **Facit Business and Technology Journal**, v. 1, n. 24, 2021.

PINTO, C.; MAGALHÃES, P. Desenvolvimento de uma impressora 3d tipo delta. p. 1–82, 2015. @article{magalhaescaio, title={Caio Martins Luis Pinto}, author={Magalhaes, Pedro Dini}}.

PUHLMANN, H. F. W. **Módulo de display LCD.** [S.l.]: Embarcados, 2015.

RIBEIRO, M. A. Controle de processo. **Oitava edição±Tek Treinamento & consultoria±2005**, 2005.

ROMANIO, D. d. L.; REIS, A. Análise de estratégias de impressão 3d por método fdm (modelagem de deposição fundida). 2021.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A.; PAOLI, M.-A. D. Poli (tereftalato de etileno), pet: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, SciELO Brasil, v. 19, p. 121–132, 2009.

SAMPAIO, C.; MARTINS, R. A modelagem 3d virtual e a impressão 3d como ferramentas de apoio ao aprendizado na educação infantil: viabilidade e possibilidades de aplicação. **Universidade Estadual de Londrina, Londrina**, 2013.

SANTOS, D. dos *et al.* Desenvolvimento de aplicativo celular para acesso a edifícios via senhas individuais, reconhecimento facial e reconhecimento biométrico. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 20, n. 1, p. 124–149, 2020.

SANTOS, L. M. *et al.* Tipos de polímeros utilizados como matéria prima no método de manufatura aditiva por fdm: uma abordagem conceitual. **XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, 2018.

SCHIFLER, L. *et al.* Análise da eficiência de bicos de extrusão de impressora 3d.

SPINACÉ, M. A. d. S.; PAOLI, M. A. D. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química nova**, SciELO Brasil, v. 28, p. 65–72, 2005.

XAVIER, L. H. *et al.* Legislação ambiental sobre destinação de resíduos sólidos: o caso das embalagens plásticas pós-consumo. **XIII Simpósio de Engenharia de Produção**, UNESP Bauru, p. 1–11, 2006.

=

APÊNDICE A - CÓDIGO DO PROJETO

Código 1: Programação completa do Projeto

```

1 // Inclui a Biblioteca AccelStepper
2 #include <AccelStepper.h>
3 #include <Wire.h>
4 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
5 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //as vezes o endereco nao ...
    e 0x3f. Mude para 0x27 se nao funcionar.
6 #include <thermistor.h>
7 thermistor therm1(A0,0); //Conecte o termistor em ...
    A0, 0 representa TEMP_SENSOR_0 (configuracao.h para mais)
8 //PID constants
9 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
10 int kp = 90;   int ki = 30;   int kd = 80;
11 ///////////////////////////////////////////////////////////////////
12
13 int PID_p = 0;   int PID_i = 0;   int PID_d = 0;
14 float last_kp = 0;
15 float last_ki = 0;
16 float last_kd = 0;
17
18 int PID_values_fixed =0;
19 // Define os pinos de conexao
20 const int EN= 2;
21 const int DIR = 4;
22 const int STEP = 3;
23 int speed_pot = A1;
24 int PWM_pin = 5;
25 int PWM_pin1 = 6; //Pino para sinal PWM para o driver MOSFET ...
    (o BJT npn com pullup)
26 int but1 = 7;

```

```

27 int LED = 13;
28
29 //Variaveis
30 float set_temperature = 200;          //Ponto de ajuste de ...
    temperatura padrao. Deixe-o em 0 e controle-o com encoder ...
    rotativo
31 float temperature_read = 0.0;
32 float PID_error = 0;
33 float previous_error = 0;
34 float elapsedTime, Time, timePrev;
35 float PID_value = 0;
36 int button_pressed = 0;
37 int menu_activated=0;
38 float last_set_temperature = 0;
39 int max_PWM = 255;
40
41 //Variaveis de passo
42 int max_speed = 50;
43 int main_speed = -50;
44 bool but1_state = true;
45 bool activate_stepper = false;
46 int rotating_speed = 0;
47
48 // Defina o tipo de interface do motor
49 #define InterfaceMotor 1
50
51 // Cria uma instancia
52 AccelStepper stepper = AccelStepper(InterfaceMotor, STEP, DIR);
53
54 void setup() {
55     lcd.init();
56     lcd.backlight();
57     lcd.clear();
58     lcd.setCursor(0,0);
59     lcd.print("Tmp: ");
60     lcd.setCursor(0,1);
61     lcd.print("Spd: ");
62     pinMode(EN, OUTPUT);
63     digitalWrite(EN, HIGH);          //Driver de passo esta desativado
64     stepper.setMaxSpeed(max_speed);
65     pinMode(but1, INPUT_PULLUP);
66     pinMode(speed_pot, INPUT);

```

```

67  pinMode(LED, OUTPUT);
68  digitalWrite(LED, LOW);
69
70  pinMode(PWM_pin, OUTPUT);
71  TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010;    // Frequencia ...
        D6 e D5 PWM de 7812,50 Hz
72  Time = millis();          //configura o Timer 0 do arduino ...
        para gerar um PWM com certa frequencia
73
74  //registradores de controle do Timer 1
75  TCCR1A = 0;                //Redefina todo o registro TCCR1A
76  TCCR1B = 0;                //Redefina todo o registro TCCR1A
77  TCCR1A |= B00000010;      //configura Timer 1 com prescaler ...
        de 8 divisor de freq.
78  TCNT1 = 0;                //Redefine o valor do Timer 1 para 0
79
80  pinMode(PWM_pin1, OUTPUT);
81  TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000010;
82  Time = millis();
83
84  TCCR1A = 0;
85  TCCR1B = 0;
86  TCCR1A |= B00000010;
87  TCNT1 = 0;
88  }
89  void loop() {
90    if (millis() % 1000 == 0){
91      temperature_read = therm1.analog2temp(); // ler temperatura
92      rotating_speed = ...
        map(analogRead(speed_pot), 0, 1024, main_speed, max_speed);
93    }
94    if (millis() % 4000 == 0){
95      lcd.setCursor(5, 0);
96      lcd.print(temperature_read);
97      lcd.setCursor(5, 1);
98      lcd.print("      ");
99      lcd.setCursor(5, 1);
100     lcd.print(rotating_speed);
101   }
102
103   // Verificacao botao
104   if(!digitalRead(but1) && but1_state){

```

```

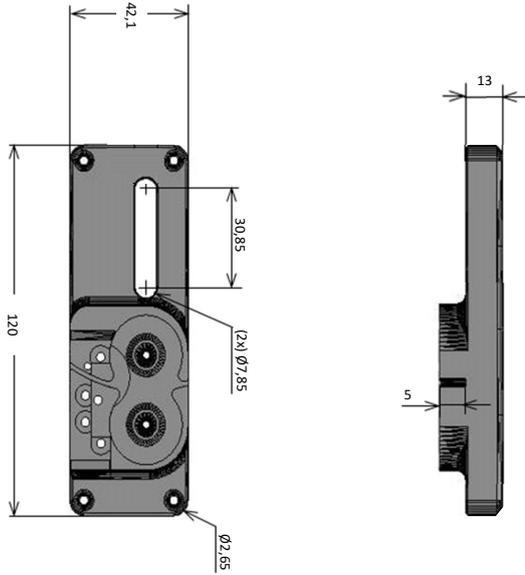
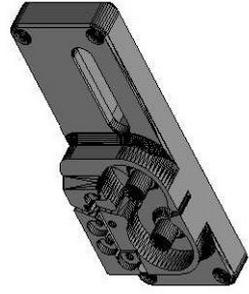
105     but1_state = false;
106     activate_stepper = !activate_stepper;
107     delay(10);
108 }
109 else if(digitalRead(but1) && !but1_state){
110     but1_state = true;
111 }
112
113 if(activate_stepper){
114     digitalWrite(LED, HIGH);
115     digitalWrite(EN, LOW);    //Ativamos driver de passo
116     stepper.setSpeed(rotating_speed);
117 }
118 else
119 {
120     digitalWrite(EN, HIGH);    //Desativamos o driver de passo
121     digitalWrite(LED, LOW);
122     stepper.setSpeed(0);
123 }
124 stepper.runSpeed();
125
126 //Controle de Temperatura
127 //Em seguida, calculamos o erro entre o ponto de ajuste e o ...
128     valor real
129     PID_error = set_temperature - temperature_read;
130 //Calcular o valor P
131 PID_p = 0.01*kp * PID_error;
132 //Calcule o valor I em um intervalo
133 PID_i = 0.01*PID_i + (ki * PID_error);
134
135 //Para derivada, precisamos de tempo real para calcular a ...
136     taxa de mudanca de velocidade
137 timePrev = Time;                // a hora anterior e ...
138     armazenada antes da leitura da hora real
139 Time = millis();                // leitura em tempo real
140 elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000;
141 //Agora podemos calcular o valor D
142 PID_d = 0.01*kd*((PID_error - previous_error)/elapsedTime);
143 //O valor total final do PID e a soma de P + I + D
144 PID_value = PID_p + PID_i + PID_d;
145

```

```
144
145 //Definimos a faixa de PWM entre 0 e 255
146 if(PID_value < 0){
147     PID_value = 0;
148 }
149 if(PID_value > max_PWM){
150     PID_value = max_PWM;
151 }
152
153 if(PID_value < 0){
154     PID_value = 0;
155 }
156 if(PID_value > max_PWM){
157     PID_value = max_PWM;
158 }
159 //Agora podemos escrever o sinal PWM para o mosfet no pino ...
    digital D5
160 analogWrite(PWM_pin,PID_value);
161 previous_error = PID_error; //Armazena o erro anterior ...
    para o proximo loop.
162
163 analogWrite(PWM_pin1, PID_value);
164 previous_error ≥ PID_error;
165 }
166 ISR(TIMER1_COMPA_vect){
167     TCNT1 = 0; //Primeiro, defina o ...
        cronometro de volta para 0 para que ele seja redefinido ...
        para a proxima interrupcao
168     stepper.runSpeed();
169 }
```

=

APÊNDICE B - DESENHOS DAS MODELAGENS 3D



GENERAL NOTES FOR PLASTIC:

- 3D CAD file
- fabricate per 3D CAD file according JT or STEP-file with part number and revision as on this drawing
- for dimensional data, that isn't shown in the drawing, see 3D file under compliance with general tolerances

Unless otherwise specified

- ejector pin marks: flush to 0.5 mm recessed
- gate trim: flush to 0.75 mm below surface or below surrounding surface when the gate is purposely recessed
- flash plus mismatch: 0.25 mm max.
- surface finish is Sp1 B3

Part identification:

- The following information to be legibly recessed on a non-functional, non-cosmetic surface of the molded component:

- part number
- molding date code (month and year)
- material abbreviation
- multiple cavities must be identified

□ denotes critical to quality dimensions (CTQ)

- tolerances in squared brackets [xxx]:
- accepted deviations for part made from current production tooling only
- any new tooling must target original part tolerances

SPECIFIC NOTES FOR PLASTIC:

- Part information:
- approx. volume 55606.04 mm³ (cubic mm)
 - nominal wall thickness XX mm (optional)
 - default draft angle X°

Material:

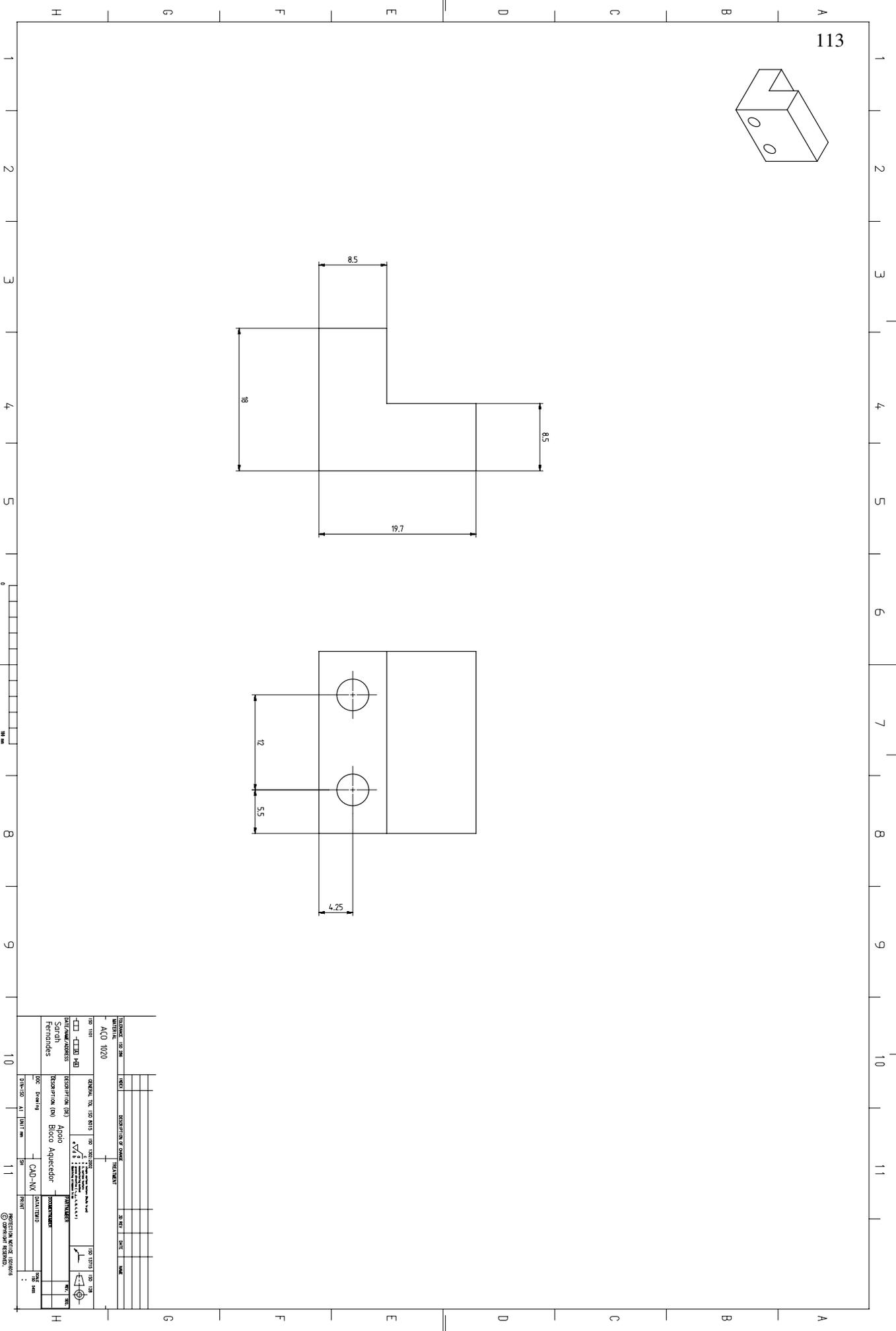
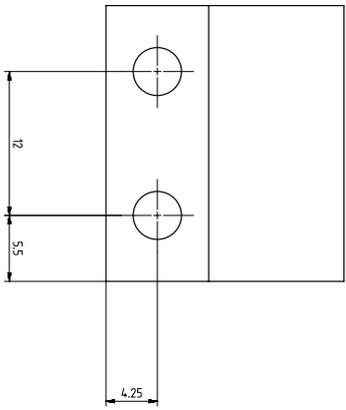
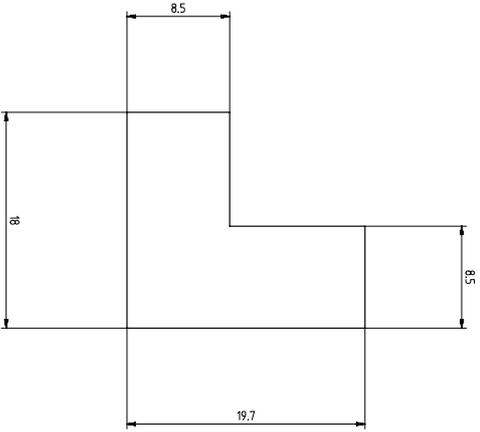
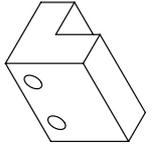
- must be flameability recognized to UL (DQHFZ1 minimum: 94, XXX - for PA, only) Part has to be conditioned so that the water absorption is between XX % and XX %. This has to be done directly after molding the part. The water absorption has to be controlled by the weight of the part (weight) directly after molding compared to weight after conditioning. The FA report has to be done when the water absorption is in the range of XX % and XX %. Measurements have to be done @ 20° C / 50% rel. H.

Measurement:

- align part for inspection using reference system [A][B][C] as defined
- all measurements in natural position (w/o any fixation or forces)
- for surfaces with mold draft apply the maximum material requirement (MMR) (see picture)

TOLERANCE	ISO 286	INDEX	DESCRIPTION OF CHANGE	TREATMENT	3D REV	DATE	NAMC
MATERIAL							
AS5							
ISO 1101							
GENERAL TOL. ISO 8015							
ISO 13015							
ISO 128							
DATE/NAME/ADDRESS							
FILETADOR DE PET							
DESCRIPTION (DE)							
DESCRIPTION (EN)							
PET FILLER							
DRAWING							
DIM-ISO A1							
DIMENSION mm							
Sri 1							
PRINT							
SCALE							
1:1							

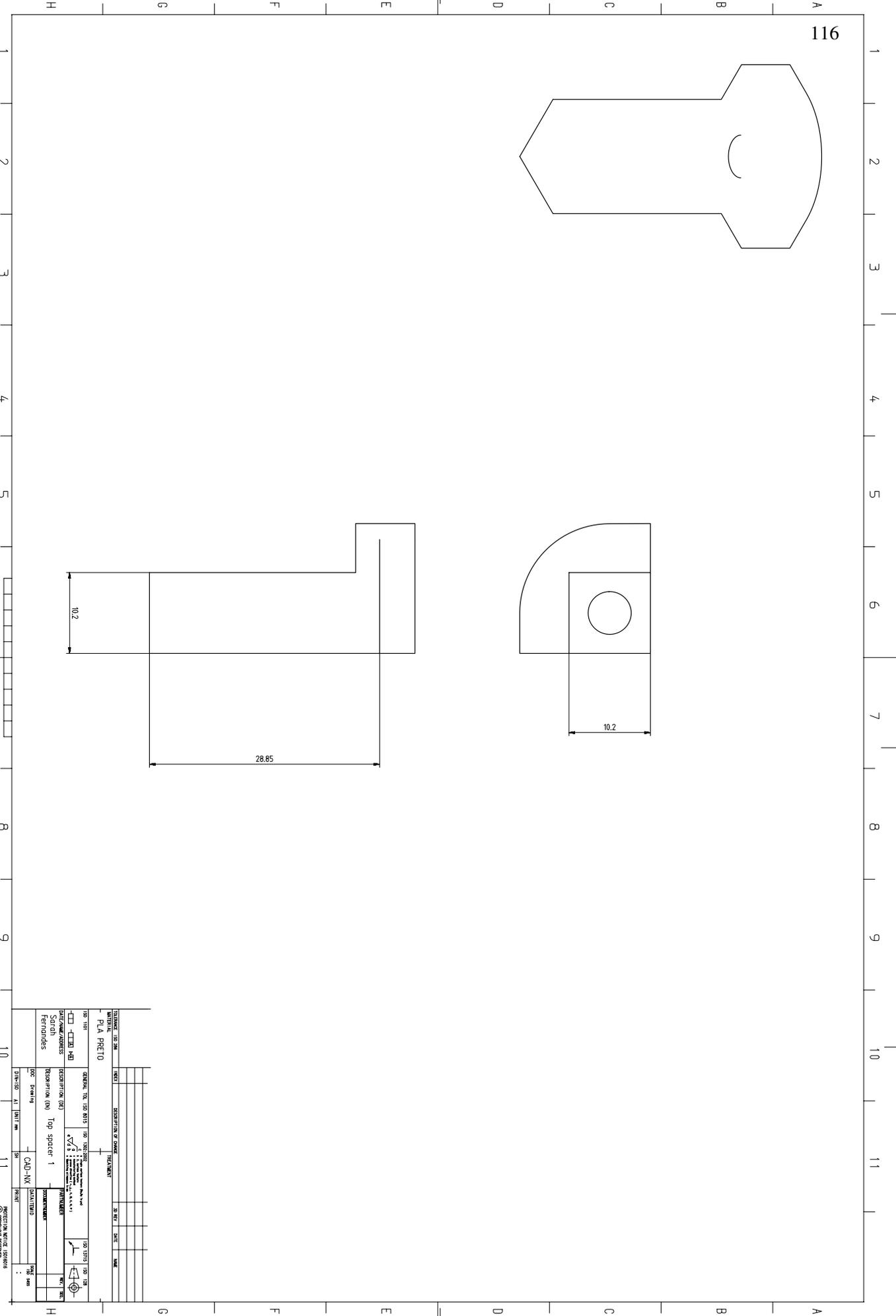
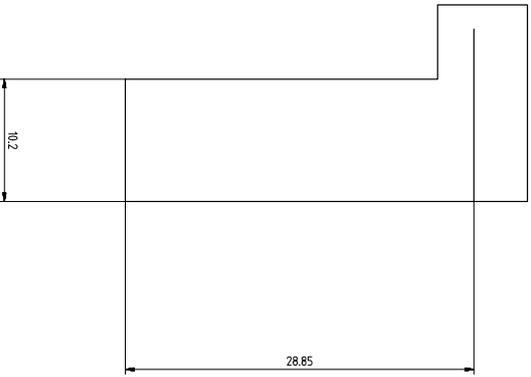
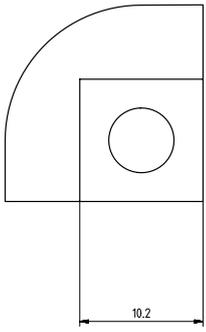
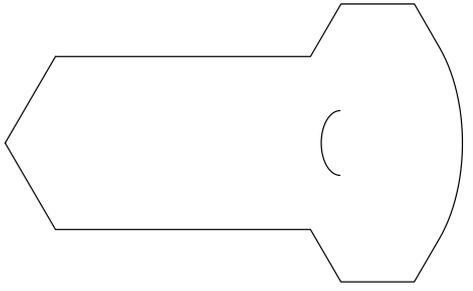
113



NO.	REVISION	DATE	BY	CHKD.	DESCRIPTION

MATERIAL		FINISH	
ACO 1020			
PART NAME / ADDRESS		PART NUMBER	
Sarruh		APOLO	
Fernandes		BLOCO AQUECEDOR	
DCC - Drawing		CAD-VX	
DISTRIBUICAO		DATA/TIPO	

116

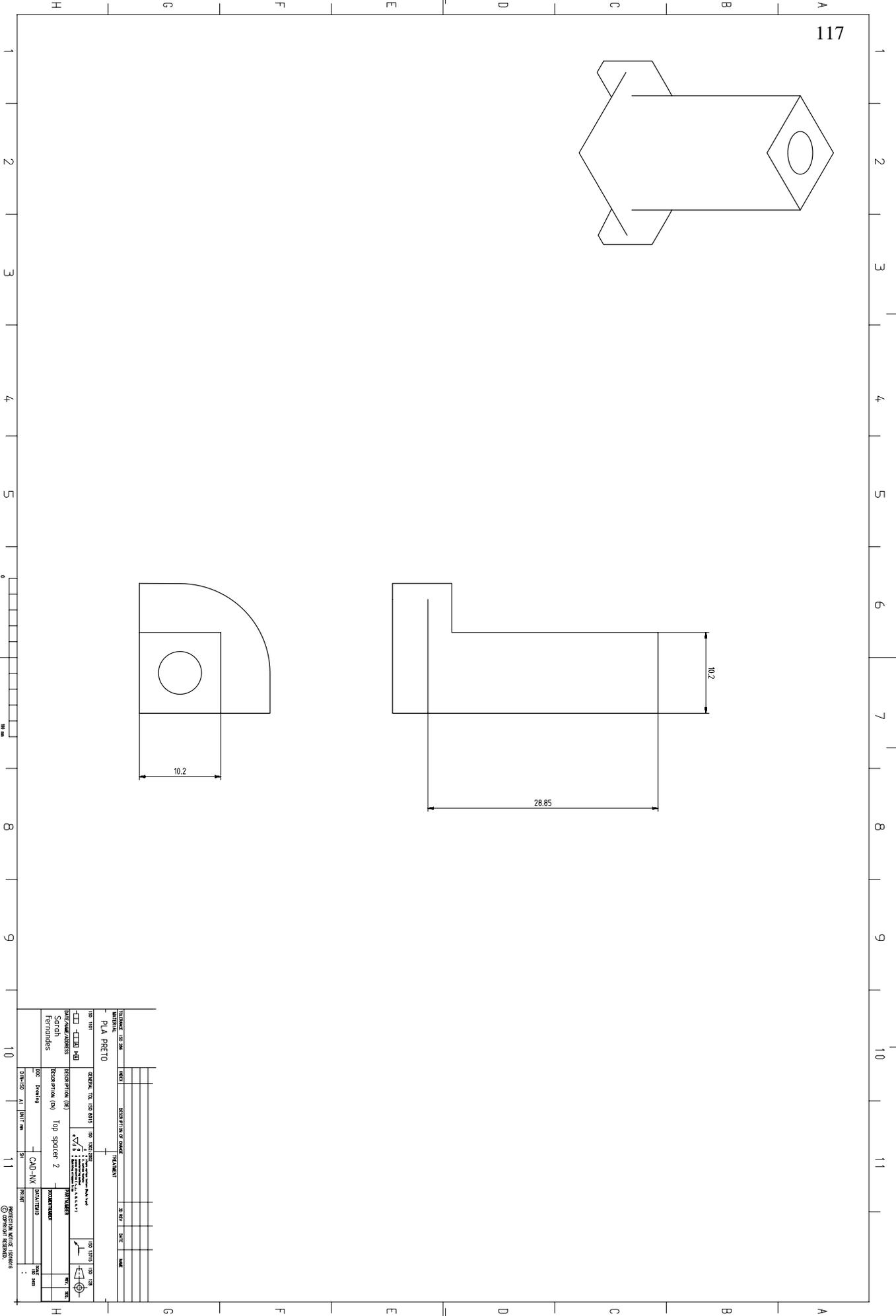
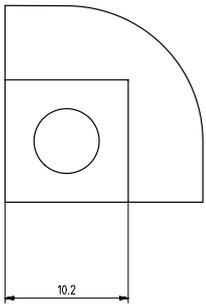
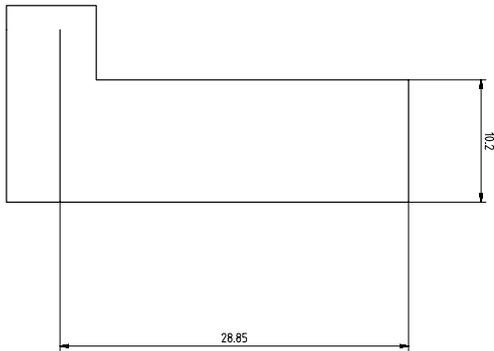
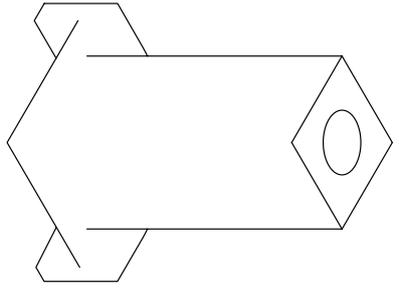


ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT	QTY	DATE	NAME
1	PLA PRECIO				

DESCRIPTION (EN)	DESCRIPTION (ES)	QUANTITY	UNIT	DATE	NAME
Top spacer 1	Top spacer 1	1	mm		

DATE	BY	CHKD	APP'D
2023-11-11	CAD-VX		

© 2023 BY THE AUTHOR



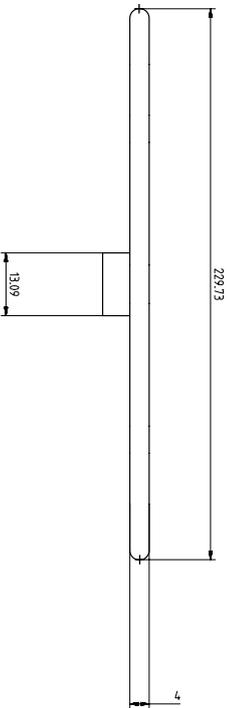
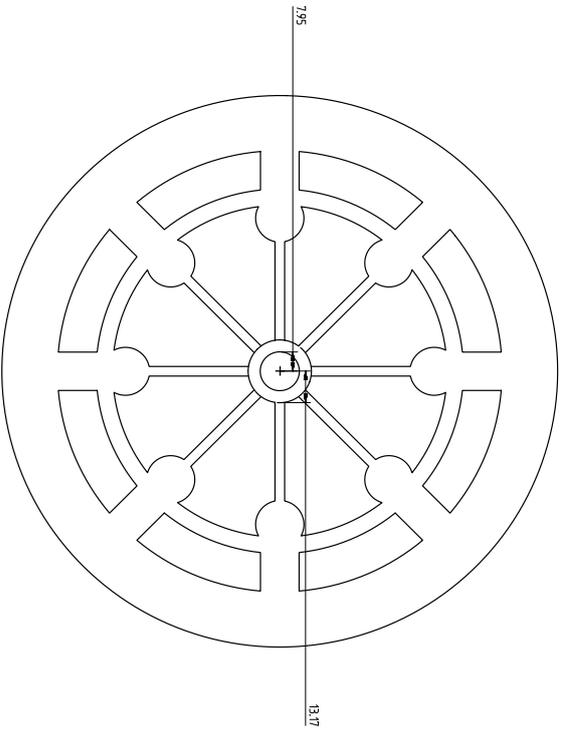
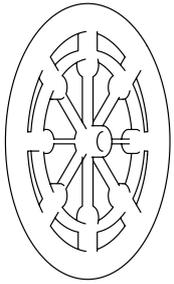
NO.	DESCRIPTION	DATE	BY	CHKD.
1	PLA PFC10			
2	Top spacer 2			

DESIGNER	DATE	SCALE	PROJ. NO.
PLA PFC10			
DESIGNER	DATE	SCALE	PROJ. NO.
DESIGNER	DATE	SCALE	PROJ. NO.

DESIGNER	DATE	SCALE	PROJ. NO.
DESIGNER	DATE	SCALE	PROJ. NO.

=

ANEXO A - DESENHOS DAS ESTRUTURAS EM STL

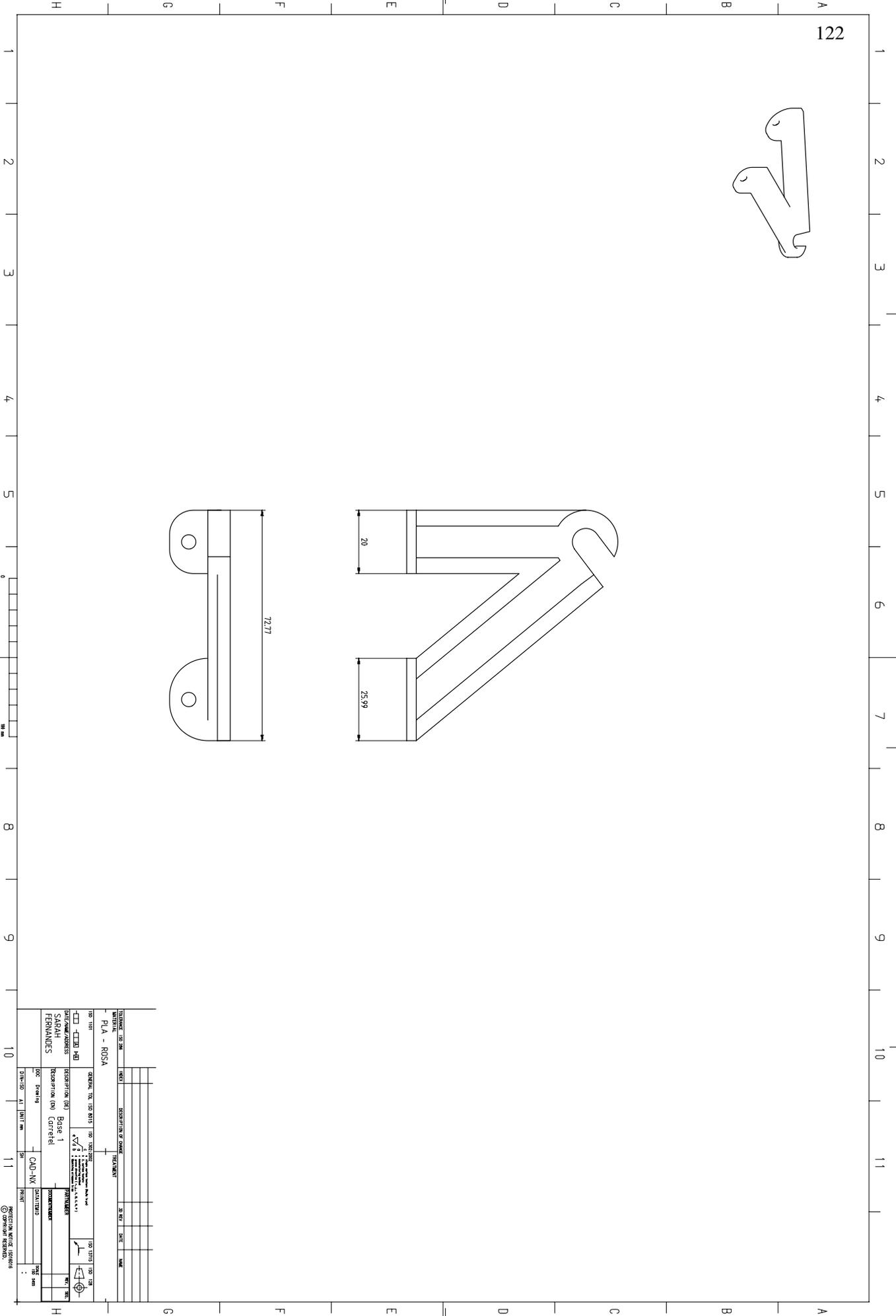
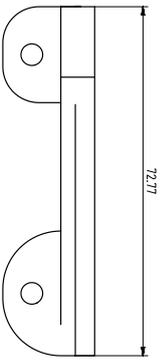
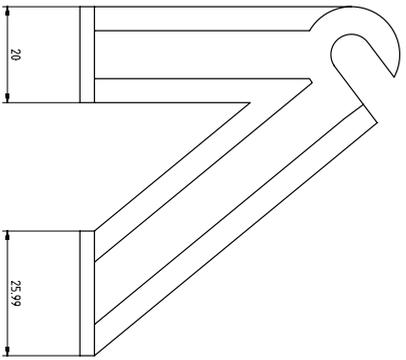
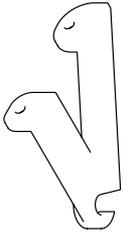


NO	REVISION	DATE	DESCRIPTION OF CHANGE	BY	CHK	DATE	NAME

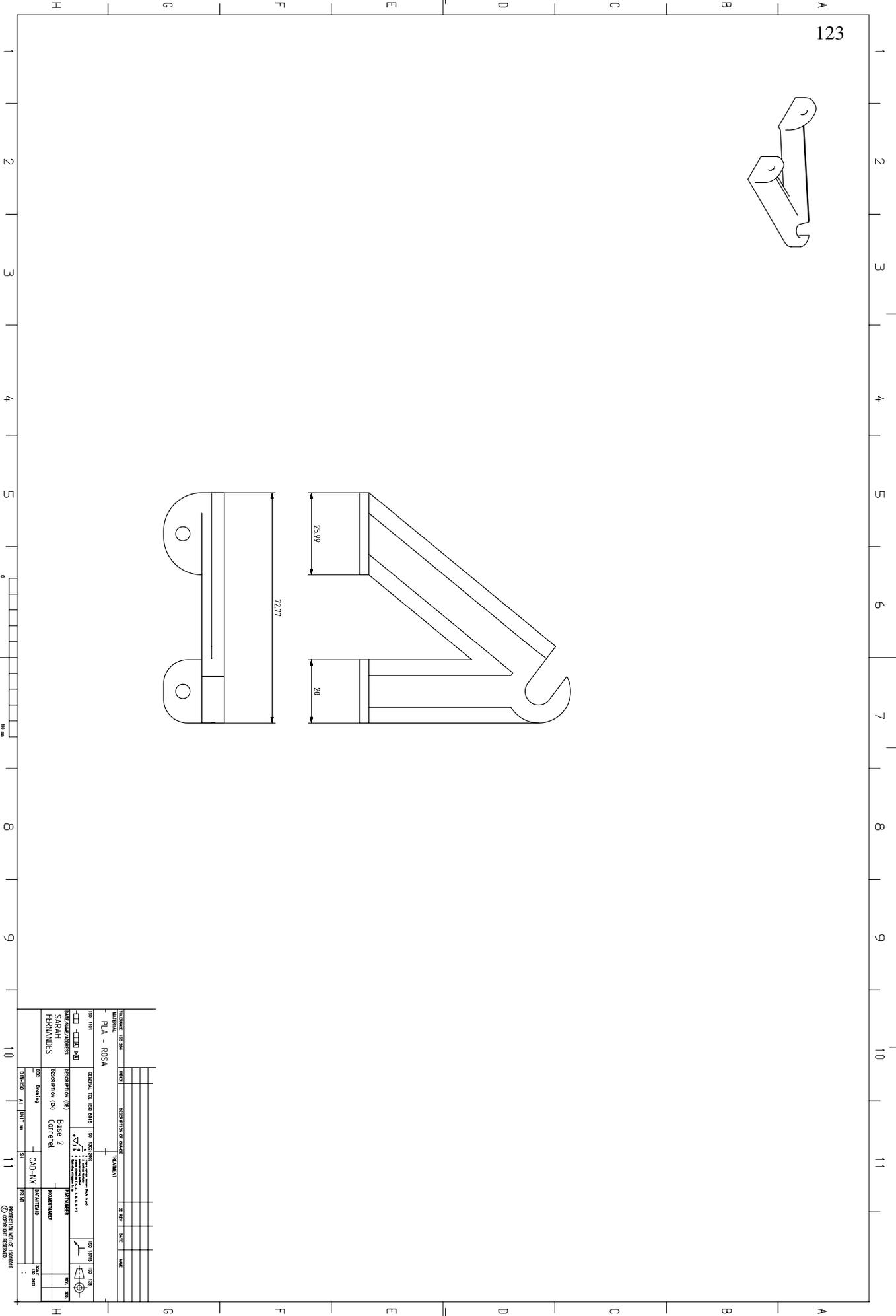
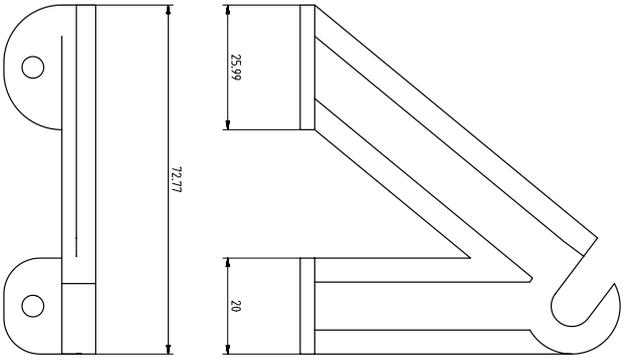
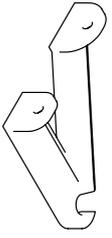
MATERIAL		PLA - ROSA	
150 1181	GENERAL (NO. 150 8013)	150 1022 050	150 13711 150 718
DATE/NAME/ADDRESS	DESCRIPTION (NO)	PROJECT/NUMBER	POST/NUMBER
SARAH FERNANDES	CONFERE	CAD-VX	
DESCRIPTION (NO)	ANALISE	DATA/TITULO	OFFICE
150 1181	150 1022 050		

DATE/NO	AI	UNIT	mm	BY	CHK	DATE	NAME

© 2014 CAD-VX



ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT	QTY	DATE	REVISION
150-1181	PLA - ROSA				
150-1182	Base 1				
150-1183	Carretil				

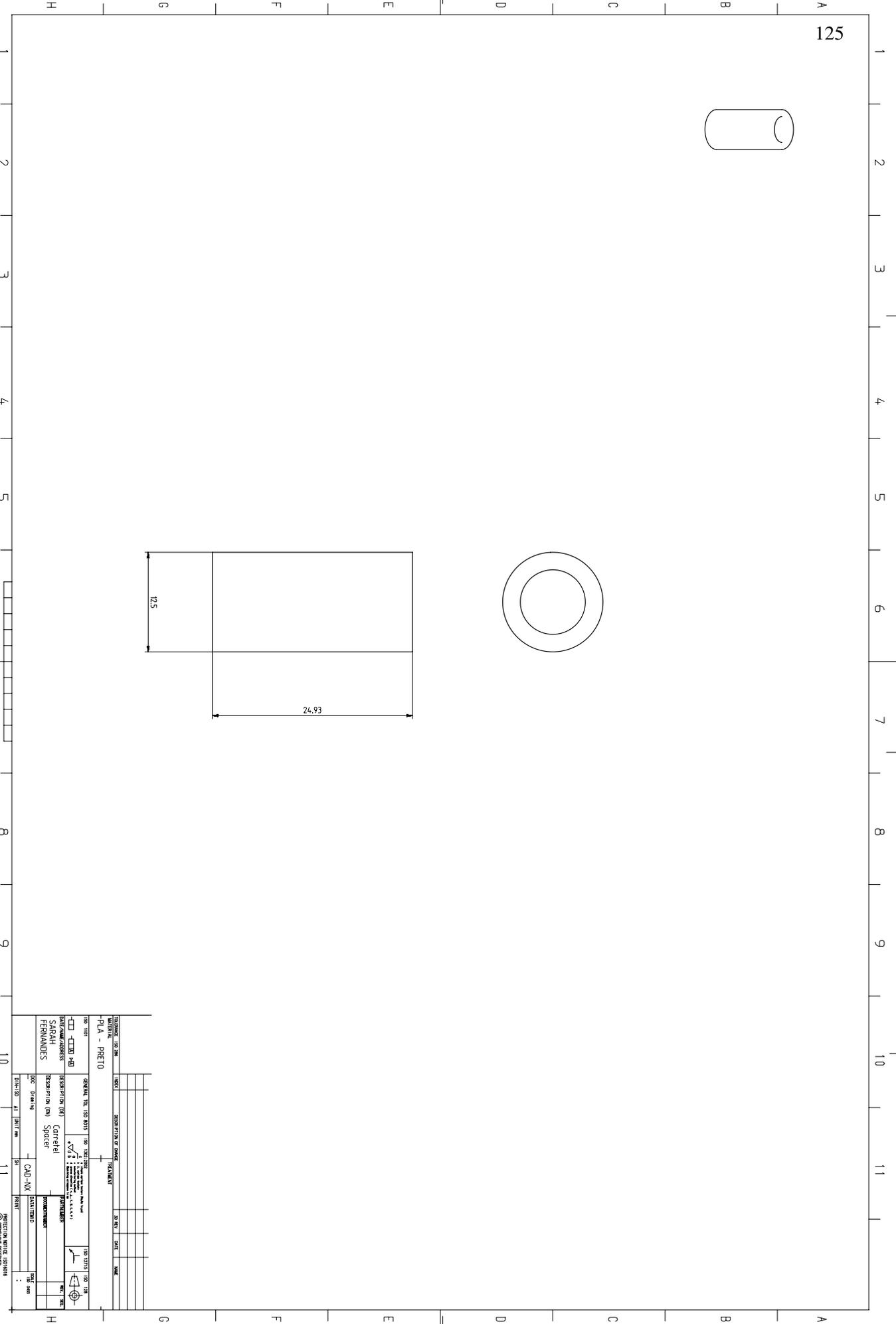
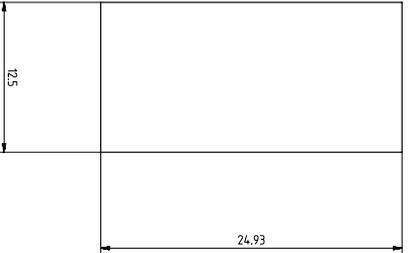
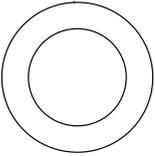


REVISION	DATE	DESCRIPTION	BY	CHKD
1	15/02/2025	PLA - ROSA		

150 1181	150 1371	150 1381	150 1391	150 1401	150 1411	150 1421	150 1431	150 1441	150 1451	150 1461	150 1471	150 1481	150 1491	150 1501	150 1511	150 1521	150 1531	150 1541	150 1551	150 1561	150 1571	150 1581	150 1591	150 1601
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

150 1181	150 1371	150 1381	150 1391	150 1401	150 1411	150 1421	150 1431	150 1441	150 1451	150 1461	150 1471	150 1481	150 1491	150 1501	150 1511	150 1521	150 1531	150 1541	150 1551	150 1561	150 1571	150 1581	150 1591	150 1601
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

150 1181	150 1371	150 1381	150 1391	150 1401	150 1411	150 1421	150 1431	150 1441	150 1451	150 1461	150 1471	150 1481	150 1491	150 1501	150 1511	150 1521	150 1531	150 1541	150 1551	150 1561	150 1571	150 1581	150 1591	150 1601
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

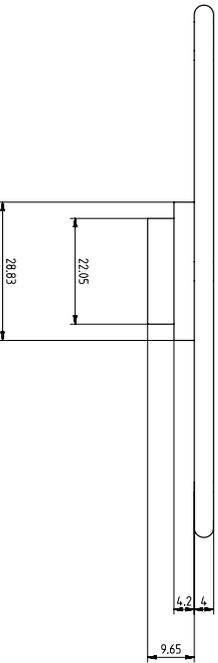
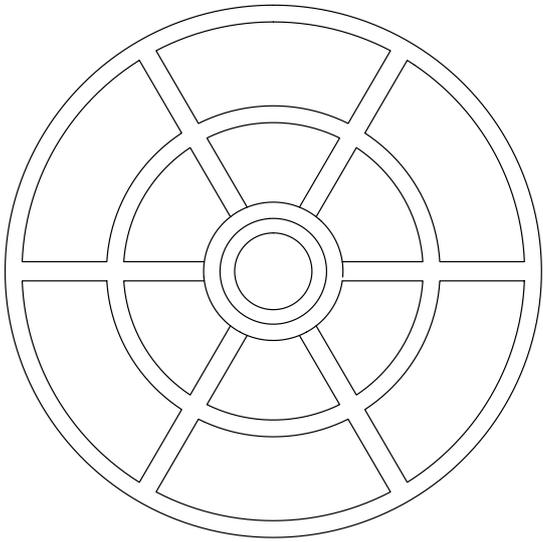
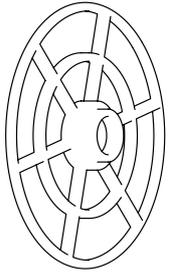


ITEM NO.	DESCRIPTION	UNIT	QTY	DATE	REVISION
1	PLA - PRETO				

150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718
150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718

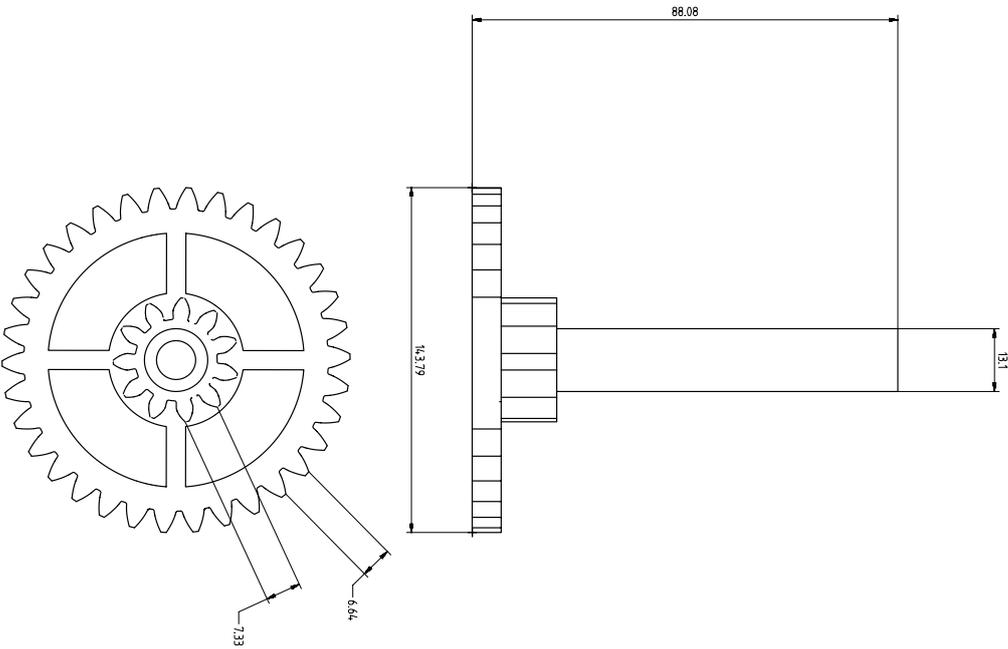
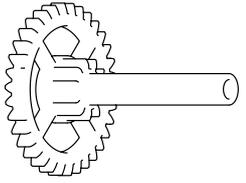
150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718
150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718

150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718
150 1181	GENERAL (NO. 150 801)	150 1020 050	150 13711	150 718



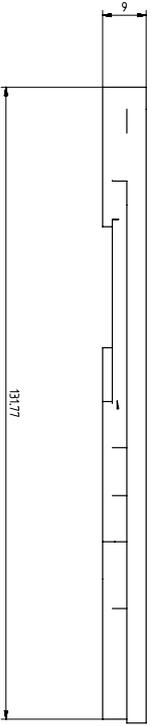
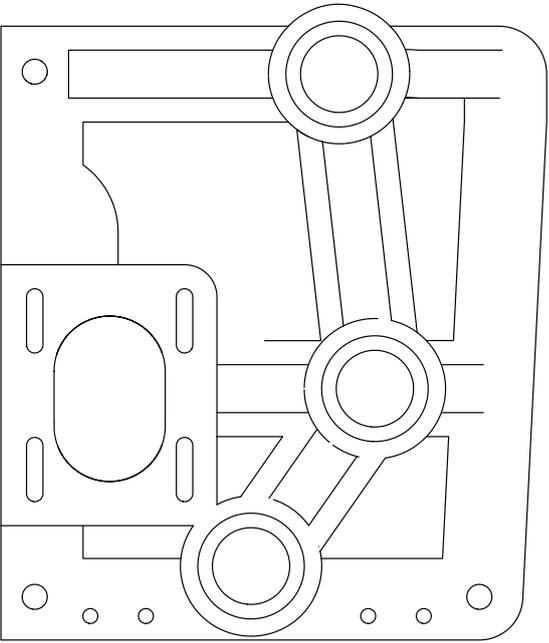
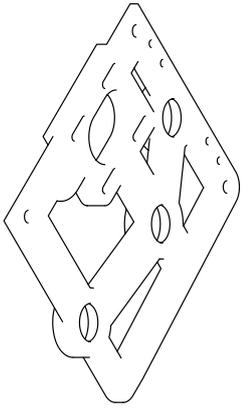
REVISION	DATE	DESCRIPTION	BY	CHKD
1		PLA - ROSA		

150 1181	GENERAL (NO. 150 8013)	150 1020 050	150 13717	150 718
DATE/ISSUE/ADDRESS	DESCRIPTION (NO)	QUANTITY	UNIT	PRICE
SARAH FERNANDES	Carretil 1			
DOC: Drawing	CAD: NX	DATE/TITLE	SCALE	OFF: mm
DIVISION: AI	UNIT: mm	BY:	CHKD:	DATE:



NO.	REVISION	DATE	BY	CHKD.	DESCRIPTION
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

MATERIAL : - PLA - ROSA	REVISION : - 1	DATE :	BY :	CHKD :
DRAWING : SARAH FERNANDES	DESCRIPTION : Gear 1	PROJECT : CAD-XX	DATE :	BY :
SCALE :	SHEET :	TOTAL SHEETS :	DRAWN :	CHECKED :



H
G
F
E
D
C
B
A

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11

9
13177
9 mm

REVISION	DATE	DESCRIPTION OF CHANGE	BY	DATE	NAME
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					

MATERIAL :
- PLA - ROSA

DATE/DRAWN/ADDRESS :
SARAH FERNANDES

DESCRIPTION (01) :
LIDER 1

DESCRIPTION (02) :
BOUNDOU

DATE/ISSUE :
20/05/2024

SCALE :
1:1

PROJECT/CLIENT :
CAD-XX

DATE/TITLE :
20/05/2024

OFFICE :
133

COMPANY/REVISION :
© COMPANY/REVISION

