

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

BERNARDO HENRIQUE DE MORAIS RODRIGUES

ROBÔ CARTESIANO CNC:

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO MULTIFUNCIONAL

UBERLÂNDIA

2017

BERNARDO HENRIQUE DE MORAIS RODRIGUES

ROBÔ CARTESIANO CNC:

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO MULTIFUNCIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado como exigência parcial para
obtenção de grau de bacharel em
Engenharia Mecatrônica, à Faculdade de
Engenharia Mecânica – FEMEC, da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul
Zanlucchi de Souza Tavares.

UBERLÂNDIA

2017

BERNARDO HENRIQUE DE MORAIS RODRIGUES

ROBÔ CARTESIANO CNC:

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM ROBÔ CARTESIANO MULTIFUNCIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado como exigência parcial para
obtenção de grau de bacharel em
Engenharia Mecatrônica, à Faculdade de
Engenharia Mecânica – FEMEC, da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul
Zanlucchi de Souza Tavares.

Uberlândia, 16 de Julho de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares – UFU
Orientador

Profa. Dra. Vera Lúcia D. S. Franco – UFU
Examinadora

Prof. Ms. Rodrigo Nogueira Cardoso – UFU
Examinador

RODRIGUES, Bernardo Henrique de Moraes. **Robô Cartesiano Cnc**: Projeto e construção de um robô cartesiano multifuncional. 2017. **Nº de Páginas - 90 p.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

RESUMO

Robôs cartesianos são um grupo da robótica onde as máquinas CNC estão inseridas. Essas por sua vez são máquinas automáticas de movimento bem definido e específico, controladas por comando numérico computadorizado. São utilizadas em trabalhos específicos, em sua maioria para produção de peças mecânicas podendo essa ser por usinagem, corte, impressão tridimensional, entre outras, apresentando características de boa repetibilidade, precisão e confiabilidade. Esse trabalho apresenta a concepção de uma máquina CNC de movimento cartesiano em três eixos, objetivando a multifuncionalidade, sendo versátil o suficiente para trabalhar com mais de um tipo de método de fabricação mecânica. Serão abordados os principais componentes desse tipo de máquina, as soluções existentes para movimentação, tração, controle, estrutura, instrumentação, software e firmware. Também será discutido um pouco do que cada solução traz de vantagens, desvantagens e custos, além de finalmente selecionar os componentes ideais para o projeto. O protótipo final será realizado e apresentado nesse trabalho, trazendo as principais conclusões da experiência. Finalmente, serão apresentados e criticados os resultados obtidos com a máquina construída.

Palavras-chave: Robô cartesiano. Robô linear. Máquina CNC. Comando numérico. Automação. Impressão 3D. Usinagem. CNC router. Três eixos.

RODRIGUES, Bernardo Henrique de Morais. **Robô Cartesiano Cnc**: Projeto e construção de um robô cartesiano multifuncional. 2017. **Nº de Páginas - 90** p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ABSTRACT

Cartesian robots are a group of robotics where CNC machines are inserted. They in their turn, are specific and well defined movement automatic machines, controlled by computer numerical control. They are applied in specific jobs, mostly to manufacture mechanical parts, being able to milling, cutting, 3D printing, among others, presenting characteristics of good repeatability, precision and reliability. This monograph presents the design of a cartesian movement CNC machine, aimed at multifunctionality, being versatile enough to work with more than one type of mechanical manufacturing method. It will be covered the main systems which make up these machines, such as existing solutions for movement, traction, control, structure, instrumentation, software and firmware. It will be also discussed a bit of each alternative's advantages, disadvantages and costs, followed by the selection of the ideal components for the project. The final prototype will be built and presented in this document, bringing the main conclusions from the experiment. Finally, the results obtained with the built machine will be presented and criticized.

Keywords: Cartesian robot. Linear robot. CNC machine. Numeric command. Automation. 3D print. Machining. CNC router. Three axes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação de um Gantry Robot [Fonte: https://goo.gl/zzQWky].	1
Figura 2. Robô industrial para movimentar peças [Fonte: https://goo.gl/pU5phv].	2
Figura 3. Robô cartesiano industrial [Fonte: https://goo.gl/VdmPVY].	2
Figura 4. CNC Router modelo RG510 XHDS 5 eixos [Fonte: https://goo.gl/aXRP5p].	3
Figura 5. CNC Router Titan X S40 5 Eixos [Fonte: https://goo.gl/aXRP5p].	3
Figura 6. CNC industrial de corte à plasma [Fonte: https://goo.gl/qhpQTV].	4
Figura 7. Usinagem 3D por uma máquina CNC [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	4
Figura 8. CNC Router multicabeçote [Fonte: https://goo.gl/aXRP5p].	5
Figura 9. CNC soldadora ultrassônica com 14,6 metros [Fonte: https://goo.gl/aXRP5p].	5
Figura 10. Guia trapezoidal e patins [Fonte: https://goo.gl/hgR2ex].	8
Figura 11. Guia em gaiola de agulhas e patins [Fonte: https://goo.gl/C4xUyB].	9
Figura 12. Eixo circular e rolamento linear [Fonte: https://goo.gl/P7uYjg].	10
Figura 13. Eixos circulares com rolamentos lineares abertos [Fonte: https://goo.gl/u99YzL].	11
Figura 14. Rolamento radial com trilho em [Fonte: https://goo.gl/3S7CCB].	11
Figura 15. Buchas de movimentação em nylon e bronze [Fonte: https://goo.gl/zZoq5m].	12
Figura 16. Rolamento de esferas radial [Fonte: https://goo.gl/gRihtz].	13
Figura 17. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: https://goo.gl/qvtKQZ].	13
Figura 18. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: https://goo.gl/zvcMwk].	14
Figura 19. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	14
Figura 20. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	14
Figura 21. Polias em alumínio e correia [Fonte: https://goo.gl/pvHmFy].	15
Figura 22. Sistema de tracionamento por cabo de aço [Fonte: https://goo.gl/cv25aZ].	16
Figura 23. Sistema de tracionamento por coroa e corrente [Fonte: https://goo.gl/cv25aZ].	16
Figura 24. Tracionamento por pinhão e cremalheira [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	17
Figura 25. Fuso de esferas recirculantes [Fonte: https://goo.gl/BoQWRP].	18
Figura 26. Fuso trapezoidal com castanha em bronze [Fonte: https://goo.gl/5o3jhN].	19
Figura 27. Fuso trapezoidal com castanha em nylon [Fonte: https://goo.gl/gnShkG].	19
Figura 28. Barra roscada e porca [Fonte: https://goo.gl/P3TzNK].	20
Figura 29. Barra de alumínio estrutural [Fonte: https://goo.gl/Q9a1w4].	21
Figura 30. Barras de aço quadradas – metalon [Fonte: https://goo.gl/ALWKeu].	21
Figura 31. Chapas de aço diversas, dobradas e cortadas [Fonte: https://goo.gl/YREBvU].	22
Figura 32. Viga estrutural em I [Fonte: https://goo.gl/DY6FiD].	22
Figura 33. CNC com estrutura em metalon – pés [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	23
Figura 34. CNC com estrutura em metalon [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	23
Figura 35. CNC com estrutura em chapa de aço [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	24
Figura 36. Drivers de controle para motores de passo [Fonte: https://goo.gl/WeHbwa].	25
Figura 37. Fluxograma para novo projeto CNC [Fonte: https://goo.gl/a7qHpe].	28
Figura 38. Motor de passo do tipo Nema 17 [Fonte: https://goo.gl/nf9AYt].	29
Figura 39. Esquema motor de passo de ímã permanente [Fonte: https://goo.gl/myw8u5].	30
Figura 40. Esquema motor de passo de relutância variável [Fonte: https://goo.gl/myw8u5].	30
Figura 41. Esquema motor de passo híbrido [Fonte: https://goo.gl/myw8u5].	31
Figura 42. Esquema de motor de passo unipolar [Fonte: https://goo.gl/AX5Qdy].	31

Figura 43. Esquema de motor de passo bipolar [Fonte: https://goo.gl/AX5Qdy].	32
Figura 44. Bobinas energizadas por full step em wave drive [Fonte: https://goo.gl/vzT9ZB].	33
Figura 45. Bobinas energizadas por full step em full drive [Fonte: https://goo.gl/vzT9ZB].	33
Figura 46. Bobinas energizadas por half step [Fonte: https://goo.gl/vzT9ZB].	34
Figura 47. Acionamento em micro step [Fonte: próprio autor].	35
Figura 48. Esquema de controle em malha aberta [Fonte: próprio autor].	36
Figura 49. Controle em malha aberta de uma CNC [Fonte: próprio autor].	36
Figura 50. Identificação dos eixos de movimentação X, Y e Z [Fonte: próprio autor].	38
Figura 51. Projeto final renderizado [Fonte: próprio autor].	39
Figura 52. Requisitos de projeto de uma CNC – simplificação [Fonte: próprio autor].	39
Figura 53. Condições adotadas para o projeto [Fonte: próprio autor].	40
Figura 54. Componentes do sistema de movimentação [Fonte: https://goo.gl/qkwfb5].	41
Figura 55. Carro projetado para movimentação em X e Y [Fonte: próprio autor].	41
Figura 56. Rolamento linear LM8 [Fonte: https://goo.gl/nCvhkE].	42
Figura 57. Mecanismo para movimentação em Z [Fonte: próprio autor].	42
Figura 58. Carro projetado para movimentação em Z [Fonte: próprio autor].	43
Figura 59. Materiais adotados para tração em X e Y [Fonte: https://goo.gl/ScGY4c].	43
Figura 60. Sistema de tração por polia [Fonte: próprio autor].	44
Figura 61. Ponto de fixação das correias em X [Fonte: próprio autor].	45
Figura 62. Ponto de fixação das correias em Y [Fonte: próprio autor].	45
Figura 63. Tração no eixo Z - sistema de barra roscada com porca [Fonte: próprio autor].	46
Figura 64. Motor Nema 17 de 5 kgf [Fonte: https://goo.gl/J8RBDB].	47
Figura 65. Posicionamento do motor que traciona Z [Fonte: próprio autor].	48
Figura 66. Posicionamento do motor que traciona Y [Fonte: próprio autor].	48
Figura 67. Posicionamento do motor que traciona X [Fonte: próprio autor].	49
Figura 68. Visão geral do posicionamento dos motores [Fonte: próprio autor].	49
Figura 69. Driver adotado para o projeto - modelo A4988 [Fonte: https://goo.gl/gYFASb].	50
Figura 70. Placas adotadas para o controlador [Fonte: https://goo.gl/ieNGQj].	50
Figura 71. Projeto do carro terminal da máquina [Fonte: próprio autor].	51
Figura 72. Carro terminal e sua movimentação [Fonte: próprio autor].	52
Figura 73. Tensão equivalente de Von Mises na estrutura [Fonte: próprio autor].	54
Figura 74. Deflexão total na estrutura [Fonte: próprio autor].	54
Figura 75. Alguns dos componentes adquiridos para o protótipo [Fonte: próprio autor].	57
Figura 76. Barras de metalon quadrado após galvanização [Fonte: próprio autor].	57
Figura 77. Algumas das partes impressas em plástico ABS [Fonte: próprio autor].	58
Figura 78. Carros X já montados e com os rolamentos [Fonte: próprio autor].	58
Figura 79. Carro X no metalon - sistema de movimentação [Fonte: próprio autor].	59
Figura 80. Peças refugadas por falhas da impressora [Fonte: próprio autor].	60
Figura 81. Peças refugadas por falhas de projeto - fase de ajustes [Fonte: próprio autor].	60
Figura 82. Protótipo em fase final de montagem [Fonte: próprio autor].	61
Figura 83. Sigla do MAPL a ser executada no programa bCNC [Fonte: próprio autor].	63
Figura 84. Teste bem sucedido com escrita em papel [Fonte: próprio autor].	63
Figura 85. Relatório de andamento da impressão das peças [Fonte: próprio autor].	66

LISTA DE SIGLAS E PALAVRAS

CNC.....	Comando Numérico Computadorizado
MÁQUINA CNC.....	Máquina automática para manufatura mecânica
EIXO.....	Direção de movimentação linear da máquina
SPINDLE.	Cabeçote de trabalho da máquina
MDF.	Inglês <i>Medium Density Fiberboard</i> : chapa de fibra de madeira de média densidade
CAD.....	Inglês <i>Computer Aided Design</i> : programa de computador para desenhos virtuais
CAM.	Inglês <i>Computer Aided Manufacture</i> : programa para controle de manufatura
OPEN SOURCE.	Projeto de livre utilização e alteração, com direitos autorais renunciados
PLOTTER.	Equipamento que se encaixa na categoria de impressão e imagem
MAPL.	Laboratório de Planejamento Automático de Manufatura da UFU
FEMEC.....	Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU
UFU.	Universidade Federal de Uberlândia
ABS.	Inglês <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> : copolímero termoplástico
STAKEHOLDER.....	Termo usado para se referir às partes interessadas de um projeto
PPP.....	Sequência de três juntas robóticas prismáticas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	6
2.1.	OBJETIVOS GERAIS.....	6
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3.	JUSTIFICATIVA	7
4.	FUNDAMENTAÇÃO.....	8
4.1.	PRINCIPAIS COMPONENTES DE MÁQUINAS CNC	8
4.1.1.	SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	8
4.1.1.1.	GUIAS TRAPEZOIDAIS COM PATINS.....	8
4.1.1.2.	GUIA PRISMÁTICA DE GAIOLA DE AGULHA.....	9
4.1.1.3.	EIXOS COM ROLAMENTOS LINEARES	10
4.1.1.4.	EIXO COM ROLAMENTOS LINEARES ABERTOS	11
4.1.1.5.	TRILHOS E ROLAMENTOS EM V	11
4.1.1.6.	SISTEMA COM BUCHAS	12
4.1.1.7.	ROLAMENTOS DE ESFERAS RADIAIS	13
4.1.2.	SISTEMA DE TRACIONAMENTO	15
4.1.2.1.	POLIAS E CORREIAS.....	15
4.1.2.2.	POLIAS E CABO DE AÇO	16
4.1.2.3.	COROA E CORRENTE	16
4.1.2.4.	PINHÃO E CREMALHEIRA	17
4.1.2.5.	FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTES	18
4.1.2.6.	FUSO TRAPEZOIDAL E CASTANHA.....	18
4.1.2.7.	BARRA ROSCADA E PORCA	20
4.1.3.	ESTRUTURA.....	20
4.1.3.1.	ALUMÍNIO ESTRUTURAL.....	21
4.1.3.2.	METALON	21
4.1.3.3.	CHAPAS DE AÇO	22
4.1.3.4.	VIGAS ESTRUTURAIS.....	22
4.1.4.	MOTORES E DRIVERS	24
4.1.4.1.	MOTORES.....	24
4.1.4.2.	DRIVERS DE ACIONAMENTO.....	25

4.1.5.	COMPUTADOR CENTRAL.....	25
4.1.6.	PLACA DE CONTROLE	26
4.1.7.	SOFTWARE E FIRMWARE.....	26
4.1.8.	FONTE DE ENERGIA	26
4.1.9.	CABEÇOTE DE TRABALHO.....	27
4.2.	CÓDIGO G.....	27
4.3.	MOTORES DE PASSO.....	28
4.3.1.	TIPOS DE MOTORES DE PASSO.....	29
4.3.1.1.	CLASSIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DO ROTOR.....	29
4.3.1.2.	CLASSIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DO ESTATOR	31
4.3.2.	ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO	33
4.3.2.1.	FULL STEPPING	33
4.3.2.2.	HALF STEPPING.....	34
4.3.2.3.	MICRO STEPPING	35
4.3.3.	VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MOTORES DE PASSO	35
4.3.3.1.	VANTAGENS DOS MOTORES DE PASSO.....	35
4.3.3.2.	DESVANTAGENS DOS MOTORES DE PASSO	35
4.4.	CONTROLE EM MALHA ABERTA	36
5.	DESENVOLVIMENTO.....	37
5.1.	REQUISITOS E PREMISSAS DO PROJETO	37
5.1.1.	IMPRESSÃO DE PEÇAS EM 3D	37
5.1.2.	VOLUME DE TRABALHO.....	37
5.1.3.	MULTIFUNCIONALIDADE.....	38
5.1.4.	RECURSOS FINANCEIROS	38
5.2.	MÉTODO DE ESCOLHA DOS MECANISMOS.....	38
5.3.	CONCEPÇÃO DO PROJETO	40
5.3.1.	MOVIMENTAÇÃO E ESTRUTURA.....	40
5.3.2.	TRACIONAMENTO	43
5.3.3.	MOTORES, DRIVERS E PLACA DE CONTROLE.....	46
5.3.4.	CARRO TERMINAL.....	51
5.3.5.	SOFTWARE E FIRMWARE.....	52
5.4.	ANÁLISE DA ESTRUTURA EM ELEMENTOS FINITOS	53
5.5.	LISTA DE PEÇAS E LISTA DE MATERIAIS	55
5.6.	PROTOTIPAGEM.....	56

5.7.	RESULTADOS PRÁTICOS	64
5.7.1.	DESLIZAMENTO CARROS X E Y	64
5.7.2.	RIGIDEZ ESTRUTURAL	64
5.7.3.	SISTEMA DE TRAÇÃO	64
5.7.4.	PEÇAS EM ABS	65
5.7.5.	SOFTWARE E FIRMWARE.....	66
5.7.6.	DESIGN DA MÁQUINA	67
5.7.7.	MULTIFUNCIONALIDADE	67
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
7.	PROJETOS FUTUROS.....	69
7.1.	OTIMIZAÇÃO DE CARREGAMENTO DE CONTÊINERS	69
7.2.	MAPEAMENTO DE LABIRINTO POR IMAGEM.....	69
7.3.	PROJETO DE FIRMWARE E SOFTWARE PRÓPRIOS	69
7.4.	MODELAGENS CINEMÁTICAS DE TRAJETÓRIAS.....	69
7.5.	ESTUDOS EM MÉTODOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICOS	69
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
9.	APÊNDICE	71
	APÊNDICE A – Peça “Caixa_Control_1”	71
	APÊNDICE B – Peça “Caixa_Control_2”	71
	APÊNDICE C – Peça “CarroZ”	72
	APÊNDICE D – Peça “FixadorEsteira”	72
	APÊNDICE E – Peça “MontanteMotorXeY”	73
	APÊNDICE F – Peça “MontanteMotorZ”	73
	APÊNDICE G – Peça “Pes”	74
	APÊNDICE H – Peça “PrendedorLM8”	74
	APÊNDICE I – Peça “PT1.1_CarroX”	75
	APÊNDICE J – Peça “PT1.1_CarroXmirror”	75
	APÊNDICE K – Peça “PT1_CarroXeY”	76
	APÊNDICE L – Peça “PT2.1_CarroX”	76
	APÊNDICE M – Peça “PT2.1_CarroY”	77
	APÊNDICE N – Peça “PT2.2_CarroX”	77
	APÊNDICE O – Peça “PT2.2_CarroY”	78
	APÊNDICE P – Peça “PT3.1_CarroY”	78

APÊNDICE Q – Peça “PT3.2_CarroY”	79
APÊNDICE R – Peça “PT4_CarroY”	79
APÊNDICE S – Peça “PT5_CarroY”	79
APÊNDICE T – Peça “SuporteCorreiaX”	80
APÊNDICE U – Peça “SuporteCorreiaXmirror”	80
APÊNDICE V – Peça “SuportePes”	81
APÊNDICE W – Peça “SuportePesmirror”	81
10. ANEXOS	82
ANEXO A – Datasheet Rolamento Radial 608 ZZ	82
ANEXO B – Datasheet Driver A4988	83
ANEXO C – Datasheet Motor de Passo Nema 17	87

1. INTRODUÇÃO

Robôs cartesianos, também conhecidos por *Gantry Robots*, são máquinas com três graus de liberdade, tendo três eixos de movimentação lineares e perpendiculares entre si – ver Figura 1. Cada eixo pode ser entendido como uma junta prismática e, portanto, esses robôs são do tipo PPP pela classificação da robótica.

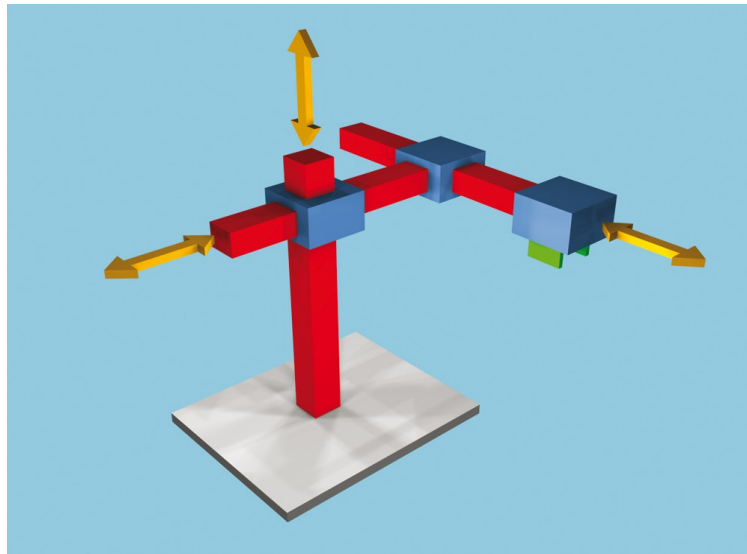


Figura 1. Representação de um Gantry Robot [Fonte: <https://goo.gl/zzQWky>].

Esse tipo de robô possui a característica de controle fácil, já que a movimentação em cada eixo representa uma relação direta no movimento do órgão terminal do robô. Assim sendo, torna-se dispensável a modelagem cinemática da máquina, simplificando sua programação.

Geralmente, robôs cartesianos na configuração de três eixos de apoio simples, são utilizados para movimentação de pequenas cargas. Industrialmente também se observa a presença dessas máquinas, como mostrado nas seguintes Figura 2 e Figura 3.



Figura 2. Robô industrial para movimentar peças [Fonte: <https://goo.gl/pU5phv>].



Figura 3. Robô cartesiano industrial [Fonte: <https://goo.gl/VdmPVY>].

As máquinas CNC (comando numérico computadorizado) por sua vez, são um conjunto específico de robôs cartesianos onde seus eixos são bi-apoiados, como na Figura 4. Possuem um design característico e geralmente a função de produzir peças mecânicas. Tem os mesmos graus de liberdade de um robô cartesiano, sendo também uma máquina cartesiana. Há casos onde a máquina possui mais que “três eixos”, onde o órgão terminal pode se mover, geralmente rotacionando - Figura 5.



Figura 4. CNC Router modelo RG510 XHDS 5 eixos [Fonte: <https://goo.gl/aXRP5p>].



Figura 5. CNC Router Titan X S40 5 Eixos [Fonte: <https://goo.gl/aXRP5p>].

Máquinas CNC podem executar diversos trabalhos, como corte à laser, plasma ou jato d'água, fresamento, impressão em 3D, gravação e impressão em 2D, movimentação de material, entre outros, a exemplo da Figura 6. Cada tipo de trabalho demanda ajustes diferentes na máquina e acessórios distintos, dependendo da peça a ser produzida. No entanto, geralmente as máquinas possuem funcionamento muito semelhante, podendo até desempenhar vários dos serviços citados.



Figura 6. CNC industrial de corte à plasma [Fonte: <https://goo.gl/qhpQTV>].

Essas máquinas possuem como atributos principais a flexibilidade de projeto, sendo fácil alterar o serviço executado; a repetibilidade, sendo a maneira mais confiável de produção de peças mecânicas atualmente; a qualidade, sendo muito precisas e eficazes na produção – ver Figura 7; e o fator competitividade, sendo um diferencial para as empresas que dependem de produção de peças mecânicas.

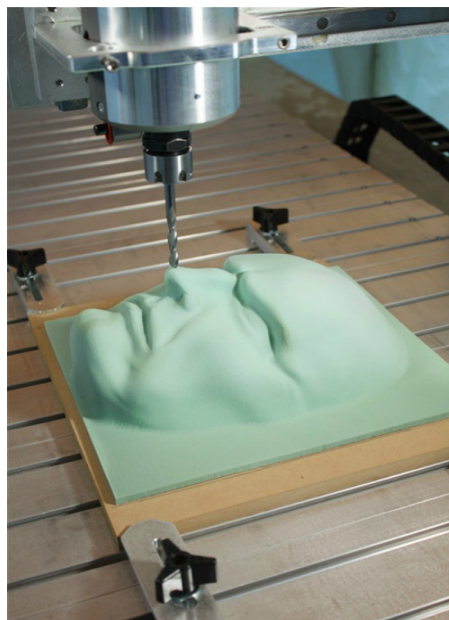


Figura 7. Usinagem 3D por uma máquina CNC [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].

Existem muitos tipos diferentes de máquinas CNC, apesar da movimentação sempre ser basicamente cartesiana. Para cada aplicação é utilizado um tipo diferente de órgão terminal, além de adaptações pertinentes para o serviço ou a peça em questão. Abaixo seguem diferentes exemplos de CNC's industriais para diferentes aplicações, uma máquina multicabeçote em Figura 8 e uma máquina de solda longa, Figura 9.



Figura 8. CNC Router multicabeçote [Fonte: <https://goo.gl/aXRP5p>].



Figura 9. CNC soldadora ultrassônica com 14,6 metros [Fonte: <https://goo.gl/aXRP5p>].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Projeto, análise e construção de uma CNC três eixos multifuncional.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ampliar os conhecimentos em engenharia mecatrônica;
- Estudo de tecnologias relacionadas já existentes;
- Idealização de projeto próprio;
- Análise do projeto desenvolvido;
- Definição e listagem dos componentes;
- Orçamento e aquisição dos componentes;
- Montagem do protótipo;
- Testes de funcionamento.

3. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um robô cartesiano em todas as etapas que um projeto envolve, desde o estudo de tecnologias já existentes, a concepção e aperfeiçoamento, a prototipagem e os testes. Além disso, é um trabalho multidisciplinar, abordando as disciplinas-chave do curso de engenharia mecatrônica, sendo nas áreas da mecânica, elétrica e computação.

É um projeto que permite o desenvolvimento do aluno como estudante, proporcionando experiência na descoberta, criação e junção de tecnologias de maneira funcional e com um propósito, o que é importante para a bagagem de um engenheiro mecatrônico.

Além disso há a experiência na concepção de um projeto em todas suas etapas, lidando com gerenciamento de tempo, de recursos disponíveis e de problemas. Também existe um stakeholder envolvido (financiador) que espera o resultado final funcionando satisfatoriamente, apresentando assim um desafio construtivo ao aluno envolvido.

O projeto proposto também visa o desenvolvimento de um tipo de tecnologia que já existe mas ainda não é acessível economicamente, surgindo assim o desafio do aluno buscar alternativas e meios de trazer maneiras eficazes e criativas de contornar as limitações do projeto, atingindo o objetivo.

O presente trabalho também se justifica pela necessidade de outros alunos de uma máquina onde possam dar continuidade às suas pesquisas de mestrado e doutorado, envolvendo robótica e otimização estatística, além de outros posteriormente apresentados.

Por fim, o protótipo resultante deste trabalho será disposto ao uso da comunidade da FEMEC e da UFU para confecção de peças mecânica e demais estudos relacionados à área, onde poderá ser explorada a máquina para o aprendizado e crescimento de outros acadêmicos.

O trabalho proposto é multidisciplinar, e aborda muitas disciplinas do curso de Engenharia Mecatrônica, como as que se seguem:

- Projeto Assistido por Computador
- Estática
- Eletrônica Básica
- Mecânica dos Sólidos
- Circuitos Elétricos
- Resistência dos Materiais
- Elementos de Construção Mecânica
- Conversão de Energia e Máquinas Elétricas
- Processos de Fabricação Mecânica
- Sistemas Digitais
- Robótica
- Fabricação Assistida por Computador
- *Vibrações de Sistemas Mecânicos (disciplina optativa)

4. FUNDAMENTAÇÃO

4.1. PRINCIPAIS COMPONENTES DE MÁQUINAS CNC

Não há na literatura uma definição padrão dos sistemas que compõem uma máquina CNC. Assim sendo, será adotada a seguinte divisão, visando a melhor compreensão, estudo e interpretação desse tipo de máquina, composto por inúmeras partes.

A divisão proposta segmenta uma máquina CNC em oito sistemas distintos, entre software e hardware, como se segue:

- Sistema de Movimentação;
- Sistema de Tração;
- Estrutura;
- Motores e Drivers;
- Placa de Controle e Computador Central;
- Software e Firmware;
- Fonte de Energia;
- Cabeçote de Trabalho.

4.1.1. SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

O sistema de movimentação é composto pelas partes mecânicas responsáveis por limitar os graus de liberdade da máquina. Geralmente se constitui de rolamentos, trilhos e buchas. Observa-se que também são responsáveis pela sustentação de outros componentes, preservando sua mobilidade.

Existem vários componentes que podem ser utilizados no sistema de movimentação de uma máquina CNC. Os principais, mais utilizados e mais indicados para esse fim serão comentados a seguir.

4.1.1.1. GUIAS TRAPEZOIDAIS COM PATINS



Figura 10. Guia trapezoidal e patins [Fonte: <https://goo.gl/hgR2ex>].

As guias trapezoidais são o tipo de componente que apresentam o melhor resultado. Possuem desvio dimensional micrométrico (conhecido como “folga”) e a maior capacidade de carga, além de apresentarem pouco atrito e baixa resistência ao deslizamento.

Como mostra a Figura 10, às guias são atrelados patins com esferas recirculantes, como mostra a imagem. Esse sistema possui a característica de apresentar pouca manutenção e boa durabilidade. São sistemas profissionais projetados para atender a praticamente qualquer demanda de movimentação mecânica.

Por outro lado, as guias trapezoidais apresentam o maior custo entre todos os componentes que existem como opção para o sistema de movimentação de máquinas CNC. O custo varia com as dimensões dos sistemas, mas fica em torno de 200 reais o metro da guia e 200 reais cada patim, para a dimensão padrão comercializada.

Para fim de projeto, deve ser observado que a guia trapezoidal possui apenas um grau de liberdade, ou seja, permite apenas o movimento de deslizamento longitudinal do patim. Como será comentado adiante, nem todo sistema de movimentação disponível consegue travar por si só todos os graus de liberdade devendo, portanto, isso ser tratado pelo projetista da máquina.

4.1.1.2. GUIA PRISMÁTICA DE GAIOLA DE AGULHA

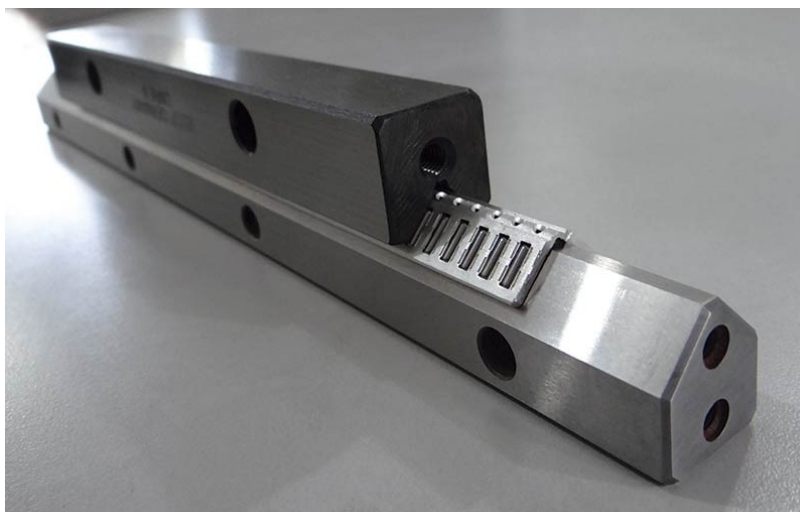


Figura 11. Guia em gaiola de agulhas e patins [Fonte: <https://goo.gl/C4xUyB>].

As guias prismáticas de gaiola de agulha são componentes com grande capacidade de carga e que também apresentam boa precisão. Consistem em dispositivos como mostrado acima na Figura 11, composto por um trilho e um carro, que corre sobre roletes de metal. Suas peças também são conhecidas pelos nomes de guia e gaiola.

Geralmente são indicadas para sustentar peças de peso considerável, e possuem aplicação bem específica já que também possuem custo elevado. Outra justificativa de sua aplicação mais específica é que o sistema por si só não consegue prover apenas um grau de liberdade. Isso portanto deve ser observado pelo projetista do sistema onde será aplicado o componente. O sentido de aplicação da força nesse sistema também deverá ser observado em

projeto. As aplicações desse componente são em sua maioria industriais, pelas características citadas acima.

4.1.1.3. EIXOS COM ROLAMENTOS LINEARES



Figura 12. Eixo circular e rolamento linear [Fonte: <https://goo.gl/P7uYjg>].

Os eixos cilíndricos, como apresentado na Figura 12 acima, geralmente são retificados e endurecidos superficialmente, apresentando boa precisão e tolerância dimensional.

Aos eixos são acoplados rolamentos lineares, que possuem internamente esferas recirculantes que garantem boa precisão e baixa resistência ao deslizamento. A capacidade de esforço do conjunto é limitada pela capacidade de carga do eixo, que pode ser encontrado em diferentes diâmetros dependendo da necessidade.

Apesar de suas características, se apresentam como uma alternativa de custo médio, e bastante utilizada em máquinas CNC semi-profissionais e caseiras, utilizadas por hobistas.

O sistema possui dois graus de liberdade e portanto isso deve ser observado em projeto, já que geralmente as máquinas CNC são de movimento cartesiano e assim possui apenas uma translação por eixo.

4.1.1.4. EIXO COM ROLAMENTOS LINEARES ABERTOS



Figura 13. Eixos circulares com rolamentos lineares abertos [Fonte: <https://goo.gl/u99YzL>].

Esse tipo de componente é bastante semelhante aos eixos cilíndricos com rolamentos lineares fechados, ver Figura 13. A diferença do conjunto é que o rolamento é aberto, e o eixo é apoiado por toda sua extensão, melhorando a fixação e aumentando a capacidade de carga do conjunto, limitada pela flexão do eixo.

Esse sistema naturalmente apresenta maiores custos, em comparação ao eixo cilíndrico, já que possui maior complexidade de fabricação.

4.1.1.5. TRILHOS E ROLAMENTOS EM V

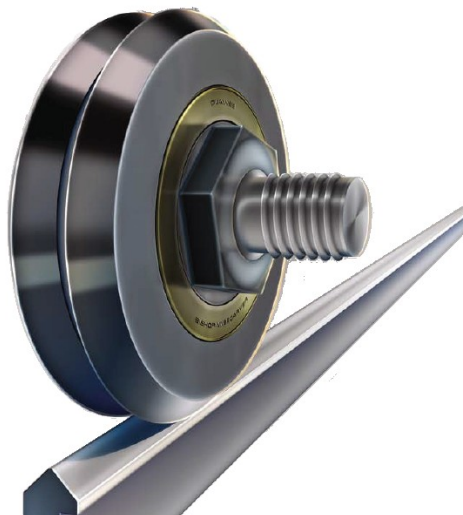


Figura 14. Rolamento radial com trilho em [Fonte: <https://goo.gl/3S7CCB>].

Trilhos e rolamentos em V – mostrados na Figura 14 - também são uma opção na hora de construir o sistema de movimentação de uma máquina CNC. São um sistema que não apresenta grande capacidade de carga se comparado aos apresentados anteriormente, mas apresentam resultados ótimos em questão de precisão de encaixe.

Esses componentes possuem custo médio, e exigem também cuidado em projeto para que os graus de liberdade de cada eixo da máquina cartesiana sejam reduzidos a apenas um.

4.1.1.6. SISTEMA COM BUCHAS



Figura 15. Buchas de movimentação em nylon e bronze [Fonte: <https://goo.gl/zZoq5m>].

O sistema de eixo cilíndrico e buchas é uma outra opção que surge ao sistema de movimentação desse tipo de máquina. A principal característica desse sistema é que a precisão e a resistência ao deslizamento são inversamente apresentadas. Sendo assim, caso queira um sistema com pouca “folga” ou bastante preciso, deve-se abrir mão da baixa resistência ao deslizamento. Por outro lado, caso seja necessário um sistema que deslize facilmente, a folga será inerentemente maior.

É um sistema que funciona sem rolamentos, na base do atrito direto entre bucha e eixo. Por isso, a bucha deve ser de material menos duro que o eixo e trocada de tempos em tempos, geralmente em bronze ou nylon como mostra a Figura 15. Também é recomendado o uso de lubrificantes para reduzir o atrito.

É um sistema mais barato e com resultados satisfatórios, bastante utilizado em impressoras de papel comuns e máquinas CNC caseiras. Exige manutenção periódica e não apresenta boa precisão no resultado final, por isso não é utilizado no ramo de máquinas profissionais.

4.1.1.7. ROLAMENTOS DE ESFERAS RADIAIS



Figura 16. Rolamento de esferas radial [Fonte: <https://goo.gl/gRihtz>].

Os rolamentos radiais – exemplo na Figura 16 - também são utilizados em máquinas CNC para compor o sistema de movimentação. São os componentes que apresentam o custo mais baixo entre todos aqui apresentados para a movimentação das máquinas, chegando a menos de 1 real por unidade, mas ao mesmo tempo exigem a maior complexidade em projeto para que os graus de liberdade dos eixos da máquina sejam controlados.

Para sua utilização é necessário definir os trilhos por onde irão correr, além de se definir seus eixos de giro e como prendê-los ao corpo da estrutura. Além disso, deve ser previsto a montagem e desmontagem para manutenção e substituição facilitada. Alguns exemplos de montagens de sistemas para deslizamento utilizando rolamentos radiais são apresentados nas figuras à seguir Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20.



Figura 17. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: <https://goo.gl/qvtKQZ>].

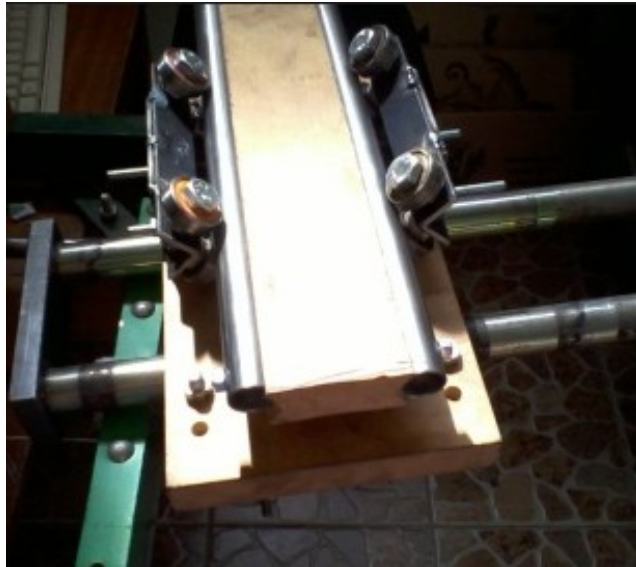


Figura 18. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: <https://goo.gl/zvcMwk>].



Figura 19. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].



Figura 20. Modelo de montagem com rolamentos radiais [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].

4.1.2. SISTEMA DE TRACIONAMENTO

O sistema de tracionamento de máquinas CNC é responsável por transmitir o torque do motor às partes móveis da máquina, transformando a rotação do motor em movimentação linear dos eixos.

Existem várias opções para essa finalidade e as principais e mais adotadas usualmente são discutidas a seguir.

4.1.2.1. POLIAS E CORREIAS



Figura 21. Polias em alumínio e correia [Fonte: <https://goo.gl/pvHmFy>].

O sistema de polias e correias, mostrado na Figura 21, é muito utilizado no ramo das máquinas CNC por apresentar boa durabilidade, baixo custo e boas características técnicas. Entre as principais características destaca-se boa capacidade de carga, baixa folga, baixa perda por atrito e maiores velocidades de movimento. Além disso, observa-se nesses componentes a grande vida útil dos mesmos.

Geralmente se utiliza o sistema de correias abertas, sendo necessário também esticadores e mecanismos de ajuste de tração das correias. No entanto, em alguns casos correias fechadas também são utilizadas.

4.1.2.2. POLIAS E CABO DE AÇO



Figura 22. Sistema de tracionamento por cabo de aço [Fonte: <https://goo.gl/cv25aZ>].

Esse sistema de polias e cabo de aço apresentado na Figura 22 é semelhante ao que utiliza correias, com a diferença de que as polias são lisas e devem ter diâmetro maior, pois os cabos de aço apresentam menor flexibilidade.

Esse é um sistema indicado para quando se necessita de maiores capacidades de tração nos eixos das máquinas, e portanto é utilizado em máquinas de maior porte e que executam trabalhos mais pesados como fresamento em metal.

4.1.2.3. COROA E CORRENTE

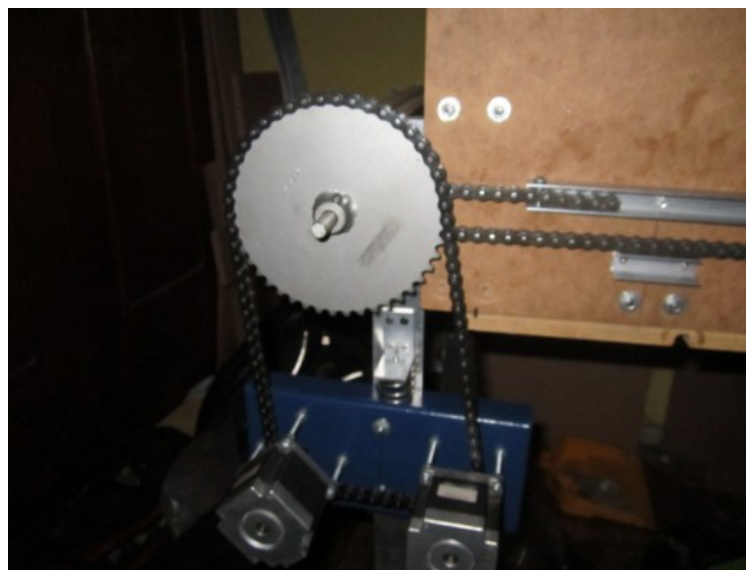


Figura 23. Sistema de tracionamento por coroa e corrente [Fonte: <https://goo.gl/cv25aZ>].

O sistema de tração por coroa e corrente é um tipo mais raro nas máquinas CNC vistas atualmente. É indicado para quando se necessita de alta capacidade de transmissão de potência com baixas perdas, e não se requisita boa precisão na movimentação.

Também é necessário a fabricação de coroas menores para serem acopladas aos motores, e essas não são encontradas a pronta venda no mercado, sendo portanto necessária a fabricação sob encomenda, encarecendo o sistema.

Além disso, o projeto deve prever o ajuste da tensão das correntes, o que também adiciona complexidade ao sistema. O sistema é exemplificado na montagem da Figura 23.

4.1.2.4. PINHÃO E CREMALHEIRA

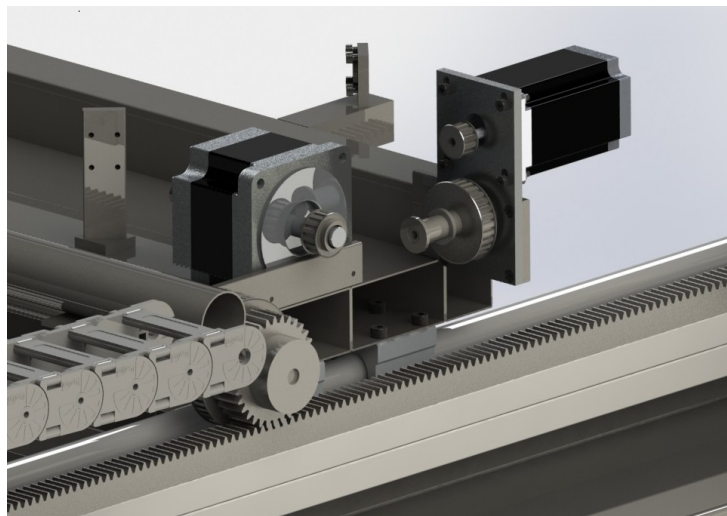


Figura 24. Tracionamento por pinhão e cremalheira [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].

O sistema de tracionamento por pinhão e cremalheira é outra opção para a movimentação dessas máquinas. É um sistema relativamente caro e de difícil manutenção no caso de ser necessário uma substituição, tanto pelo posicionamento e alinhamento dos componentes, quanto pelo preço de substituição.

Por outro lado, assim como corrente e coroa, é um sistema de alta eficiência na transmissão de potência, sendo indicado para quando se necessita grandes capacidades de tração no eixo da máquina. Uma montagem exemplifica esse sistema na Figura 24.

4.1.2.5. FUSO DE ESFERAS RECIRCULANTES



Figura 25. Fuso de esferas recirculantes [Fonte: <https://goo.gl/BoQWRP>].

O fuso de esferas recirculantes é o sistema mais profissional e confiável entre os componentes disponíveis para o tracionamento de uma máquina CNC, desenvolvidos exatamente para a função aqui discutida. Apresentam baixíssima folga e alta precisão na movimentação, além de baixo atrito entre componentes.

Os componentes no entanto são os mais caros dentre os aqui citados para o sistema de tração, e por isso deve-se observar as necessidades de cada projeto antes de se especificar o sistema. Um fuso de esferas virtualmente aberto pode ser observado acima na Figura 25.

4.1.2.6. FUSO TRAPEZOIDAL E CASTANHA

O sistema de fuso trapezoidal e castanha é uma alternativa mais barata ao tracionamento de máquinas CNC. Apresenta bons resultados a baixo custo, mas exige maior frequência de manutenção.

As castanhas são feitas de material menos duro que o fuso, geralmente bronze - Figura 26 - ou nylon - Figura 27, e devem ser trocadas periodicamente para compensar o desgaste da peça e assim se manter a precisão na movimentação.

Esse é um sistema muito utilizado por apresentar características de funcionamento satisfatórias e baixo custo, apesar da maior frequência de manutenção.



Figura 26. Fuso trapezoidal com castanha em bronze [Fonte: <https://goo.gl/5o3jhN>].



Figura 27. Fuso trapezoidal com castanha em nylon [Fonte: <https://goo.gl/gnShkG>].

4.1.2.7. BARRA ROSCADA E PORCA



Figura 28. Barra roscada e porca [Fonte: <https://goo.gl/P3TzNK>].

O sistema da Figura 28 composto por barra roscada e porca não é desenvolvido para o fim de transmissão de movimento. Esses componentes são utilizados em montagens mecânicas e construções civis apenas para fixação de partes móveis.

No entanto, há casos onde se utilizam esses componentes como um conjunto rosca sem fim, para gerar movimento linear a partir de movimento circular. Os casos mais comuns são máquinas CNC caseiras de pequeno porte e impressoras 3D de baixo custo.

O sistema apresenta alto atrito e perda mecânica, e por isso é indicado apenas para movimentações mais lentas ou que envolvem menores esforços. Por outro lado, a barra roscada funciona como uma rosca sem fim que gera redução mecânica do movimento, aumentando a força e a resolução do movimento. Essas características são utilizadas ao favor do projeto, como é o caso das impressoras 3D.

Este é o sistema mais barato de tracionamento aqui apresentado, ficando na faixa dos 5 reais o metro da barra roscada de 5/8 pol. (o mais comum em projetos de máquinas pequenas) e 30 centavos cada porca.

4.1.3. ESTRUTURA

A parte estrutural da máquina também é outro sistema de suma importância, provendo suporte aos componentes gerais. Além disso, a estrutura é responsável pela fixação e alinhamento dos trilhos de movimentação.

A estrutura deve apresentar boa rigidez, alta resistência aos esforços aos quais o spindle da máquina se submete, e baixa vibração às condições operantes normais da máquina.

4.1.3.1. ALUMÍNIO ESTRUTURAL

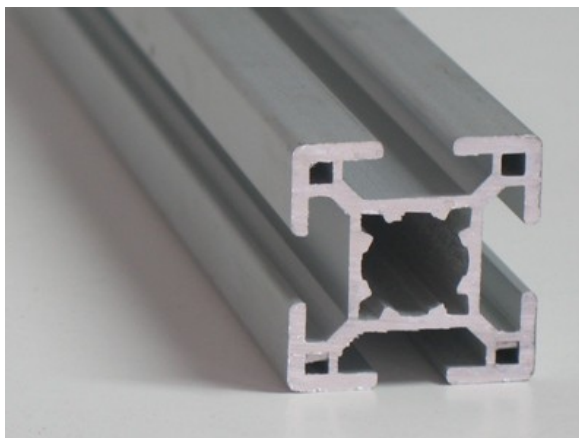


Figura 29. Barra de alumínio estrutural [Fonte: <https://goo.gl/Q9a1w4>].

O alumínio estrutural é bastante utilizado em máquinas de menor porte, por apresentar baixo peso e facilidade na montagem. Existem acoplamentos específicos para esse tipo de estrutura que dispensam o uso de solda, e permitem as mais variadas montagens apenas por parafusos.

São, no entanto, componentes estruturais de menor resistência mecânica e custo mais elevado e por isso seu uso é mais observado em máquinas de menor porte e com priorização da estética. Um exemplo de barra em alumínio estrutural é mostrado na Figura 29.

4.1.3.2. METALON

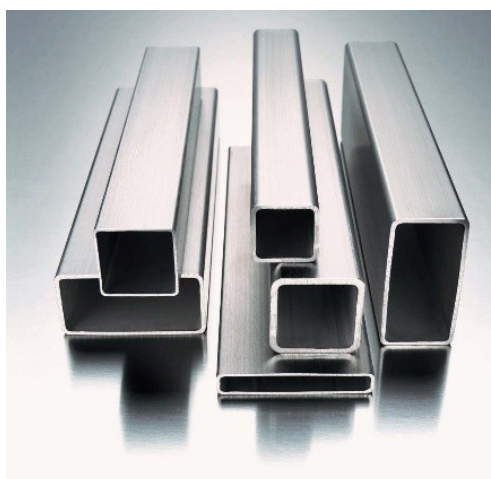


Figura 30. Barras de aço quadradas – metalon [Fonte: <https://goo.gl/ALWKeu>].

Os tubos de aço de seção quadrada, Figura 30, e com menor tolerância dimensional são vendidos no mercado como “metalons”. Possuem custo extremamente baixo por serem fabricados em escala para uso geral.

São disponibilizados diferentes tamanhos e espessuras de material listados em catálogos dos fabricantes. São versáteis por serem encontrados em qualquer loja de metais, serem de fácil manipulação, corte e soldagem. Devem ser pintados ou tratados superficialmente contra a corrosão pois são vendidos em sua forma nú.

4.1.3.3. CHAPAS DE AÇO



Figura 31. Chapas de aço diversas, dobradas e cortadas [Fonte: <https://goo.gl/YREBvU>].

Chapas de aço como as mostradas na Figura 31 também são muito utilizadas nas partes estruturais de máquinas CNC. São indicadas para máquinas de maior porte pelo seu custo de produção. Geralmente as chapas de aço são cortadas em máquinas CNC a plasma, laser ou a jato de água, que conseguem seguir o contorno desejado em projeto. Isso encarece a produção das peças e por isso geralmente peças em chapa de aço são substituídas, sempre que possível, por peças usinadas em alumínio ou peças em MDF.

4.1.3.4. VIGAS ESTRUTURAIS



Figura 32. Viga estrutural em I [Fonte: <https://goo.gl/DY6FiD>].

Vigas perfiladas estruturais, como a da Figura 32, também podem ser utilizadas para compor a estrutura de uma máquina CNC. Geralmente são utilizadas em máquinas de maior

porte visto que são um material mais caro, de maior dificuldade de execução de projeto e com maior capacidade de carga.

Assim, temos que as máquinas CNC geralmente utilizam o metalon pelas características já citadas. A exemplo, vemos na Figura 33 o uso do material para suporte da mesa, na Figura 34 como metal apoio de sacrifício para o corte. Em vários casos também observa-se o uso de chapas de aço, como os pés feitos para a máquina da Figura 35.



Figura 33. CNC com estrutura em metalon – pés [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].



Figura 34. CNC com estrutura em metalon [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].



Figura 35. CNC com estrutura em chapa de aço [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].

4.1.4. MOTORES E DRIVERS

4.1.4.1. MOTORES

Em máquinas CNC cartesianas, ou lineares, os motores utilizados possuem a função de transformar energia elétrica em movimento linear dos eixos das máquinas. Os motores utilizados são sempre elétricos, pois esses possuem um controle refinado.

Motores aplicados nessas máquinas devem ser de um arranjo robusto e confiável, provendo aos eixos da máquina um movimento preciso e, sempre que possível ligeiro. Além disso, os motores devem ser fortes o suficiente para empurrar os eixos em caso de trabalhos mais pesados como a fresamento de peças mecânicas em madeira ou até mesmo em metal.

Os motores geralmente utilizados são motores de passo ou motores DC. Os motores de passo podem ser controlados em malha aberta como será exposto adiante, dispensando o uso de retroalimentação por sensores. No caso do uso de motores DC, é necessário acoplar também aos eixos encoders ou sensores de movimentação linear para garantir o correto funcionamento e controle da máquina.

Por apresentarem certas simplicidades de projeto, os motores a serem utilizados nesse trabalho serão os motores de passo. Adiante será explicado melhor sua construção, funcionamento e acionamento. Abaixo segue a explicação da utilização de drivers de acionamento para motores de passo.

4.1.4.2. DRIVERS DE ACIONAMENTO

Os drivers de acionamento de motores de passo, Figura 36, também são encontrados em máquinas CNC com uma função bem específica. Eles controlam a alimentação dos motores, enviando a corrente elétrica de magnitude e sentido específico aos terminais corretos, ditando assim a movimentação do motor. Os drivers são comandados pela placa de controle da máquina, e geralmente se encontram anexos à mesma.

Usualmente, os drivers são o fator limitante da capacidade da máquina, juntamente com os próprios motores, em quesitos de corrente e tensão máximas. Em sua maioria, podem receber também comandos da placa de controle que ditam a forma de acionamento dos motores em relação aos passos (diferentes resoluções).

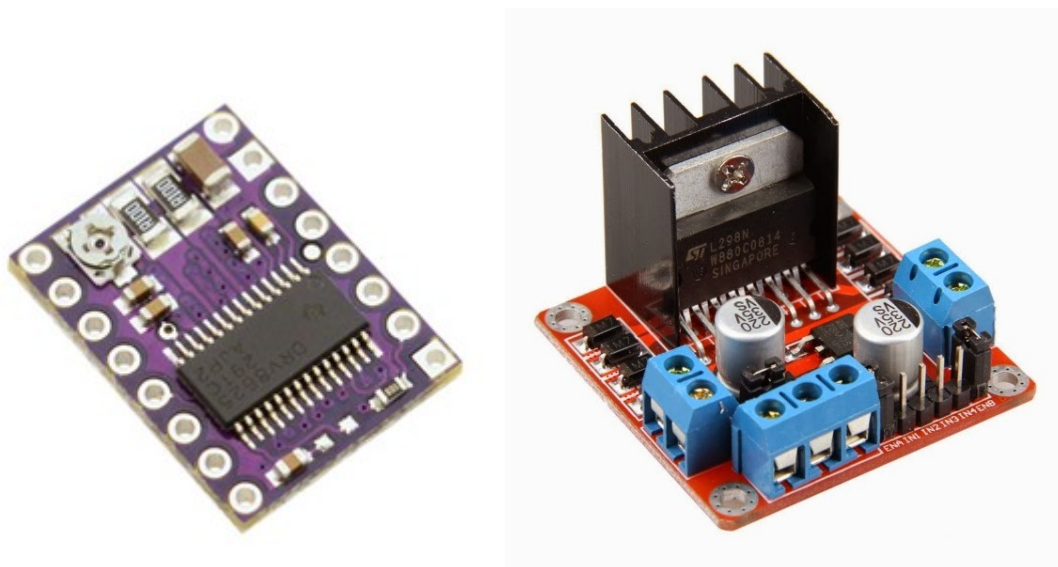


Figura 36. Drivers de controle para motores de passo [Fonte: <https://goo.gl/WeHbwa>].

4.1.5. COMPUTADOR CENTRAL

O computador central de uma máquina CNC, geralmente representado por um computador pessoal comum, possui a função de ferramenta de geração do código G a partir de um projeto de peça mecânica a ser executado. Essa função é feita no computador através do auxílio de um software CAM. Após gerar o código G, o computador deve enviá-lo à placa de controle.

O computador central também pode ser, secundariamente, utilizado para confecção de um projeto da peça virtual em CAD. Mas cabe ressaltar que essa não é a função do computador na conjuntura de uma máquina CNC, e a mesma consegue executar o serviço independentemente de o computador possuir um software CAD, já que o projeto pode estar pronto previamente.

4.1.6. PLACA DE CONTROLE

A placa de controle, sempre presente em máquinas CNC, é um sistema embarcado e dedicado, o que significa que é um hardware interno à máquina e geralmente anexo à mesma. Possui a finalidade de receber o código G do projeto a ser executado, de um computador central, interpretá-lo em coordenadas e controlar os motores, com o intermédio dos drivers de acionamento.

A placa de controle é microprocessada e roda o firmware de controle da máquina, software programado para executar a função supracitada de receber e interpretar um código G, gerando comandos diretos aos motores.

Há várias opções de hardwares de controle para máquinas CNC no mercado, inclusive soluções de projeto aberto como o Arduino. Também há opções que utilizam chips Toshiba, por exemplo. Para o caso do Arduino, existe a placa Ramps 1.4 que adapta os pinos para conexão de drivers diretamente sob a placa, facilitando a montagem física.

Há também várias opções de firmwares de controle open-source. Entre os mais famosos destacam-se Marlin e Grbl, ambos compatíveis com o conjunto Arduino e Ramps 1.4.

4.1.7. SOFTWARE E FIRMWARE

Software e firmware são as partes virtuais que compõem uma máquina CNC em forma de código de programação. O software se localiza no computador central da máquina, enquanto o firmware é o software secundário localizado na placa de controle da máquina.

O software possui a função de intermediar a comunicação entre o computador e a placa, enviando o código G do projeto a ser executado para a placa. Além disso, o software também recebe dados da placa para serem mostrados no computador central, como o sensoramento de temperatura da extrusora ou da mesa aquecida, velocidade de rotação da fresa, situação dos sensores de fim de curso, entre outras. Assim, o software também desempenha a função de interface homem – máquina da CNC.

O firmware, por sua vez, é responsável por interpretar o código G que a placa de controle recebe, e ir passando as instruções de movimentação aos drivers de acionamento dos motores. Assim, o projeto recebido pela placa é executado e os motores se movimentam da maneira que devem. Código G será explicado em maiores detalhes mais adiante.

4.1.8. FONTE DE ENERGIA

A fonte de energia, como o nome já sugere, está no sistema da máquina CNC com a função de suprir os componentes com energia elétrica. A fonte serve para retificar e/ou rebaixar a tensão elétrica para valores compatíveis com os componentes da máquina. Além disso, a fonte entra com o papel de melhorar a qualidade de energia, atuando como filtro.

Os componentes que consomem energia e precisam ser alimentados por eletricidade numa máquina CNC são os motores de movimentação, a placa de controle, o computador central e o spinddle de trabalho. Destes, os que mais consomem energia são os motores e o spinddle, sendo esse último o que merece maior atenção.

É válido lembrar que no dimensionamento da fonte de uma CNC deve-se levar em conta o pior caso, que seria supor um quase travamento de sua movimentação, consumindo corrente elétrica máxima nos motores e no spinddle. O computador e a placa de controle consomem uma energia pouco variável no tempo.

4.1.9. CABEÇOTE DE TRABALHO

O cabeçote de trabalho de uma máquina CNC, ou também podendo ser visto como o órgão terminal de um robô cartesiano, é o componente responsável por executar o trabalho para o qual a máquina se destina.

Todos os componentes aqui apresentados anteriormente possuem, quando em conjunto, a única função de mover o cabeçote da máquina para que esse, finalmente, execute o serviço na peça mecânica que está sendo trabalhada.

Uma máquina CNC cartesiana pode desempenhar diferentes funções e essas variam basicamente com a mudança do cabeçote. Uma CNC pode desempenhar o papel de impressora 3D caso o cabeçote posicionado seja uma extrusora de material, por exemplo.

Máquinas CNC também podem desempenhar os papéis de fresadora, plotter ou marcadora a laser, cortadora a laser ou a jato abrasivo, ponte rolante de escala reduzida, entre outros papéis. Todos esses papéis podem ser mudados facilmente apenas intercambiando o cabeçote de trabalho da CNC, pois o funcionamento é muito semelhante. É esse intercâmbio de funções que este projeto, apresentado aqui, destina-se a explorar.

4.2.CÓDIGO G

Quando se fala em máquinas CNC ou de comando numérico, é sempre implícita a presença do código G no processo de funcionamento. Atualmente todas essas máquinas automatizadas utilizam o código G para codificar e interpretar instruções de movimentação.

O código G é uma linguagem de programação criada para ser uma linguagem de alto nível, simples e com ênfase na codificação de movimentos em máquinas de comando numérico, fazendo parte do ramo da engenharia de assistida por computador.

Além da função principal de ditar os movimentos no espaço, o código G codifica instruções como velocidade do movimento, setup de parâmetros de trabalho – velocidade de corte, avanço, tipo de ferramenta – interpolação de pontos, tipo de unidade de medida, referenciamento de coordenadas, sentido de rotação da fresa, entre outros.

O código G é criado e enviado por computador para que a peça possa ser executada na CNC, após transferência do código para a placa de controle. O processo de produção de uma peça mecânica numa máquina de controle numérico é esquematizado na figura a seguir, Figura 37.

Tudo começa no projeto da peça em um programa CAD como *AutoCad*, *CorelDraw* ou *SolidWorks*, podendo o projeto ser feito em duas ou três dimensões. Em seguida, através de um software CAM se faz o “fatiamento” da peça 3D, ou seja, o código G é gerado a partir do arquivo do desenho feito previamente.

Após isso, o código G pode ser transferido para a placa de controle, através do programa de comunicação da máquina, que fica no computador central. Esse programa do computador central geralmente também possui a função de “*slicer*” ou “fatiador”, ou seja, a mesma função de um software CAM para geração do código G, além de suas funções primárias de comunicação e controle da máquina.

Finalmente, o código G estando já em processo de envio para a placa de controle da máquina, é executado e gera os movimentos respectivos dos motores, permitindo a execução do projeto da peça. O fluxo do procedimento necessário para se criar um código G legível pela máquina CNC é representado à seguir, na Figura 37.

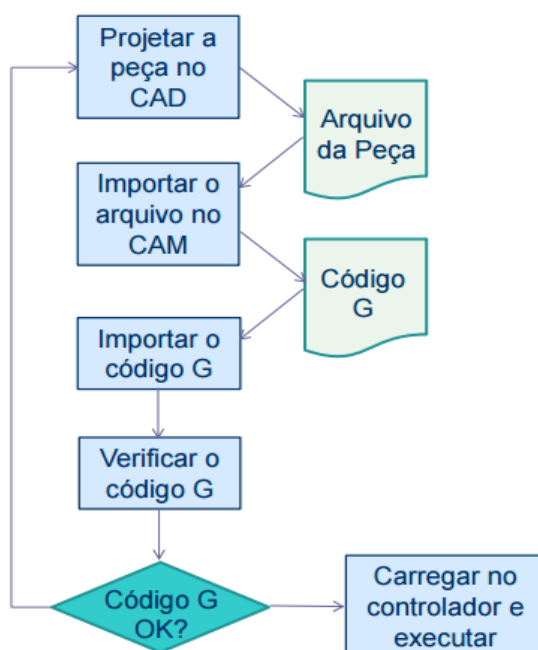


Figura 37. Fluxograma para novo projeto CNC [Fonte: <https://goo.gl/a7qHpe>].

4.3.MOTORES DE PASSO

Os Motores de Passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimentos mecânicos que geram variações angulares discretas. O rotor ou eixo de um motor de passo é rotacionado em pequenos incrementos angulares, denominados “passos”, quando

pulsos elétricos são aplicados em uma determinada sequência nos terminais deste. (Brites e Santos, 2008).

Um motor de passo pode ser uma boa escolha sempre que movimentos precisos são necessários. Ao contrário de outros tipos de motores elétricos, os motores de passo não são capazes de desenvolver movimentos a altas velocidades, mas em contrapartida geram confiabilidade e precisão no movimento. São geralmente empregados em impressoras, scanners, robôs e automação industrial.

Em máquinas CNC usualmente se utilizam os motores de passo pelas características de funcionamento dos mesmos, como o modelo Nema 17 apresentado na Figura 38. São motores que exigem controle especial que geralmente é auxiliado por drivers dedicados, que são circuitos eletrônicos de comutação e controle da corrente de alimentação das bobinas dos motores.



Figura 38. Motor de passo do tipo Nema 17 [Fonte: <https://goo.gl/nf9AYt>].

4.3.1. TIPOS DE MOTORES DE PASSO

4.3.1.1. CLASSIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DO ROTOR

Motores de passo podem ser do tipo imã permanente, de relutância variável ou híbridos. Aqueles do tipo imã permanente são construídos com imãs em seu rotor como apresenta a Figura 39, e apresentam características de maior torque e menor resolução de passo, ou seja passos de maior angulação, tipicamente entre 7,5 a 15 graus, ou 48 a 24 passos por volta.

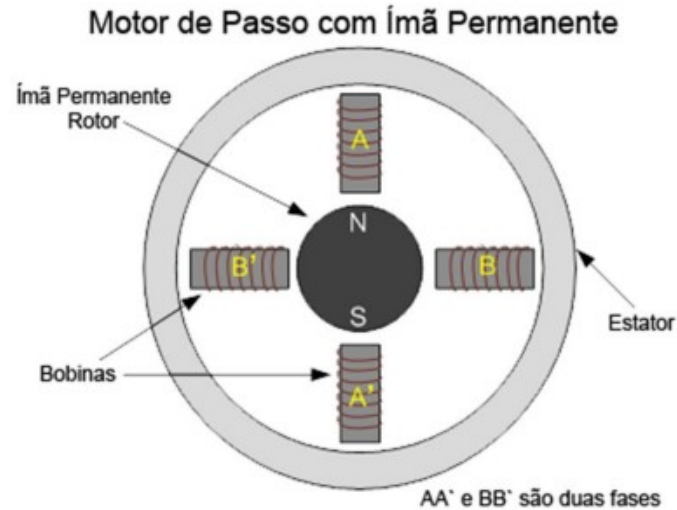


Figura 39. Esquema motor de passo de ímã permanente [Fonte: <https://goo.gl/myw8u5>].

Motores do tipo relutância variável como representado na Figura 40, por outro lado, possuem o rotor construído em ferro com múltiplos dentes. Os polos do rotor se magnetizam por indução dos enrolamentos do estator. Esse tipo de motor possui menor torque e maiores resolução de passo. Os passos típicos são de 1,8 graus, o que geram 200 pulsos por volta.

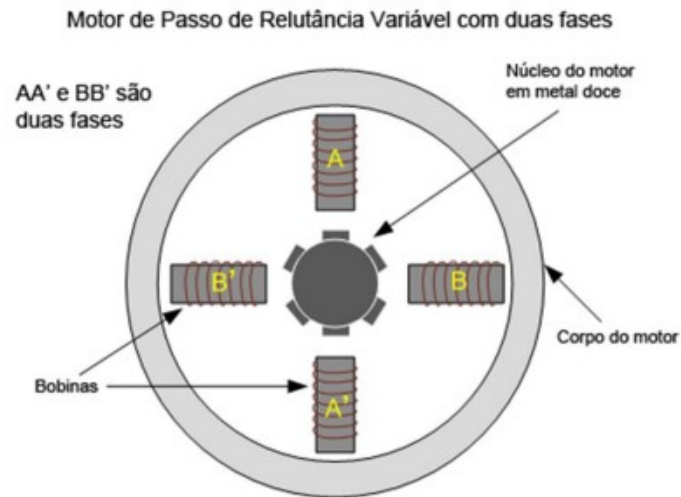


Figura 40. Esquema motor de passo de relutância variável [Fonte: <https://goo.gl/myw8u5>].

Já os motores híbridos como o da Figura 41, misturam a mecânica mais sofisticada do motor de relutância variável com a potência do ímã permanente no eixo, dando um torque maior com maior precisão nos passos.

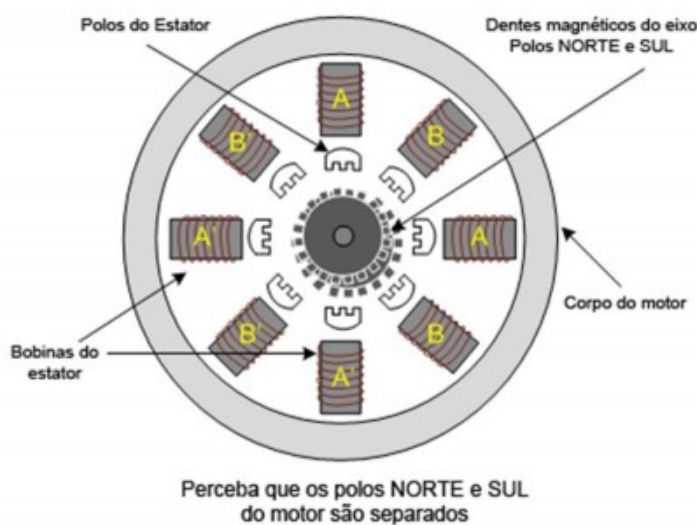


Figura 41. Esquema motor de passo híbrido [Fonte: <https://goo.gl/myw8u5>].

4.3.1.2. CLASSIFICAÇÃO CONSTRUTIVA DO ESTATOR

Motores de passo também podem ser classificados pelo modo de acionamento, consequência de como as bobinas do estator são construídas. Nessa classificação, existem os motores do tipo unipolares, e os motores do tipo bipolares.

Motores de passo unipolares, esquema na Figura 42, possuem dois enrolamentos por fase, ou seja três terminais, onde um geralmente é o comum ou terra. Este tipo de motor de passo é mais facilmente controlável, já que a inversão da corrente de cada fase é feita de maneira mais simples. Utilizando um terminal comum, basta alternar a alimentação dos outros dois terminais para que se inverta o sentido de rotação do motor.

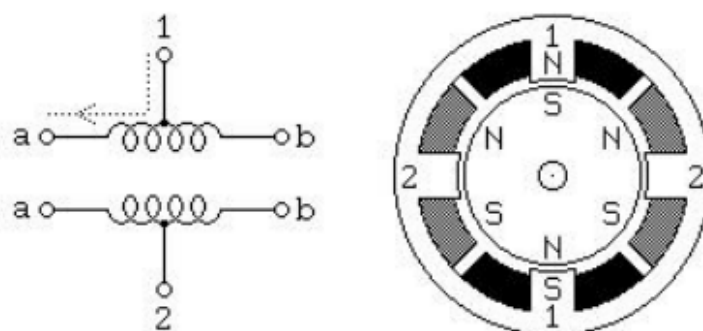


Figura 42. Esquema de motor de passo unipolar [Fonte: <https://goo.gl/AX5Qdy>].

O outro tipo de motor, o bipolar esquematizado em Figura 43, possui apenas um enrolamento por fase. Assim, a corrente no enrolamento precisa ser invertida para se alternar

o sentido de rotação do motor, exigindo um circuito ponte H para controle do motor. O controle desse tipo de motor se torna portanto mais complexo eletronicamente.

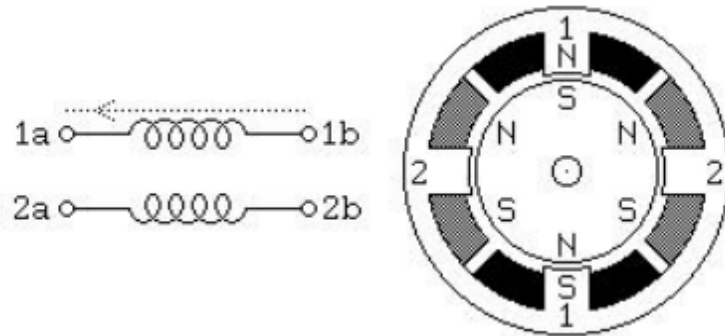


Figura 43. Esquema de motor de passo bipolar [Fonte: <https://goo.gl/AX5Qdy>].

Usualmente, motores de passo podem vir em 4, 5, 6 ou 7 fios, de acordo com a tabela seguinte - Tabela 1. Motores unipolares são mais versáteis pois podem trabalhar como bipolares, enquanto o inverso não é possível. Um motor do tipo unipolar trabalha como um motor bipolar, bastando para tal que se ignorem os terminais comuns das fases.

Há ainda a classificação da ligação em série ou paralelo das bobinas de cada fase. Isso só é possível em motores de 6 ou 7 fios. Resumidamente, essa alternância dessas ligações priorizam o torque ou a resolução do motor em questão. A Tabela 1 a seguir mostra como identificar os tipos de motores de passo pela quantidade visível de terminais.

Tabela 1. Identificação de motores pela quantidade de fios.

Motor	Ligação
4 Fios	Bipolar
5 Fios	Unipolar
6 Fios	Unipolar/Bipolar(série)
7 Fios	Unipolar/Bipolar(série/paralelo)

4.3.2. ACIONAMENTO DE MOTORES DE PASSO

O acionamento desse tipo de motor é feito por pulsos direcionados ordenadamente às suas bobinas. O modo como esses pulsos são enviados, energizando as bobinas das fases dos motores, alterna a resposta e funcionamento dos mesmos.

4.3.2.1. FULL STEPPING

No acionamento em full step, não há passos intermediários, o que significa que o número de passos que o motor é capaz de dar é igual ao número de bobinas do estator. Nesse tipo de acionamento, há um maior torque percebido, ao mesmo tempo em que a resolução atingida é mais baixa.

O acionamento em full step pode ser em wave drive ou full drive. No primeiro tipo, apenas uma bobina é energizada a cada instante como mostra esquema da Figura 44. No segundo, duas bobinas são energizadas em cada instante como mostra a Figura 45. As tabelas seguintes também representam o acionamento binário dos motores, em modo wave drive e full drive, respectivamente Tabela 2 e Tabela 3.

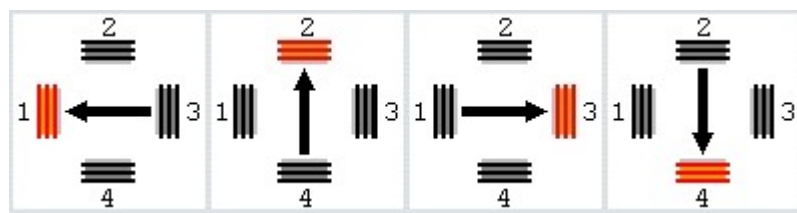


Figura 44. Bobinas energizadas por full step em wave drive [Fonte: <https://goo.gl/vzT9ZB>].

Tabela 2. Acionamento full step em wave drive.

Nº do passo	B3	B2	B1	B0	Decimal
1	1	0	0	0	8
2	0	1	0	0	4
3	0	0	1	0	2
4	0	0	0	1	1

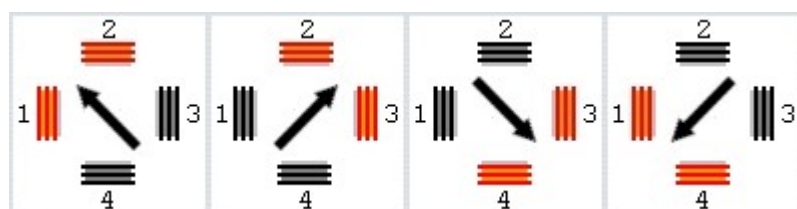


Figura 45. Bobinas energizadas por full step em full drive [Fonte: <https://goo.gl/vzT9ZB>].

Tabela 3. Acionamento full step em full drive.

Nº do passo	B3	B2	B1	B0	Decimal
1	1	1	0	0	12
2	0	1	1	0	6
3	0	0	1	1	3
4	1	0	0	1	9

4.3.2.2. HALF STEPPING

No acionamento com half step, em um instante uma bobina apenas é energizada, e no instante seguinte duas bobinas são acionadas concomitantemente como mostra a Figura 46. Assim, consegue-se dobrar a resolução de passos do motor, que atinge posições intermediárias entre as bobinas.

Por outro lado, o torque do motor hora é percebido como no acionamento em full drive, e hora é percebido como no acionamento em wave drive. O torque médio resultante disso é um valor entre os dois modos de ligação. O esquema de acionamento binário é mostrado na Tabela 4 à seguir.

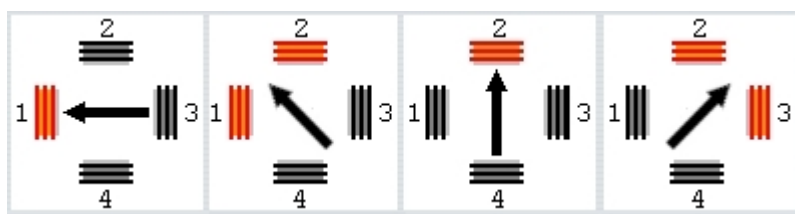
Figura 46. Bobinas energizadas por half step [Fonte: <https://goo.gl/vzT9ZB>].

Tabela 4. Acionamento em half step.

Nº do passo	B3	B2	B1	B0	Decimal
1	1	0	0	0	8
2	1	1	0	0	12
3	0	1	0	0	4
4	0	1	1	0	6
5	0	0	1	0	2
6	0	0	1	1	3
7	0	0	0	1	1
8	1	0	0	1	9

4.3.2.3. MICRO STEPPING

O acionamento em micro step é o mais sofisticado e difícil de ser reproduzido, no entanto produz uma resolução muito maior de passos. A estratégia é alimentar as bobinas com sinais analógicos, senóides defasadas no tempo. Isso faz com que a diferença de potencial elétrico entre as bobinas varie no tempo, variando assim a posição do rotor, que atinge inúmeras posições intermediárias entre as bobinas.

As barras vermelhas indicadas no gráfico abaixo, Figura 47, mostram como a diferença de potencial entre as bobinas azul e vermelha varia no tempo, gerando posições também variáveis no rotor do motor.

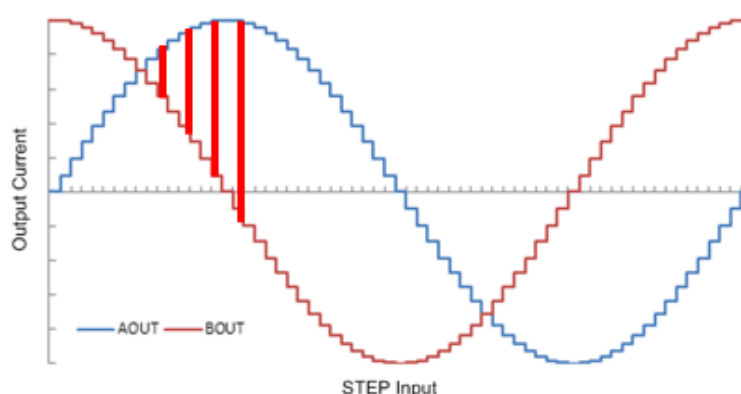


Figura 47. Acionamento em micro step [Fonte: próprio autor].

4.3.3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE MOTORES DE PASSO

Visto o que foi exposto anteriormente, podemos concluir algumas vantagens e desvantagens do emprego dos motores de passo. A partir disso, definem-se as situações onde os mesmos devem ser empregados em projeto.

4.3.3.1. VANTAGENS DOS MOTORES DE PASSO

Como principais vantagens ditas pelas características desses motores, destacam-se a lógica de controle digital, adequada para microprocessadores e computadores; a precisão na movimentação e posicionamento devido a divisão de seus movimentos em passos bem definidos; e boa resposta a aceleração e desaceleração, percebida devido ao rápido alinhamento do rotor com os polos gerados no estator.

Além disso, se trabalhar dentro da faixa de torque estabelecida pelo fabricante, o motor de passo garante uma precisão de rotação dada pelo seu mecanismo de movimentação em passos. Assim, na maioria dos casos, pode-se aplicar o controle em malha aberta, mais simples de ser implementado.

4.3.3.2. DESVANTAGENS DOS MOTORES DE PASSO

Como principais desvantagens, destaca-se o baixo desempenho a altas velocidades, devido ao chaveamento das bobinas ser de frequência limitada e de baixa resposta a altas

frequências; a necessidade de controle específico e drivers auxiliares, aumentando a complexidade de utilização e o custo computacional; e a possível ocorrência de ressonância, caso o acionamento coincida com a frequência natural do sistema, gerando vibrações e imprecisões na movimentação.

4.4.CONTROLE EM MALHA ABERTA

Controle em malha aberta é o tipo de controle onde o feedback do sistema controlado não é utilizado para remanejar a entrada de atuação no próprio sistema - Figura 48. Em outras palavras, o sistema é controlado “às cegas”, onde o resultado final é bom caso o atuador seja confiável e previsível, bem como o sistema com trabalho numa faixa conhecida.



Figura 48. Esquema de controle em malha aberta [Fonte: próprio autor].

Como já exposto, o motor de passo apresenta precisão e confiabilidade nos seus movimentos, determinados por passos de angulação bem definida. Isso define o motor como um atuador robusto e passível de ser controlado em malha aberta. O controle em malha aberta traz as vantagens de ser mais simples e demandar menor custo computacional.

O controle em malha aberta de máquinas CNC que utilizam motores de passo é esquematizado no diagrama a seguir - Figura 49. Do computador central surgem as coordenadas do projeto em código G previamente gerado por software específico. Essas coordenadas (1) são enviadas à placa de controle (2) pelo computador.

A placa de controle por sua vez se comunica com os drivers anexos à ela, informando as rotações demandadas nos motores da máquina (3). Os motores respondem aos comandos e por ligações mecânicas movimentam o elemento terminal da máquina (4). A movimentação desse elemento acaba por resultar no trabalho final da máquina sendo executado, nesse exemplo, o fresamento de uma peça (5).

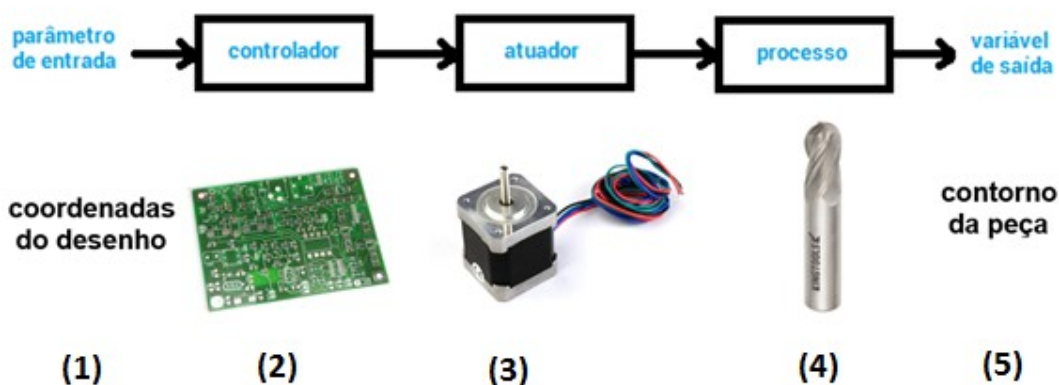


Figura 49. Controle em malha aberta de uma CNC [Fonte: próprio autor].

5. DESENVOLVIMENTO

5.1. REQUISITOS E PREMISSAS DO PROJETO

- Prototipagem de peças em impressora 3D
- Volume de trabalho final de 1100x1100x150mm (X-Y-Z)
- Multifuncionalidade
- Recursos financeiros limitados para Aquisição de Materiais

5.1.1. IMPRESSÃO DE PEÇAS EM 3D

Um requisito a ser seguido enquanto o projeto fosse desenvolvido era a previsão de utilizar, sempre que possível, a impressora 3D disponível no MAPL para confeccionar peças da máquina CNC desenvolvida.

A impressão 3D apresenta algumas dificuldades a serem apresentadas na conclusão deste trabalho, mas também é bastante versátil na prototipagem de certos projetos.

Impressoras 3D em sua grande maioria trabalham por extrusão de material fundido, utilizam materiais poliméricos (plásticos), como o ABS e o PLA. As peças finais apresentam características de resistência mecânica e térmica limitadas, boa usinabilidade e tolerância dimensional milimétrica.

Algumas impressoras 3D trabalham pela soldagem de partículas de pó através de laser, e essas apresentam resultados muito melhores na peça final, apesar de serem de valor muito maior que as de extrusão. Nesse trabalho, será utilizada uma impressora 3D comum, que trabalha por extrusão de plástico fundido.

5.1.2. VOLUME DE TRABALHO

Outro requisito do projeto foi o volume de trabalho da máquina, ou volume útil, que deveria atender a um paralelepípedo de 1100x1100x150mm, sendo 150mm a medida vertical ao solo (eixo Z, conforme Figura 50 abaixo), e os eixos X e Y paralelos ao solo. Esse requisito se deve à um projeto futuro de doutorado, que visa a utilização do protótipo para testes e estudos. Este projeto utilizará o protótipo para movimentar uma câmera filmadora e assim, mapear um pequeno labirinto de robôs.



Figura 50. Identificação dos eixos de movimentação X, Y e Z [Fonte: próprio autor].

5.1.3. MULTIFUNCIONALIDADE

Outro requisito desse projeto é a multifuncionalidade da máquina, ou sua capacidade de executar diferentes tipos de trabalhos. Desta forma, o protótipo final deve ser capaz de executar trabalhos de usinagem (fresa e broca), impressão em 3D, corte e demarcação a laser, filmagem com movimentação controlada, movimentação mecânica estilo ponte rolante, entre outros. A multifuncionalidade visa a utilidade da máquina para o laboratório MAPL e toda a comunidade da FEMEC e da UFU.

5.1.4. RECURSOS FINANCEIROS

Como premissa do projeto, adotou-se que todo o recurso financeiro necessário para a prototipagem seria disponibilizado pelo laboratório MAPL. Apesar disso, o projeto deverá adotar como um quarto requisito a otimização de custos e gastos

5.2.MÉTODO DE ESCOLHA DOS MECANISMOS

Primeiramente, antes de apresentar o desenvolvimento do projeto e a explicação de cada etapa, será apresentado o resultado final para melhor entendimento das exposições futuras. Na Figura 51 adiante é mostrado o desenho final, em três dimensões, da máquina desenvolvida.

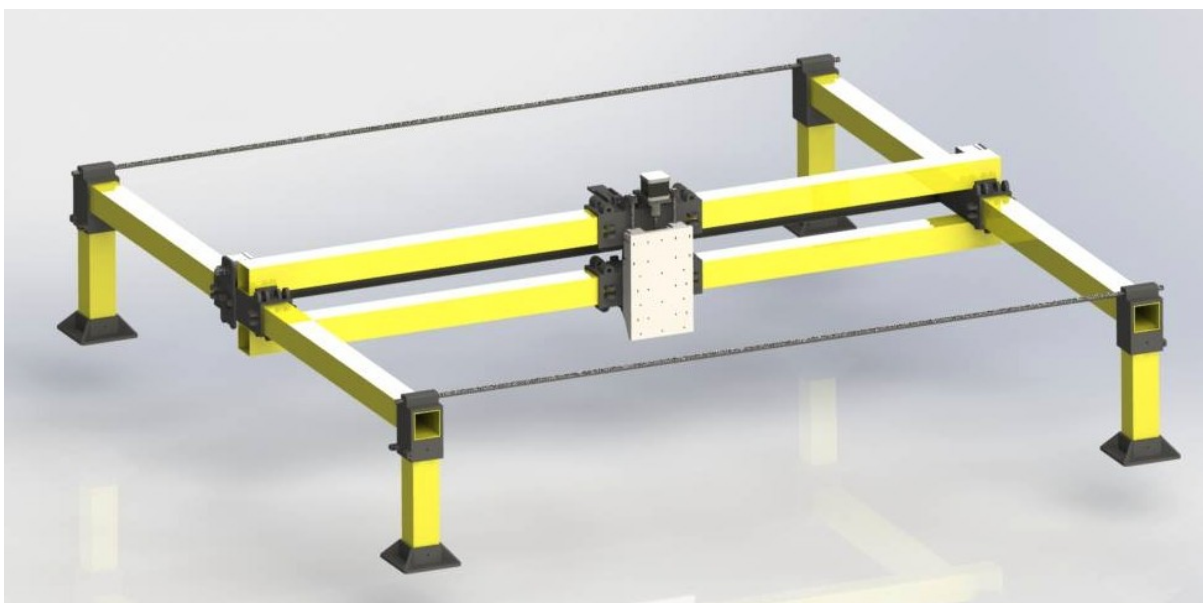


Figura 51. Projeto final renderizado [Fonte: próprio autor].

Os mecanismos da máquina foram escolhidos de forma a atender aos requisitos acima apresentados e levando em consideração todas as observações feitas na fundamentação teórica. Além disso, a questão do custo era muito importante para garantir a viabilização da prototipagem final, sendo necessário portanto otimizar os gastos com o projeto.

Levando isso em consideração e com o decorrer do projeto, foi possível chegar à conclusão que, de maneira simplificada, esse projeto envolvia o balanço de três propriedades, esquematizado na Figura 52:

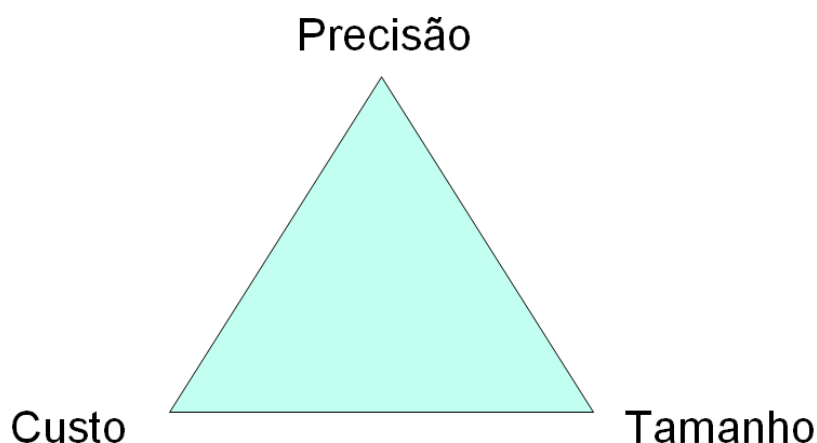


Figura 52. Requisitos de projeto de uma CNC – simplificação [Fonte: próprio autor].

onde por “tamanho” pode-se entender como o requisito de um volume útil relativamente grande, por “custo” o requisito de gastos otimizados, e por “precisão” o resultado final que a máquina consegue entregar em seus trabalhos.

Assim, acaba-se por priorizar as duas características de “tamanho” e “custo”, fixando a primeira e minimizando a segunda, tendo por consequência uma característica final de “precisão” apenas conhecida de maneira estimada, a priori não controlada, e dependente das outras duas.

O projeto, assim, foi desenvolvido visando um volume útil específico, o menor custo possível e resultando numa máquina de precisão dependente do desenvolvimento do projeto, como mostra a Figura 53.

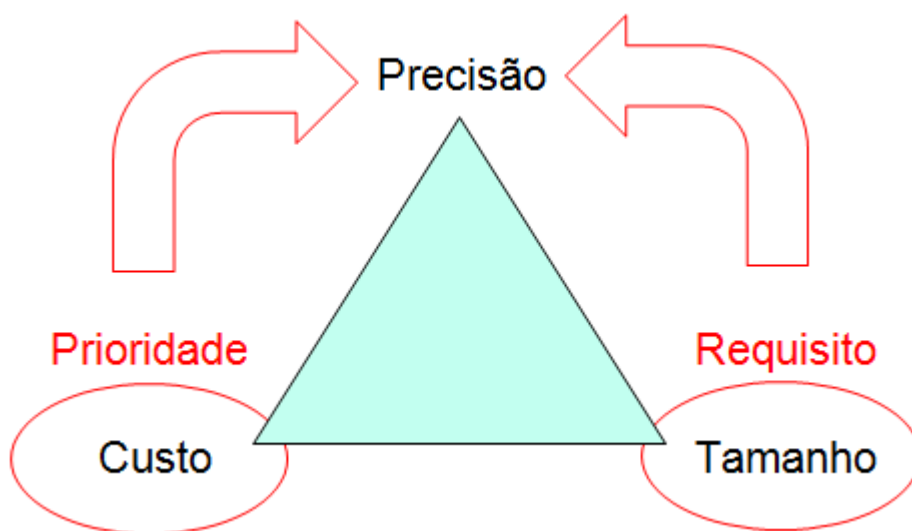


Figura 53. Condições adotadas para o projeto [Fonte: próprio autor].

5.3.CONCEPÇÃO DO PROJETO

5.3.1. MOVIMENTAÇÃO E ESTRUTURA

Tendo em vista tudo que já foi explicado, o primeiro passo para a concepção do projeto foi a escolha dos sistemas da máquina. Assim, o sistema de movimentação escolhido para o projeto foi o de rolamentos radiais. Os rolamentos para skate apresentaram o custo mais baixo dentre os sistemas pesquisados, e pouco dependente do tamanho dos eixos. Além disso, se bem utilizados, os rolamentos trazem boa precisão à máquina. Como estrutura, optou-se por barras de aço quadradas (metalon), pela simplicidade do desenvolvimento do projeto e para facilitar a utilização dos rolamentos (Figura 54).

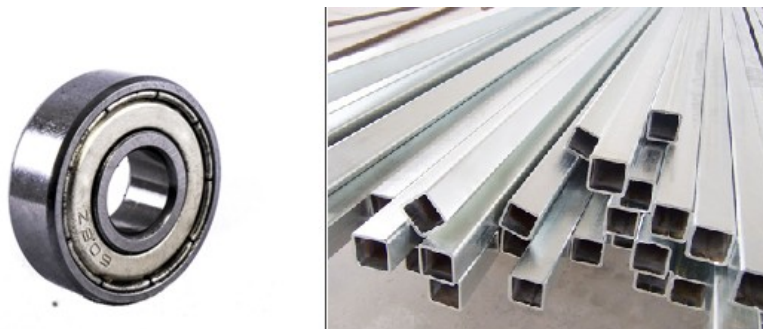


Figura 54. Componentes do sistema de movimentação [Fonte: <https://goo.gl/qkwfb5>].

O arranjo dos rolamentos e sua movimentação sobre a estrutura foi pensado de maneira a limitar os graus de liberdade do cabeçote de trabalho da máquina à apenas os três graus cartesianos. Além disso, foram considerados os principais esforços sobre o cabeçote, o peso das estruturas da própria máquina e o possível arrasto de atrito enfrentado pelos motores. Assim, foi criado um “carro” de movimentação (Figura 55) a ser utilizados nos eixos paralelos da máquina, X e Y.

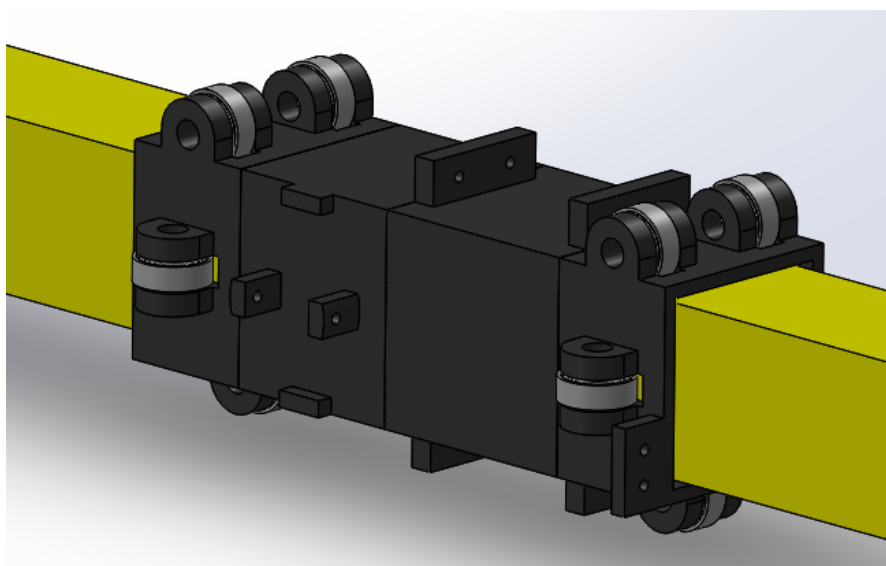


Figura 55. Carro projetado para movimentação em X e Y [Fonte: próprio autor].

Na figura acima, o desenho feito no *SolidWorks* mostra o carro de movimentação, com os rolamentos dispostos nas peças em plástico ABS, e transpassado pelo metalon pelo qual deverá se mover. Os vários encaixes presentes no carro em ABS são para fixação de outras peças, como montante do motor e outras barras de metalon transversais. Os rolamentos são fixados ao carro por semi-eixos de aço de 8 milímetros. Os eixos são travados no material plástico por pressão mecânica, em ajuste com interferência, já que não sofrem esforços axiais e não existe a possibilidade de serem removidos durante o funcionamento da máquina.

Para o eixo Z, foram adotados os rolamentos lineares de esferas, com eixo de aço circular retificado (Figura 57 e Figura 57). Isso se deve ao fato de serem mecanismos próprios para a movimentação de máquinas desse tipo, apresentando melhores resultados. Nas

dimensões menores do eixo o custo se torna viável. Como o mesmo só exige 150mm de comprimento útil, o diâmetro dos eixos de aço e dos rolamentos utilizados pode ser reduzido em comparação aos eixos X e Y, que exigiriam componentes mais robustos por terem comprimentos bem maiores.



Figura 56. Rolamento linear LM8 [Fonte: <https://goo.gl/nCvhkE>].

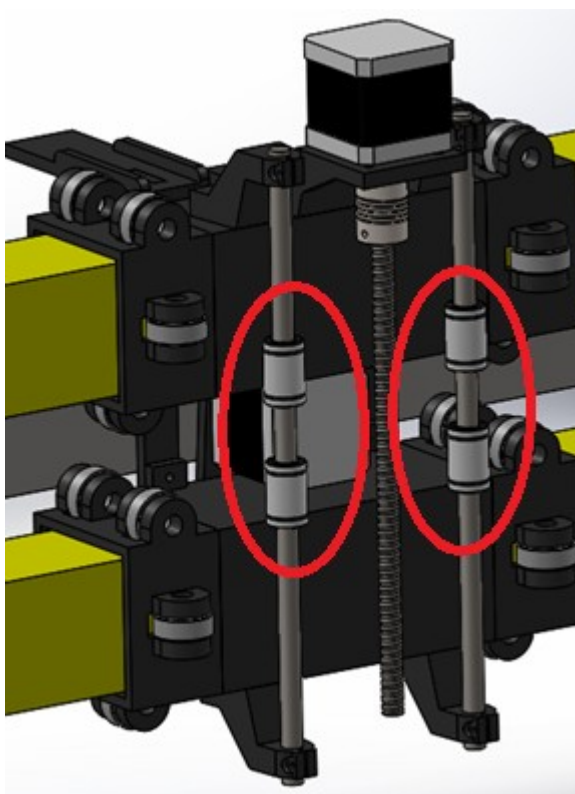


Figura 57. Mecanismo para movimentação em Z [Fonte: próprio autor].

Como mostra a figura anterior, quatro rolamentos lineares foram dispostos no projeto sobre eixos de aço circulares, para permitir a movimentação da máquina no sentido vertical (eixo Z). Sobre esses rolamentos deverá ser projetada a estrutura onde o cabeçote de trabalho da máquina irá se fixar. Essa estrutura pode ser vista na figura à seguir (Figura 58).

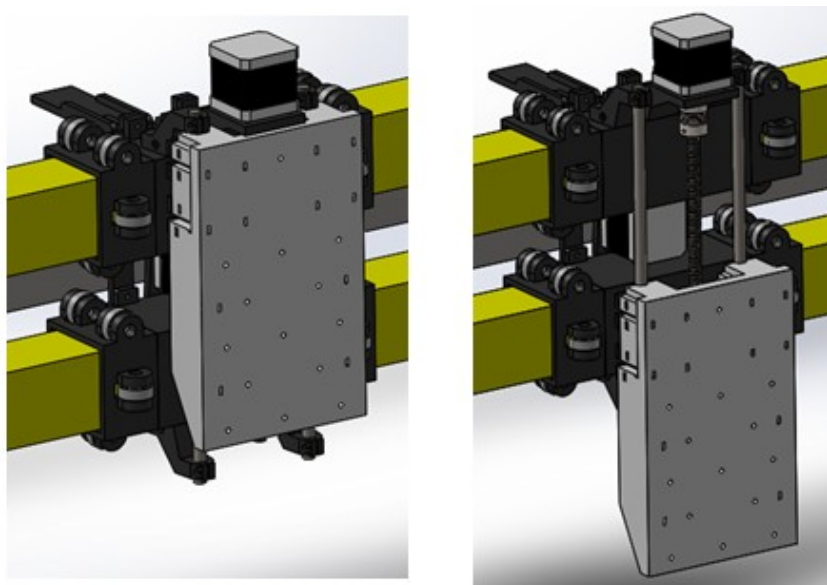


Figura 58. Carro projetado para movimentação em Z [Fonte: próprio autor].

5.3.2. TRACIONAMENTO

Para o mecanismo de força motriz dos eixos X e Y foram adotadas correias com polias (Figura 59). São um sistema de movimentação barato e que apresentam alta eficiência mecânica, também apresentando boa relação de força e velocidade nos eixos, de grandezas ideais para as necessárias ao projeto.



Figura 59. Materiais adotados para tração em X e Y [Fonte: <https://goo.gl/ScGY4c>].

Como o projeto visa, além de outros, o trabalho de fresamento de materiais, há um esforço lateral considerável a qual a ferramenta exerce sobre o cabeçote da máquina, exigindo força dos motores e do sistema de tração.

Também deve-se observar as dimensões da máquina, que exigem uma velocidade mínima razoável para que os eixos se movimentem em todo seu volume de trabalho de maneira satisfatória.

A relação de força e velocidade que o sistema de polias e correias fornecia se encaixava perfeitamente no caso acima. A polia escolhida foi a de 16 dentes, dentre as existentes no mercado, é uma das menores (ainda existe de 25 dentes, por exemplo). O tipo de correia e polia escolhidos são denominados por GT2, o que define o formato dos dentes.

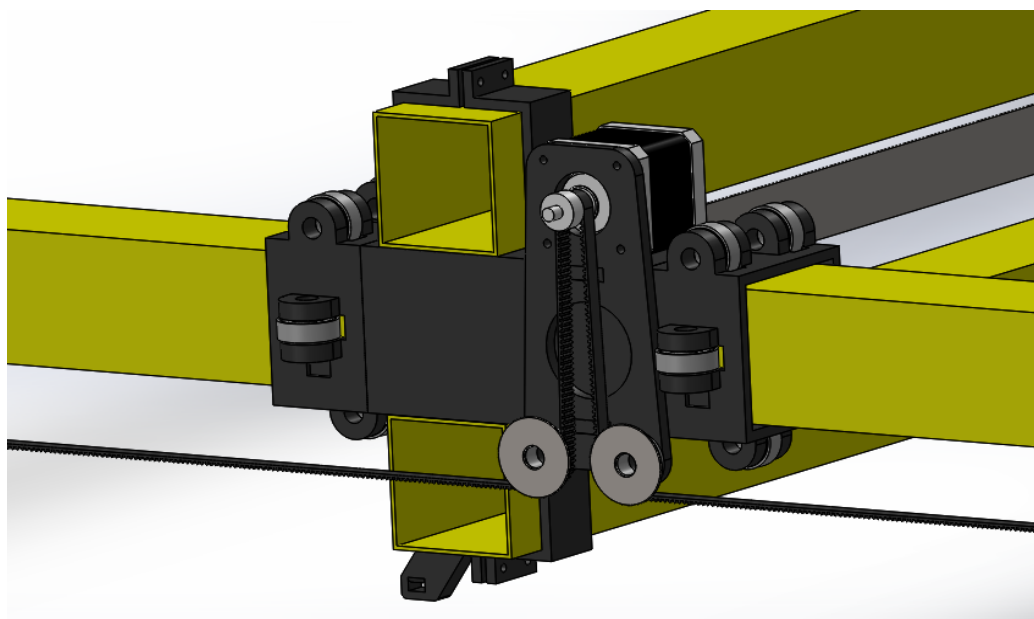


Figura 60. Sistema de tração por polia [Fonte: próprio autor].

Como mostra a Figura 60, o sistema de correia e polia irá trabalhar similarmente a um pinhão e cremalheira, onde a correia se mantém parada enquanto a polia se move e empurra o motor junto com a estrutura móvel da máquina. A diferença para o sistema de pinhão e cremalheira é que, neste caso, a polia possui um ângulo de abraçamento sobre a polia, fazendo-se necessário esticadores auxiliares que geram esse abraçamento (ver dois objetos circulares na figura acima). Os esticadores se tratam de rolamentos acompanhados de arruelas de aba larga.

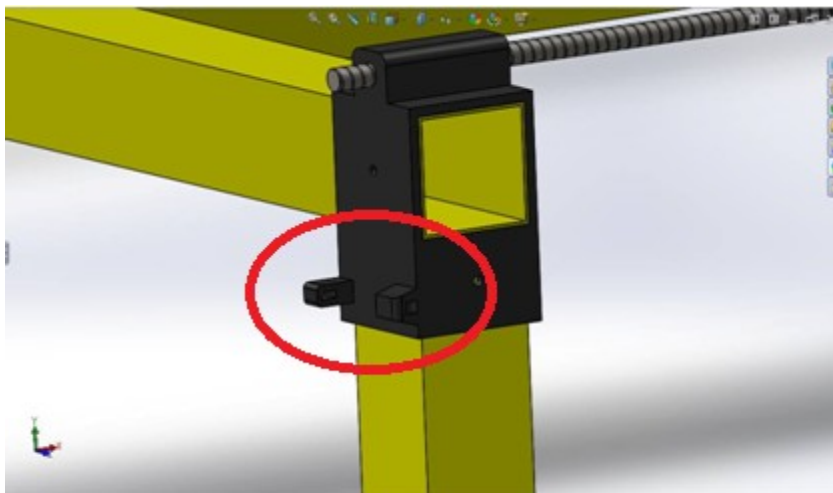


Figura 61. Ponto de fixação das correias em X [Fonte: próprio autor].

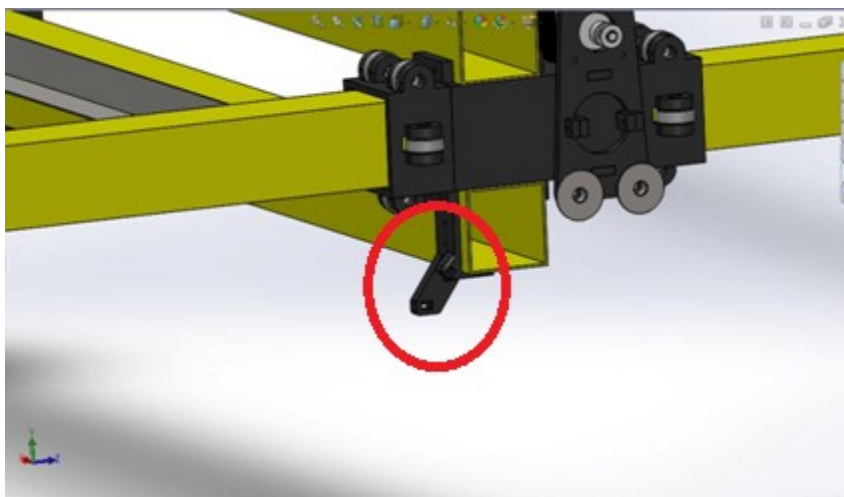


Figura 62. Ponto de fixação das correias em Y [Fonte: próprio autor].

As (Figura 61 e Figura 62) mostram exatamente como as correias serão presas à estrutura da máquina, nos eixos X e Y. O sistema de fixação das correias à estrutura possuem duas partes, sendo a primeira responsável pelo alinhamento da correia aos esticadores mostrados anteriormente que acompanham o motor com a polia; e a segunda responsável pela fixação propriamente dita. O espaço entre as duas partes é proposital e serve de folga para ajuste de tensionamento das correias. A fixação e tensionamento será feito com “fitas de hellerman”, ou abraçadeiras de nylon.

Para o eixo Z da máquina, a movimentação se dá por sistema de barra roscada e porca, similar ao sistema de rosca sem fim. Esse sistema é impróprio para a movimentação mecânica, e por isso apresenta baixa eficiência mecânica. No entanto, foi escolhido nesse caso pelo posicionamento do eixo Z no sentido da força de gravidade, facilitando assim o projeto. Além disso, o sistema possui uma redução intrínseca, que possibilita o eixo trabalhar com maior precisão e força, o que é exatamente o que as máquinas precisam no eixo vertical. Esse eixo dispensa velocidade, já que a maioria dos trabalhos em três dimensões é feito por

“camadas”, e o eixo Z se movimenta bem menos que os eixos X e Y. Na Figura 63 abaixo é possível ver o motor com o acoplamento, prendendo a barra roscada que controla a altura do órgão terminal. A rotação do motor é transformada em movimento linear reduzido, de velocidade lenta e força elevada.

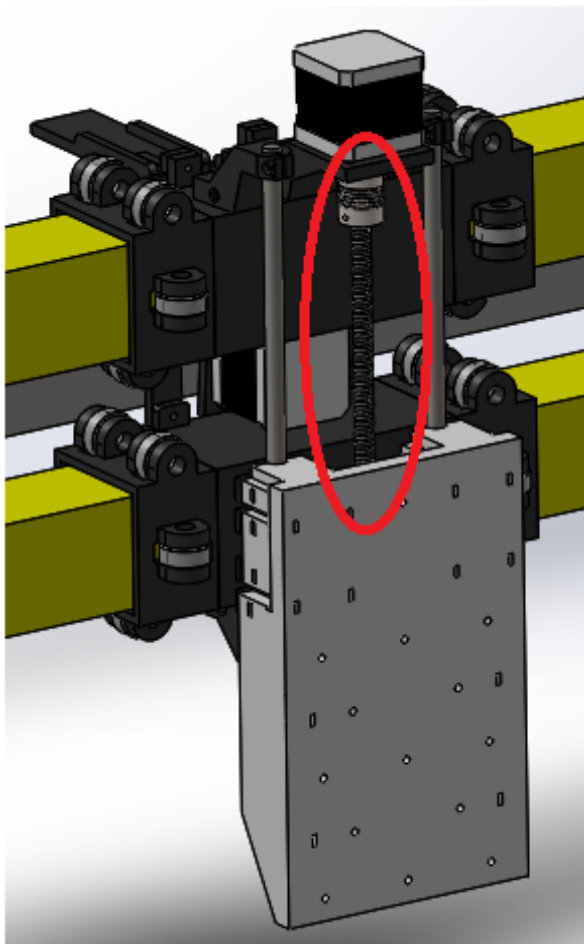


Figura 63. Tração no eixo Z - sistema de barra roscada com porca [Fonte: próprio autor].

5.3.3. MOTORES, DRIVERS E PLACA DE CONTROLE

Os motores escolhidos para o projeto foram motores de passo de 5 kgf*cm (Figura 64). Com esse torque fornecido, e com a polia GT2 de 16 dentes que possui aproximadamente 0,5 cm de raio, a força exercida diretamente sob os eixos da máquina é de aproximadamente 10kgf. Foi considerado que essa força é satisfatória para serviços de usinagem mais leves, onde a máquina seria mais exigida (pior caso). Para gravação a laser, cortes a laser, impressão 3D ou movimentação de peças, a força exercida é menor e os motores devem apenas vencer a inércia e atrito da máquina. Abaixo seguem as especificações completas dos motores selecionados.



Figura 64. Motor Nema 17 de 5 kgf [Fonte: <https://goo.gl/J8RBDB>].

- MOTOR DE PASSO NEMA 17 5KGF*CM
- CORRENTE 1,7A POR FASE
- 4 FIOS BIPOLAR
- ALIMENTAÇÃO DE 12 A 48V
- TORQUE 5KGF*CM

Cabe ressaltar que para o eixo X da máquina foram posicionados dois motores em paralelo, resultando em 20 kgf de força sobre o eixo. Isso pois o eixo X é o primeiro eixo da cadeia de movimentação, e é sobre ele que os outros eixos se apoiam. Assim, esse eixo apresenta maior inércia de movimentação. Para os eixos Y e Z foi utilizado apenas um motor de passo.

O posicionamento dos motores é destacado nas figuras a seguir. O motor de tração do eixo Z está na Figura 65, o motor de Y está na Figura 66 e o motor de X está na Figura 67, lembrando que este último é duplicado. Na Figura 68 estão indicados todos os motores numa visão geral da máquina.

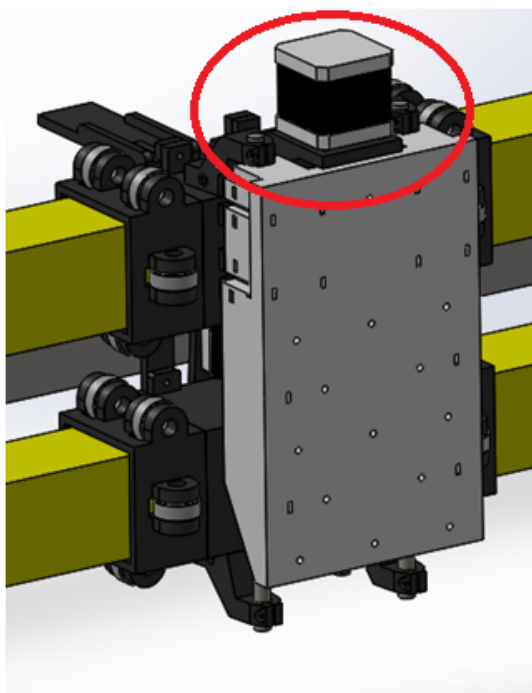


Figura 65. Posicionamento do motor que traciona Z [Fonte: próprio autor].

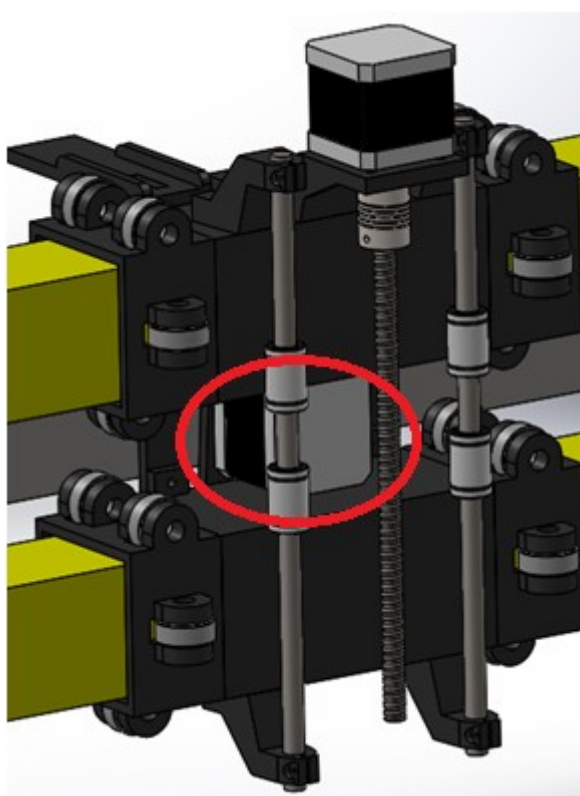


Figura 66. Posicionamento do motor que traciona Y [Fonte: próprio autor].

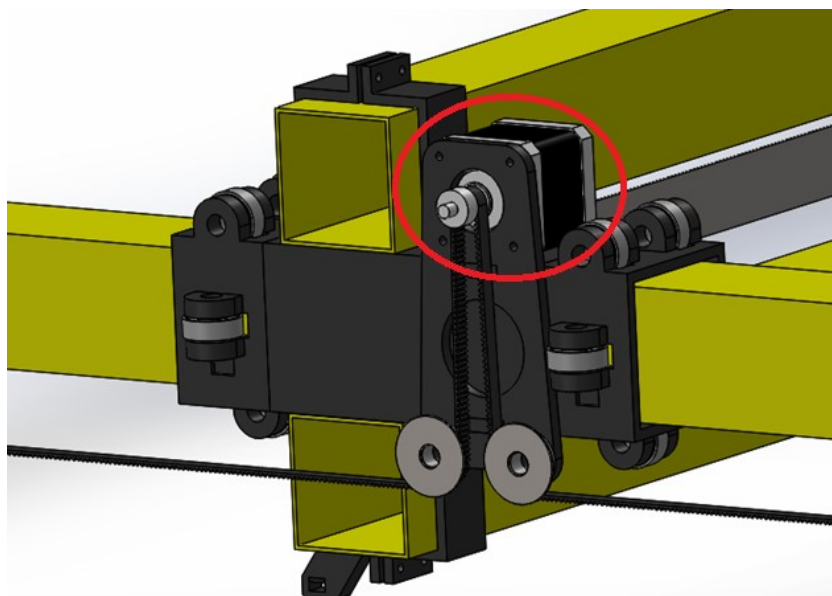


Figura 67. Posicionamento do motor que traciona X [Fonte: próprio autor].

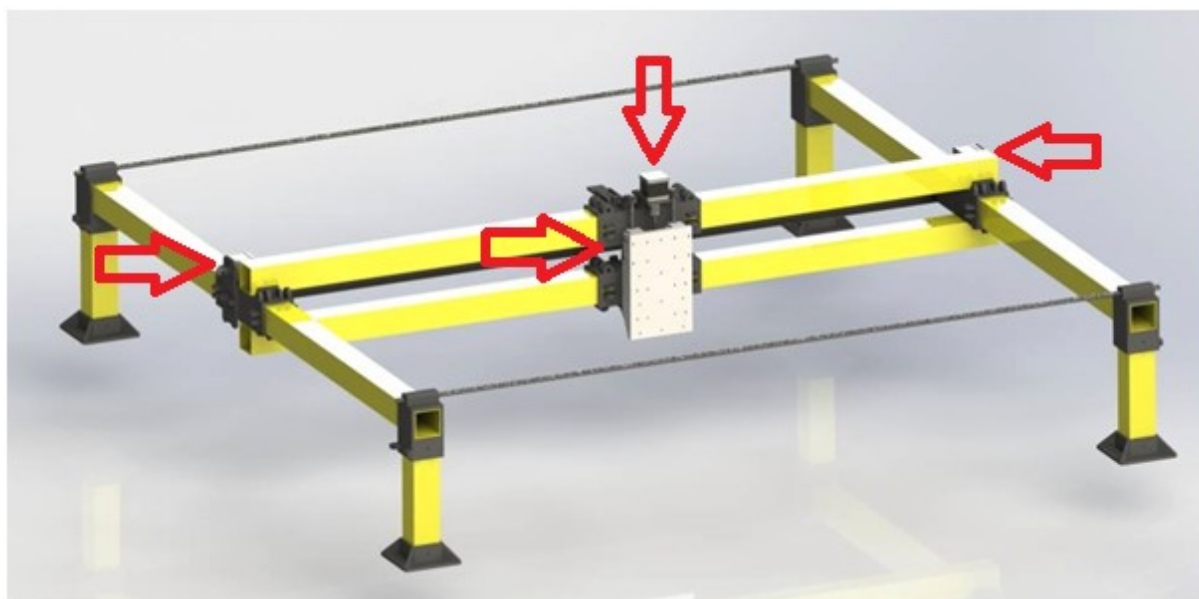


Figura 68. Visão geral do posicionamento dos motores [Fonte: próprio autor].

Os drivers selecionados foram os tipo A4988 (Figura 69), compatíveis com motores bipolares e com capacidade para até 2 Âmpères. Além disso, a sua compatibilidade com a placa Ramps 1.4 também acarretou a sua escolha, já que essa foi a placa escolhida para distribuição de energia. Abaixo seguem as especificações do driver escolhido.

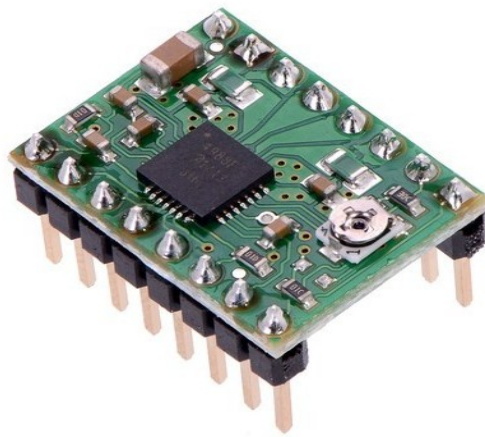


Figura 69. Driver adotado para o projeto - modelo A4988 [Fonte: <https://goo.gl/gYFASb>].

- DRIVER A4988
- SAÍDA ATÉ 35V E 2A
- OPERA EM -20 A 80 GRAUS CELSIUS
- TRABALHA EM FULL STEP, HALF-STEP, 1/3, 1/8 E 1/16 MICRO STEPPING
- ATÉ 3200 PASSOS POR VOLTA

A placa de controle escolhida foi o Arduino Mega. Os drivers não são ligados diretamente no Arduino, esse recebe um shield com a função de distribuição de energia, a Ramps 1.4. Sobre a Ramps os drivers são conectados. A Ramps se justifica pela pinagem compatível com os drivers e por possuir um controle de aquecimento acoplado que pode ser utilizado em impressão 3D. Estes dois equipamentos são mostrados à seguir na Figura 70.

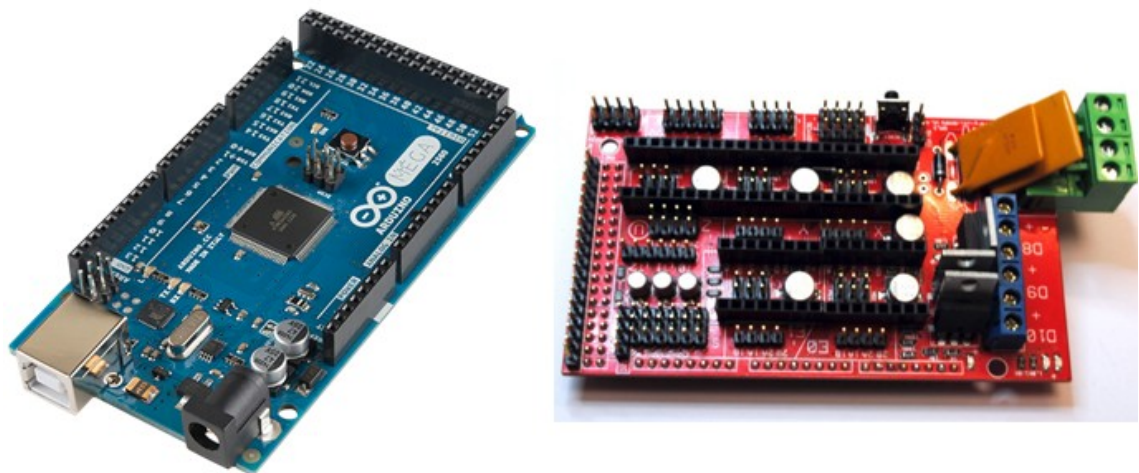


Figura 70. Placas adotadas para o controlador [Fonte: <https://goo.gl/ieNGQj>].

5.3.4. CARRO TERMINAL

O carro terminal da máquina (Figura 71) foi projetado de forma a otimizar o gasto de plástico ABS, sendo a maior peça do projeto, mas não abrindo mão da sua rigidez e funcionalidade, sendo também a peça crítica para o funcionamento da máquina já que é o onde se acopla a ferramenta de trabalho da CNC.

O carro Z é concebido com vários furos em sua superfície, permitindo que se acoplem diferentes equipamentos e ferramentas garantido a multifuncionalidade da máquina. Além de furos para abraçadeiras, também existem furos redondos para o uso de parafusos e encaixe e possíveis peças em ABS. Essas peças podem ser projetadas para prender ferramentas específicas e impressas também em impressoras 3D.

Na parte de trás do carro estão os alojamentos para os rolamentos lineares e o alojamento das porcas de tração do carro. São quatro rolamentos que travam o grau de liberdade do carro deixando restar apenas um. As porcas estão em duas para melhorar a folga existente no componente, diminuindo-a.

Também na parte traseira do carro estão longarinas verticais e diagonais, que melhoram a rigidez da peça que possui grande área e necessita resistir a grandes esforços. As longarinas são uma tentativa de preservar a rigidez do conjunto sem abrir mão da economia de material.

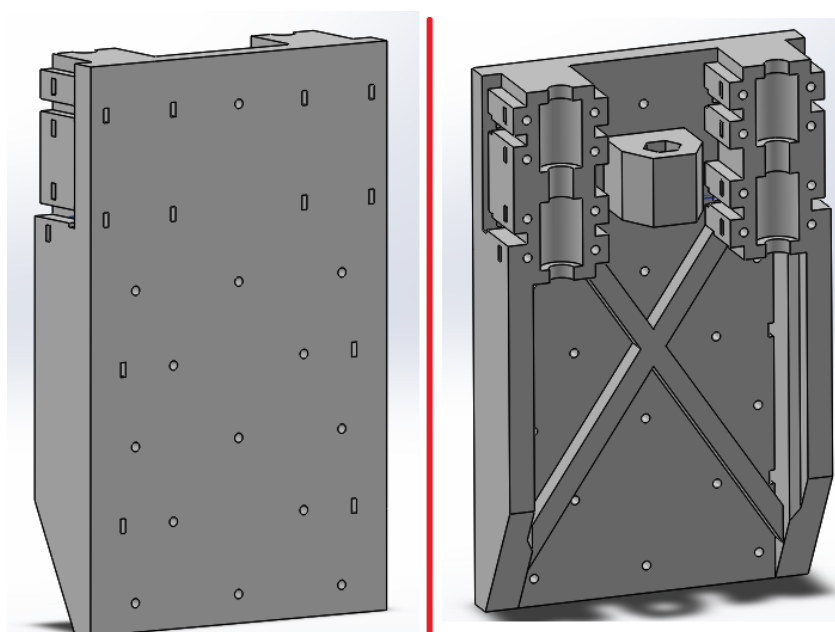


Figura 71. Projeto do carro terminal da máquina [Fonte: próprio autor].

A Figura 72 mostra o carro terminal já montado na estrutura, e a movimentação prevista para o componente. No total o carro possui um curso livre de 160mm de movimento na vertical (eixo Z), o que atende ao requisito inicial do projeto. Cabe lembrar que quanto maior a liberdade de movimentação, maiores serão as dimensões dos eixos e maior deve ser o

espaçamento vertical entre os rolamentos lineares para garantir o travamento da peça. Assim, é inviável aumentar o curso do carro além do que o projeto exige.

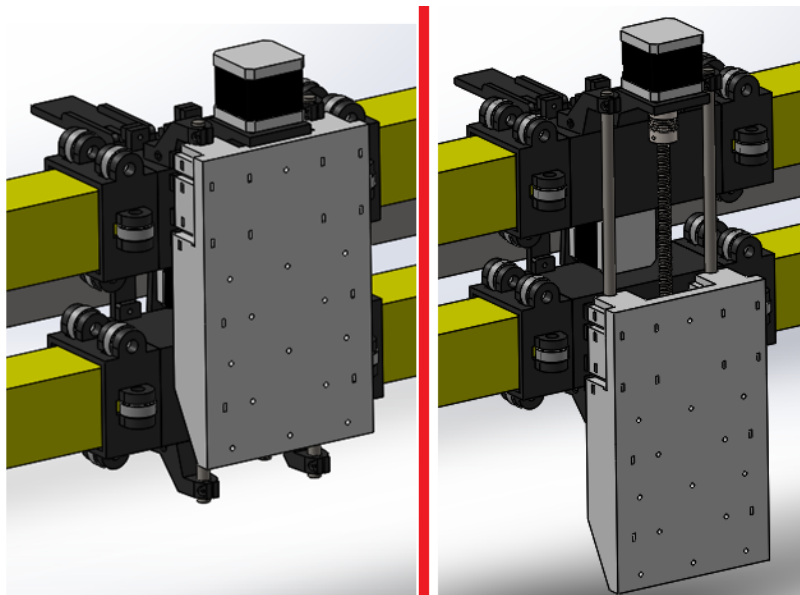


Figura 72. Carro terminal e sua movimentação [Fonte: próprio autor].

5.3.5. SOFTWARE E FIRMWARE

Para o firmware da máquina, programa a ser utilizado na placa de controle – Arduino – foi escolhido o *Grbl versão 0.9*. Este é um programa de código aberto e livre para utilização e modificação. Além disso, é compatível com o *bCNC*, o software escolhido para controle e interface homem-máquina.

O software *bCNC* é indicado mais para trabalhos de fresamento e corte laser. Possui interface simples e de fácil comando, mas não possui conversor de código G. Portanto, é necessário um programa CAM auxiliar para gerar o código G. Caso a opção for de utilizar a máquina como uma impressora 3D, o software *Marlin* é o mais recomendado.

5.4. ANÁLISE DA ESTRUTURA EM ELEMENTOS FINITOS

A título qualitativo foi feita uma análise simplificada da estrutura no software de elementos finitos *Ansys*. O objetivo era descobrir os pontos de maior esforço da máquina para se ter uma ideia de onde o projeto merecia receber atenção e, talvez para futuras melhorias, saber onde se deve trabalhar.

Como o objetivo era uma resposta qualitativa, algumas simplificações foram adotadas. A primeira, como se pode notar nas figuras que se seguem, é que muitas das partes do desenho do projeto foram removidas, para facilitar a computação envolvida. Caso as partes pequenas e menos relevantes não tivessem sido removidas, o computador não seria capaz de efetuar o cálculo em tempo hábil.

Além disso, sabemos que o plástico ABS após impresso em impressoras 3D possui propriedades mecânicas muito complexas, sendo inviável considerá-lo na simulação. Desta forma, tendo em vista o objetivo simplório da simulação, foram consideradas que todas as peças do desenho eram de aço carbono 1045. Esta consideração é importante e altera consideravelmente os resultados, devendo a simulação ser adotada apenas a fim da obtenção de um resultado qualitativo e visual.

Como parâmetros para a simulação, consideraram-se os pés da máquina engastados. Também foi considerada uma força tridimensional aplicada no eixo Z da máquina, onde vão os rolamentos lineares pertencentes ao carro terminal. Essa força possui os valores de tração máximos que os motores escolhidos podem prover, dadas as devidas conversões de torque em força linear, considerando os raios das polias e a rosca da barra. A força simula a ação contrária ao material sendo trabalhado, sendo o pior caso, uma madeira sendo fresada por exemplo em potência máxima de movimentação.

Também foram aplicadas forças opostas às aplicadas ao eixo Z, nos lugares de ancoragem das correias dos eixos X e Y. Desta forma, o sistema todo pode ser simulado e os resultados qualitativos são exibidos à seguir, nas Figura 73 e Figura 74.

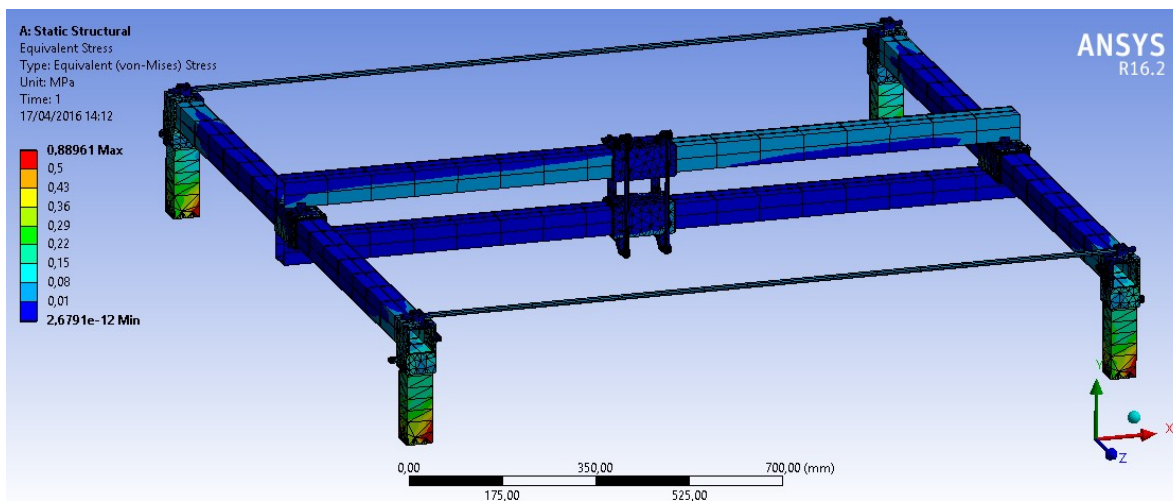


Figura 73. Tensão equivalente de Von Mises na estrutura [Fonte: próprio autor].

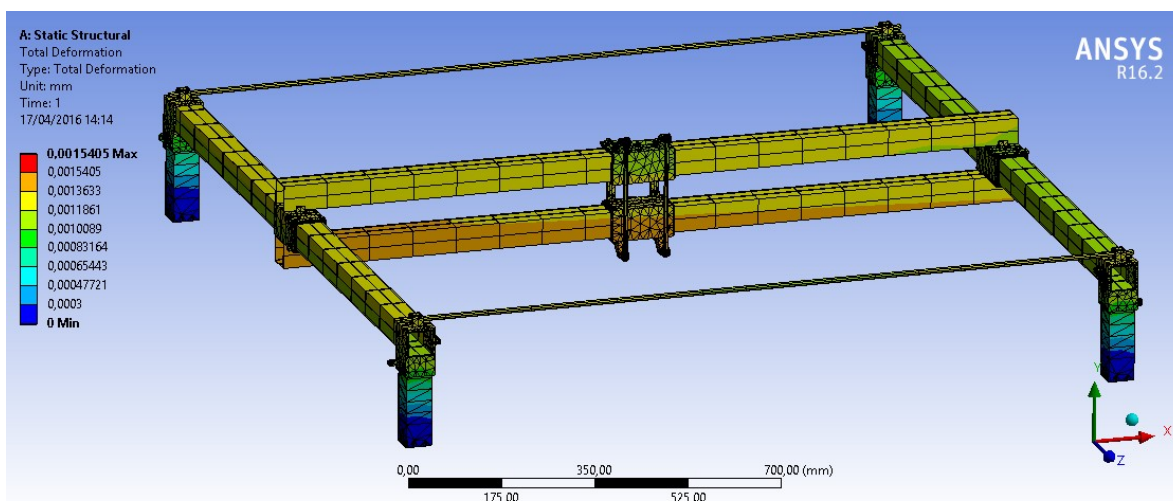


Figura 74. Deflexão total na estrutura [Fonte: próprio autor].

Vemos pelas imagens acima que os pés demonstram os maiores esforços, porém não geram preocupação visto que eles são realmente de aço – metalon – e a tensão mecânica ser relativamente pequena. No entanto, as juntas dos pés com as barras horizontais são feitas de ABS, e aparecem nas imagens como sendo medianamente solicitadas. Os esforços para as peças em ABS são mais sensíveis, e portanto essas peças foram consideradas críticas no projeto. Estas juntas na prática após a montagem da máquina, realmente demonstraram fragilidade e rachaduras não programadas, validando a previsão dada pela simulação.

Além dessas peças mencionadas, as peças mais internas próximas ao carro terminal também aparecem mais solicitadas nas imagens, podendo ser também pontos críticos do projeto já que são feitas em plástico. Essas também são peças que merecem atenção e que podem se revelar problemáticas com o tempo.

5.5.LISTA DE PEÇAS E LISTA DE MATERIAIS

Com a concepção do projeto, e a definição dos componentes a utilizar, foi orçado tudo que era necessário à construção do protótipo final. Buscando sempre as fontes mais baratas, material importado e considerando os valores de frete, o custo da máquina orçado é apresentado na seguinte Tabela 5. O valor total estimado para a construção foi de R\$1.128,63.

A listagem de todas as peças em ABS necessárias para a montagem da máquina pode ser conferida na Tabela 6. Os materiais que após adquiridos devem ser modificados, são especificados na Tabela 7.

Tabela 5. Listagem de todos materiais necessários para a construção da máquina.

CATEGORIA	ITEM	QUANTIDADE		CUSTO R\$		
		NECESSÁRIO	MARGEM	UNITÁRIO	FRETE	TOTAL
FERRAGENS	Metalon Galvanizado 50x50x 1,50 [6 metros]	1	1	R\$ 75,00	0	R\$ 75,00
	Metalon 50x50x1,50 [1 metro]	1	1	R\$ 5,00	0	R\$ 5,00
	Cantoneira Perfil L 1,0x1,0 pol [1500mm]	1	1	R\$ 10,00	0	R\$ 10,00
	Barra Roscada 3/8 pol [3 metros]	1	1	R\$ 15,00	0	R\$ 15,00
	Barra Roscada 5/16 pol [1 metro]	1	1	R\$ 5,00	0	R\$ 5,00
COMPONENTES GERAIS	Correia GT2 [rolo 2 metros]	3	3	R\$ 6,50	0	R\$ 19,50
	Polia GT2 16 dentes	3	3	R\$ 3,75	0	R\$ 11,25
	Plástico ABS para impressora 3D [kg]	1,8	3	R\$ 120,00	0	R\$ 360,00
	Rolamentos 608 [Z, ZZ ou 2-RS]	52	60	R\$ 0,75	R\$ 17,00	R\$ 62,00
	Esteira Porta Cabos 10x30mm [1 metro]	1	1	R\$ 39,24	0	R\$ 39,24
	Acoplamento Motor Passo 5 x 8mm	1	1	R\$ 3,56	0	R\$ 3,56
	Abraçadeiras de Nylon [20cm]	25	30	R\$ 0,07	0	R\$ 2,10
	Eixo Linear 8mm [500mm]	1	1	R\$ 7,00	0	R\$ 7,00
	Rolamentos Lineares 8mm	4	4	R\$ 2,00	0	R\$ 8,00
	Dissipadores de Calor para os drivers	4	5	R\$ 0,50	0	R\$ 2,50
ELÉTRICA/ELETRÔNICA	Shield Ramps 1.4	1	1	R\$ 15,26	0	R\$ 15,26
	Arduíno Mega	1	1	R\$ 34,00	0	R\$ 34,00
	Driver A4988	4	4	R\$ 3,00	0	R\$ 12,00
	Motor de Passo Nema 17 [5,5 kgf]	4	4	R\$ 65,00	0	R\$ 260,00
	Fonte Chaveada 24V [mín. 15A]	1	1	R\$ 81,00	R\$ 19,00	R\$ 100,00
	Micro Sensores Fim de Curso	3	3	R\$ 5,40	0	R\$ 16,20
	Cabo 4 Vias para Interfone 26AWG[metros]	10,5	11,5	R\$ 0,50	0	R\$ 5,75
	Mini Ventilador para os drivers	2	2	R\$ 3,50	0	R\$ 7,00
ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	Parafuso 5/16 x 1,25"	30	30	R\$ 0,40	0	R\$ 12,00
	Parafuso 5/16 x 3"	8	8	R\$ 0,60	0	R\$ 4,80
	Parafuso M2x12mm	4	4	R\$ 0,08	0	R\$ 0,32
	Parafuso M3x16mm	58	60	R\$ 0,08	0	R\$ 4,80
	Porca auto travante M2	4	4	R\$ 0,25	0	R\$ 1,00
	Porca auto travante M3	42	45	R\$ 0,25	0	R\$ 11,25
	Porca auto travante 5/16"	38	38	R\$ 0,25	0	R\$ 9,50
	Porca comum 3/8"	8	8	R\$ 0,15	0	R\$ 1,20
	Porca auto travante 3/8"	4	4	R\$ 0,35	0	R\$ 1,40
	Arruela Aba Larga 5/16" ou M8	6	6	R\$ 0,70	0	R\$ 4,20
	Arruela comum M2	4	4	R\$ 0,20	0	R\$ 0,80
	Arruela comum M3	10	10	R\$ 0,20	0	R\$ 2,00
TOTAL GERAL					R\$ 1.128,63	

Tabela 6. Listagem de todas as peças a serem impressas em ABS.

PEÇA	QUANTIDADE
PT1 Carro X e Y	6
PT1.1 Carro X	1
PT1.1 Carro X mirror	1
PT2.1 Carro X	2
PT2.2 Carro X	2
SuporteCorreiaX	1
SuporteCorreiaXmirror	1
PT2.1 Carro Y	1
PT2.2 Carro Y	1
PT3.1 Carro Y	1
PT3.2 Carro Y	1
PT4 Carro Y	4
PT5 Carro Y	2
SuportePes	2
SuportePes mirror	2
Pes	4
MontanteMotor X e Y	3
MontanteMotor Z	1
Carro Z	1
FixadorEsteira	1
PrendedorLM8	8
Caixa_Control_1	1
Caixa_Control_2	2
TOTAL	49

Tabela 7. Materiais a serem modificados para o projeto.

ITEM	
ORIGINAL	MODIFICADO
Metalon Galvanizado 50x50x 1,50 [7 metros]	(x2) 1450mm (x2) 1500mm (x4) 230mm
Cantoneira Perfil L 1,0x1,0 pol [1500mm]	1330 mm
Barra Roscada 3/8 pol [3 metros]	2 peças de 1448mm
Barra Roscada 5/16 pol [1 metro]	195 mm
Eixo Linear 8mm [500mm]	2 peças de 240 mm

5.6.PROTOTIPAGEM

Com a definição do design da máquina, seu desenho e seus componentes selecionados, o projeto pode ser dado por concluído. A partir daí, inicia-se a fase de prototipagem, onde o projeto será posto à prova e os testes práticos serão viabilizados.

A primeira etapa para a prototipagem foi a aquisição dos componentes. Rolamentos, correias, motores, ventiladores, tudo foi adquirido conforme a listagem já apresentada. Alguns desses componentes são apresentados nas Figura 75 e Figura 76 a seguir.

Assim, os desenhos foram sendo testados na prática, e recebendo os devidos ajustes. Esse processo de ajuste e impressão de peças durou cerca de quatro meses, até que finalmente todas as peças em ABS necessárias estivessem prontas.

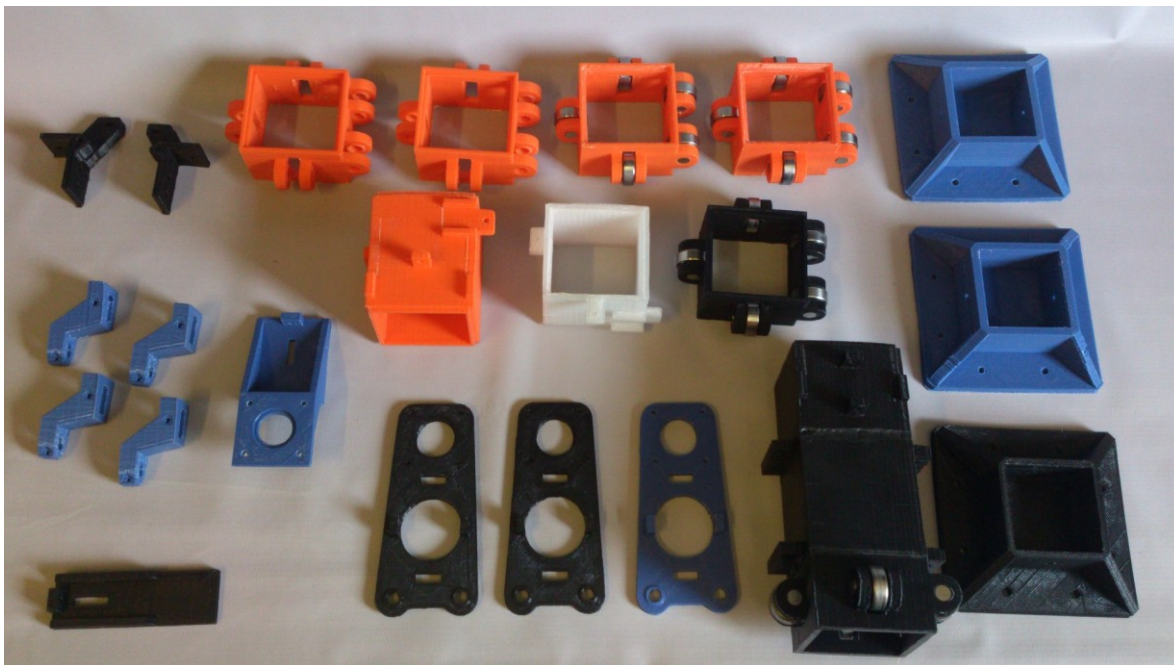


Figura 77. Algumas das partes impressas em plástico ABS [Fonte: próprio autor].

Com as peças prontas, iniciou-se o processo de colagem e montagem. Abaixo (Figura 78) vemos respectivamente, os carros de movimentação X e Y montados com os rolamentos e montantes para os motores, e na imagem seguinte (Figura 79) vemos um dos carros já inseridos no eixo de deslizamento de barra quadrada galvanizada.



Figura 78. Carros X já montados e com os rolamentos [Fonte: próprio autor].



Figura 79. Carro X no metalon - sistema de movimentação [Fonte: próprio autor].

Vale lembrar que para cada peça foi necessário uma tarde de trabalho (média de 6 horas por peça), sendo que a taxa de aproveitamento das peças obtidas na impressora foi baixa, em torno de 50% das peças impressas foram classificadas boas para serem utilizadas, enquanto o restante foi descartado. Os motivos para os descartes foram variados, distribuídos entre falhas da própria impressora e falha em projeto.

Dentre as falhas da impressora (Figura 80) destacam-se queda de energia, deslizamento das correias de movimentação, rompimento do filamento de ABS durante a impressão, descolamento da peça da mesa aquecida de movimentação, superaquecimento dos drivers e consequente perda de passo dos motores, entre outros.

Dentre as falhas de projeto principais (Figura 81) destacaram-se as dimensões incorretas, onde a contração térmica das peças foi prevista erroneamente. Para contornar esse problema foi utilizado a tentativa e erro. Peças do mesmo modelo foram impressas várias vezes com diferentes ajustes nos desenhos, até que se chegasse a um desenho ideal para impressão.

Após a impressão das peças foi necessária uma fase de acabamento das peças em ABS, alargando furos, retirando rebarbas e imperfeições causadas na impressão por, como exemplo, suportes que a própria impressora constrói no projeto para melhorar a peça final. Esses suportes são feitos geralmente em furos construídos verticalmente, onde se faz necessário um apoio central para a deposição de material da parte superior do furo sem que o interior seja preenchido permanentemente, mas apenas temporariamente por um suporte.



Figura 80. Peças refugadas por falhas da impressora [Fonte: próprio autor].

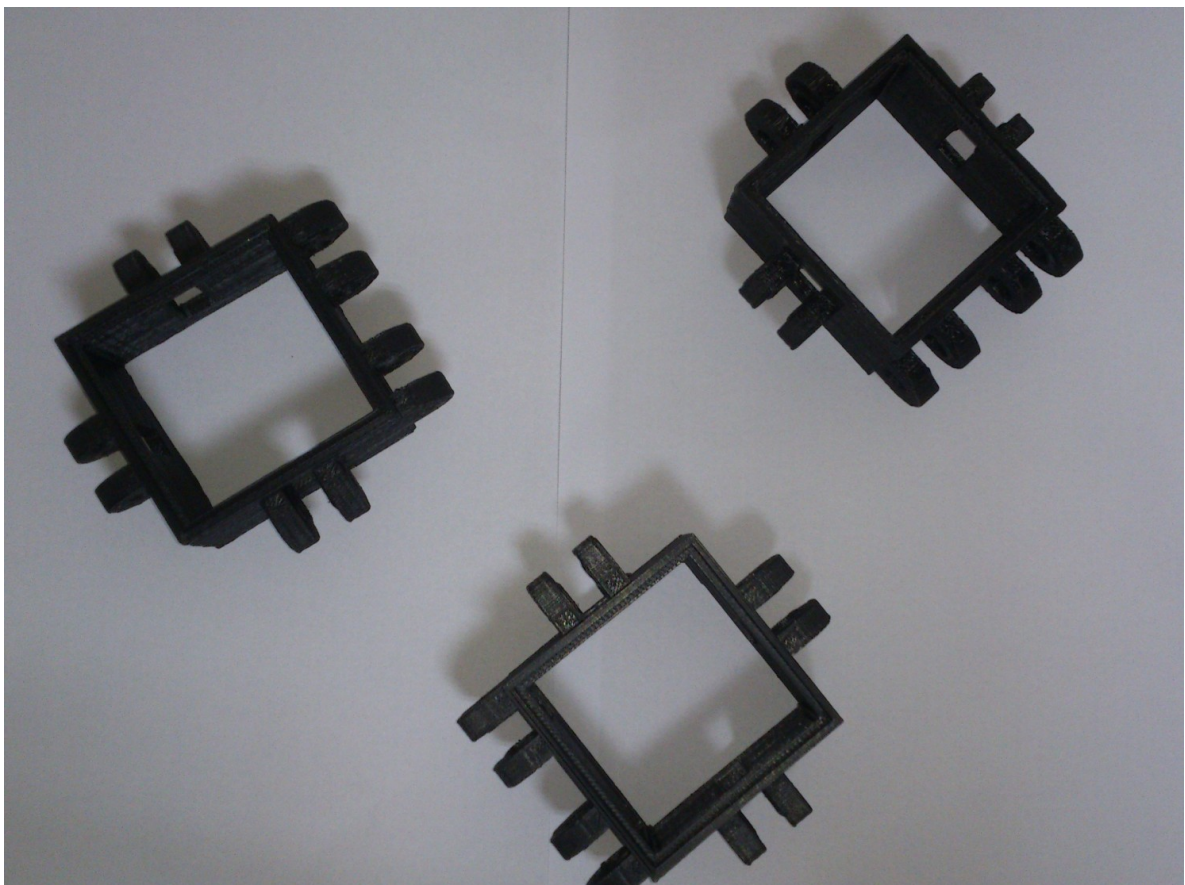


Figura 81. Peças refugadas por falhas de projeto - fase de ajustes [Fonte: próprio autor].

Após a fase de construção das peças em ABS houve a fase de serralheria. As barras quadradas tinham que ser cortadas no tamanho correto, e isso foi feito com a ajuda de uma máquina de corte serra-fita presente nos laboratórios de usinagem da UFU. Também foi recorrido à utilização uma máquina de corte especial de materiais duros para o corte dos eixos utilizados por dentro dos rolamentos dos carros. Os eixos cortados eram de aço inox e por isso sua dureza impossibilitava que o corte fosse feito de qualquer maneira.

Com os materiais prontos, a montagem continuou pela montagem definitiva da estrutura, colocação de parafusos, e alinhamento prévio de eixos (mais adiante esse alinhamento seria refinado).

Após a montagem completa da parte mecânica, foram posicionadas as correias, parafusados os motores em seus devidos lugares, colocada a esteira porta-cabos do eixo Y e colados os sensores de fim de curso nos devidos eixos, de forma a serem acionados quando a estrutura estivesse praticamente no final de cada eixo. Nesse instante, a máquina estava como na Figura 82 que se segue.

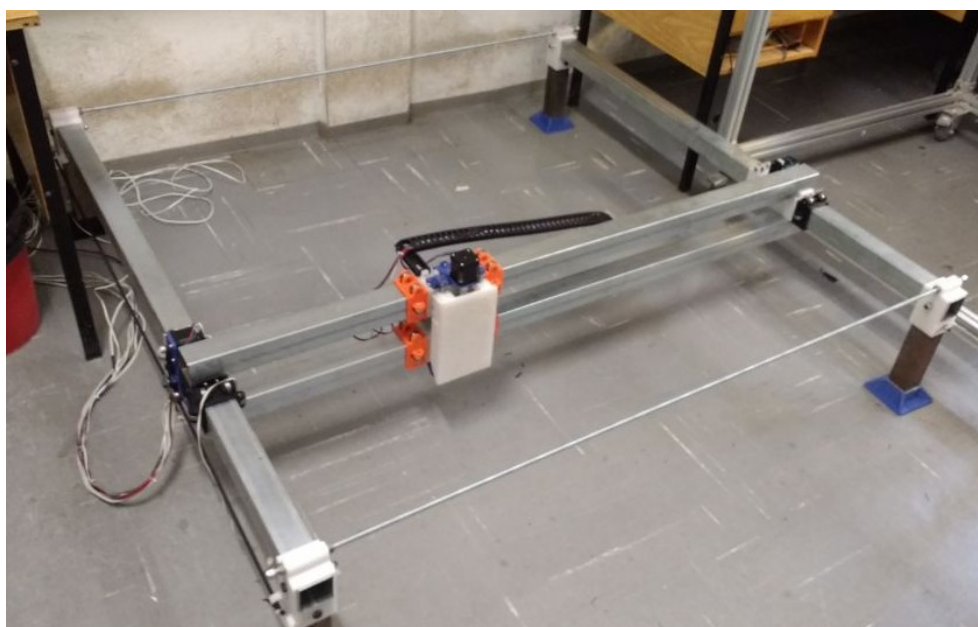


Figura 82. Protótipo em fase final de montagem [Fonte: próprio autor].

Finalmente após todos esses passos, os cabos para motores e sensores foram cortados e posicionados, ao passo que foram soldados aos componentes. No fim de cada cabo foi soldado também os conectores compatíveis com a placa Ramps 1.4, ou com o Arduino Mega. Também foi passado um cabo extra para alimentação da ferramenta de trabalho da máquina, e instalados conectores de rede elétrica normal, prevendo o uso em 110V ou 220V.

Os cabos foram conectados à caixa de comando, onde foram instalados o Arduino Mega, a Ramps 1.4 e os drivers A4988. Também foram instalados na caixa de comando as ventuinhas de refrigeração, onde seu projeto previa orifícios próprios para tal.

Após tudo montado, iniciou-se os ajustes hardware-software. Para que o programa controle corretamente a máquina, é preciso setar os parâmetros físicos da máquina em software. No firmware – Grbl – foram setados alguns parâmetros, cujos principais são

mostrados na Tabela 8. Os valores mostrados para passos por milímetro foram estimados pelo tamanho das polias e passo da barra roscada do eixo Z. Além disso, é preciso considerar para essa estimativa os passos por minuto dos motores de passo, informados pelo fabricante.

Outros valores como taxa máxima de velocidade e aceleração foram setados de acordo com o recomendável por usuários do firmware. Os valores de inversão dos eixos Y e Z foram setados por tentativa e erro, resultantes do posicionamento dos motores e dos sensores de fim de curso de cada eixo. O percurso máximo dos três eixos foi setado respeitando os limites físicos da máquina.

Tabela 8. Principais parâmetros utilizados no firmware Grbl.

VARIÁVEL	VALOR
DEFAULT_X_STEPS_PER_MM	5,3052
DEFAULT_Y_STEPS_PER_MM	5,3052
DEFAULT_Z_STEPS_PER_MM	160
DEFAULT_X_MAX_RATE	2500
DEFAULT_Y_MAX_RATE	2500
DEFAULT_Z_MAX_RATE	500
DEFAULT_X_ACCELERATION	10
DEFAULT_Y_ACCELERATION	10
DEFAULT_Z_ACCELERATION	10
DEFAULT_X_MAX_TRAVEL	1100
DEFAULT_Y_MAX_TRAVEL	1100
DEFAULT_Z_MAX_TRAVEL	150
DEFAULT_STEP_PULSE_MICROSECONDS	10
DEFAULT_DIRECTION_INVERT_MASK	Y E Z
DEFAULT_HOMING_FEED_RATE	25
DEFAULT_HOMING_SEEK_RATE	500

Depois de fazer upload do firmware com os parâmetros acima para o Arduino, foi executado o software de controle da máquina – bCNC. Através de um site, foi gerado o código G da sigla “MAPL” e salvo no computador. O código então foi aberto no bCNC, e o desenho mostrado pronto para execução como na Figura 83.

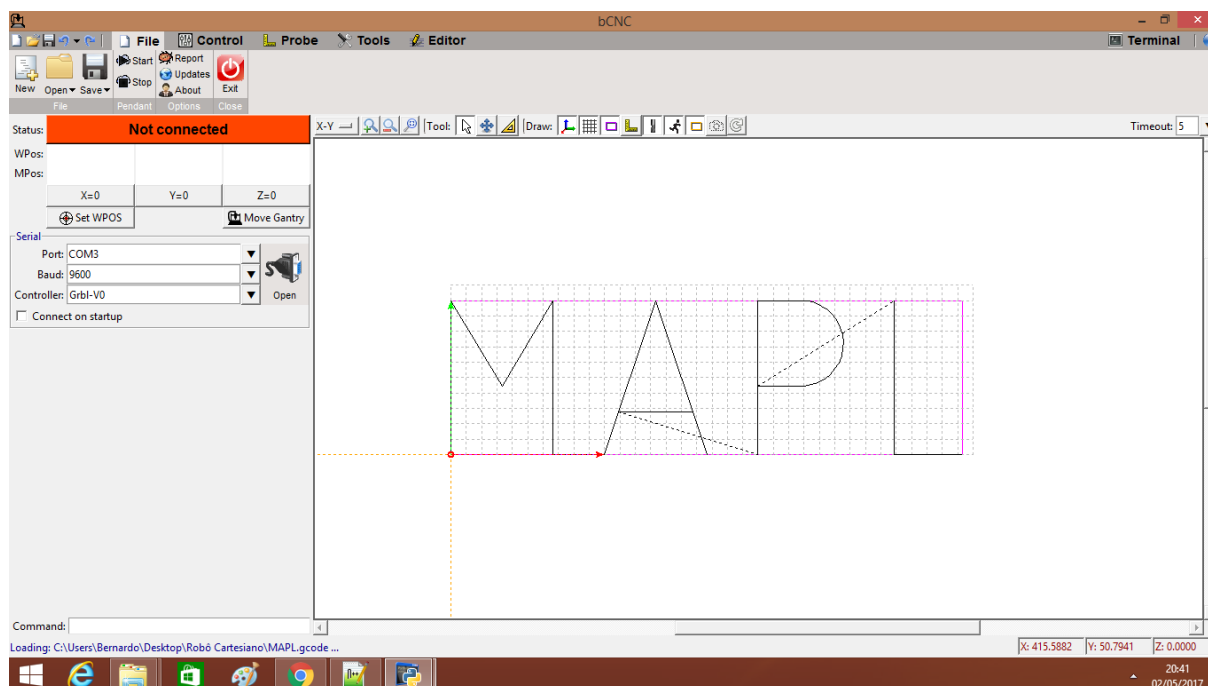


Figura 83. Sigla do MAPL a ser executada no programa bCNC [Fonte: próprio autor].

Finalmente, com a máquina conectada na porta USB do computador o programa foi executado, e após algumas tentativas foi obtido o resultado positivo. Como mostra na Figura 84, a máquina reproduziu o objetivo de escrita, com proporções similares ao desejado, mostrando que os parâmetros de setup estimados inicialmente foram bons. Ainda assim, caso necessário atingir precisão de dimensões, um refinamento do setup inicial é necessário.

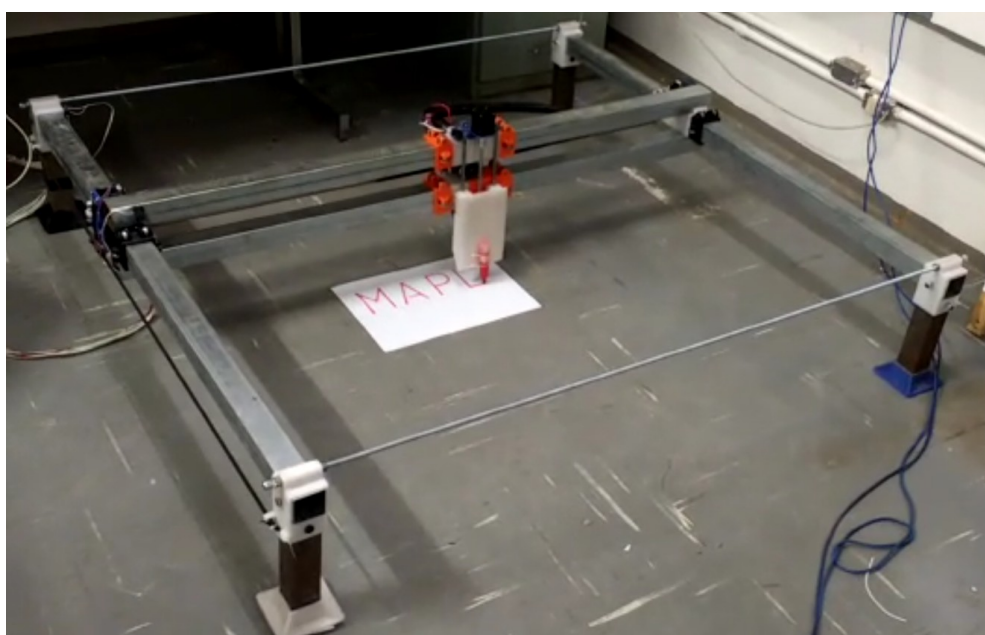


Figura 84. Teste bem sucedido com escrita em papel [Fonte: próprio autor].

5.7.RESULTADOS PRÁTICOS

5.7.1. DESLIZAMENTO CARROS X E Y

Os carros X e Y, projetados para utilizar rolamentos radiais de skate, inicialmente apresentaram grande resistência ao deslizamento, algo causado pela montagem sob pressão (com interferência) que foi inserida propositalmente para atingir um melhor resultado em quesito de precisão da máquina.

Para melhorar o deslizamento, foi utilizado óleo mineral sobre os rolamentos radiais e sobre as barras quadradas de metalon, o que proporcionou mediante testes resultados muito satisfatórios, propiciando o deslizamento fácil sobre os trilhos da máquina sem abrir mão da precisão atingida anteriormente.

Cabe ressaltar que o óleo constantemente seca e a resistência ao deslizamento aumenta, sendo necessário a aplicação do lubrificante novamente. Assim, sempre que for utilizada a máquina é bom que se aplique o óleo nos trilhos dos eixos X e Y.

5.7.2. RIGIDEZ ESTRUTURAL

A rigidez estrutural atingida no conjunto da estrutura atendeu bem às expectativas em dois sentidos cartesianos, dos eixos X e Z. No entanto, no sentido do eixo Y, observou-se uma folga que gerou movimentação anormal da estrutura, podendo levar à deficiências e perda de precisão nesse sentido.

A causa dessa falha foi a peça em ABS que une as barras quadradas do eixo X às barras que compõem as “pernas” da máquina. Essa peça é denominada “Suporte_Pés” no projeto em SolidWorks. As peças não possuem nenhum tipo de ajuste para melhor fixação no ABS além do parafuso posicionado apenas para evitar o deslizamento das barras.

A solução para esse problema é a correção do projeto das peças, fazendo reforço no sentido de suportar melhor os esforços no sentido do eixo Y da máquina, e posicionando dois parafusos de fixação ao invés de apenas um.

5.7.3. SISTEMA DE TRAÇÃO

O sistema de tração escolhido de polia com correias para os eixos X e Y e barra roscada com porca para o eixo Z atendeu bem às expectativas de precisão e movimentação. Para os eixos perpendiculares, a correia conseguiu se estabelecer bem fixa e esticada, no sentido de não apresentar folga significativa e que comprometa a precisão da máquina à médias distâncias – considerando um curso de mais ou menos 70% do curso máximo dos eixos, de 1100mm.

Além disso, a movimentação ficou eficiente, de maneira que os motores não são muito requisitados em perdas mecânicas de movimentação, restando boa parte da potência para o real movimento do spindle da máquina.

A relação de diâmetro das polias escolhidas também casou bem com a velocidade máxima dos motores, dando aos eixos perpendiculares uma boa mobilidade com respostas rápidas, sem abrir mão da força.

Para o eixo Z, a relação de força e velocidade também ficou em uma boa escala de grandeza, sendo a redução provocada pela barra roscada utilizada à favor da máquina, ganhando precisão mas abrindo mão de velocidade nesse eixo que naturalmente demanda menos velocidade de movimento. Além disso, o atrito remanescente entre a barra e a porca é utilizado à favor da máquina mantendo o eixo firme, onde o mesmo só se move quando o motor solicita.

5.7.4. PEÇAS EM ABS

O resultado da utilização de peças impressas em ABS foi satisfatório. As peças atenderam bem à necessidade, apesar de não oferecerem grande resistência mecânica, o que pode ser compensado superdimensionando seu volume.

A liberdade de projeto e prototipagem de peças impressas em 3D é grande, e praticamente qualquer desenho pode se tornar uma peça em poucas horas. Furos e sobressalências devem ser posicionados com cuidado pois para serem realizados durante a impressão são criados “suportes” físicos em ABS, que podem gerar mal acabamento na impressão local.

Cabe destacar que foi observado uma grande diferença de resistência mecânica ao esforço axial de acordo com o sentido da força. As peças são impressas em camadas, e quando a força aplicada coincide com a perpendicular dessas camadas, há uma maior facilidade de rompimento do material, no sentido de descolar as camadas fundidas entre si.

Assim, foi concluído que a posição em que a peça será impressa deve ser escolhida cuidadosamente respeitando os critérios de posicionamento de furos e sobressalências (suportes) e o critério do sentido de maior esforço da peça.

Além disso, foi observado uma contração do tamanho final da peça que varia com suas dimensões, devido ao trabalho a quente ser procedido de resfriamento ao ambiente, resultando em uma diferença dimensional entre o desenho e o produto físico final. Assim, isso deve ser compensado no desenho antes de ligar o trabalho da impressora, apesar de a mesma já possuir um ajuste que procura compensar isso.

SITUAÇÃO GERAL DA IMPRESSÃO DAS PEÇAS (período 02-07 à 27-09)					
PEÇA	QUANTIDADE NECESSÁRIA	QUANTIDADE CONCLUÍDA	COMPLEXIDADE DE FABRICAÇÃO	ESFORÇO NECESSÁRIO	ESFORÇO CONCLUÍDO
PT1 Carro X e Y	6	6	3	18	18
PT1.1 Carro X	1	0	3	3	0
PT1.1 Carro X mirror	1	0	3	3	0
PT2.1 Carro X	2	1	3	6	3
PT2.2 Carro X	2	1	3	6	3
SuporteCorreiaX	1	1	2	2	2
SuporteCorreiaXmirror	1	1	2	2	2
PT2.1 Carro Y	1	1	3	3	3
PT2.2 Carro Y	1	1	3	3	3
PT3.1 Carro Y	1	0	3	3	0
PT3.2 Carro Y	1	0	3	3	0
PT4 Carro Y	4	4	2	8	8
PT5 Carro Y	2	0	1	2	0
SuportePes	2	0	4	8	0
SuportePes mirror	2	0	4	8	0
Pes	4	3	2	8	6
MontanteMotor X e Y	3	3	1	3	3
MontanteMotor Z	1	1	1	1	1
Carro Z	1	0	5	5	0
FixadorEsteira	1	1	1	1	1
PrendedorLM8	8	0	2	16	0
	46	24		112	53
	52,17%			47,32%	

Figura 85. Relatório de andamento da impressão das peças [Fonte: próprio autor].

Outro ponto notório na fabricação por impressão 3D foi o tempo gasto. Como mostra a Figura 85, em um período de aproximadamente três meses apenas metade das peças haviam sido impressas. Isso se deve a vários fatores, como a falta de experiência do operador da máquina, a falta de ajustes da máquina, os problemas inerentes da própria máquina e sua taxa de aproveitamento, o projeto das peças, e o tempo de impressão de cada peça. Assim, para produção em escala esse é um método lento, que pode não ser suficiente para comercialização da máquina, apesar de compensar com flexibilidade e baixo custo.

5.7.5. SOFTWARE E FIRMWARE

O firmware escolhido – Grbl- apresentou bom funcionamento e não deixou a desejar nos testes realizados com escrita em duas dimensões. A escrita simula o trabalho de uma fresa, levantando e abaixando a ferramenta e criando contornos em duas dimensões. Extrapolando o funcionamento observado para um trabalho de fresamento, a máquina atenderia ao trabalho solicitado.

Cabe lembrar que o firmware não atenderia caso o trabalho fosse de impressão 3D. Para tal, o mais utilizado atualmente é o software Marlin, que poderia ser colocado na placa de controle caso a máquina precisasse ser utilizada com este fim.

O software utilizado – bCNC – apresentou bom funcionamento no teste realizado de escrita em duas dimensões. No entanto, o software não possui gerador de código G, necessário para transformar um arquivo CAD em código de máquina. Assim, um software auxiliar é necessário. Para impressão em 3D, outro software poderia ser utilizado, como o *RepetierHost*.

5.7.6. DESIGN DA MÁQUINA

O design escolhido, o posicionamento dos componentes e a maneira como os eixos de movimentação e tração foram arrançados atendeu aos requisitos de projeto e proveram um bom funcionamento para a máquina no geral.

A movimentação nos três eixos ficou perpendicular e a ferramenta presa ao órgão terminal do robô atingiu boa rigidez. Foi posicionada uma esteira porta-cabos no eixo Y para evitar que os cabos de comando da máquina caíssem sobre a área de trabalho, no entanto para o eixo X isso não foi previsto e essa é uma melhoria que poderia ser feita no projeto.

Outra melhoria possível no projeto é um arranjo melhor dos sensores de fim de curso, que nesse caso foram apenas colados em posições que atenderam à necessidade, podendo ser melhor posicionados e presos de maneira não permanente, permitindo também pequenos ajustes.

A escolha de eixos suspensos, no caso do X e Y, favoreceu o trabalho de fresa da máquina, já que dificulta a impregnação de pequenas partículas nos eixos de deslizamento, o que ocorre em outros projetos de CNC router.

As barras roscadas posicionadas na estrutura foram eficientes para o alinhamento dos dois eixos de deslizamento em X, sendo possível o perfeito paralelismo entre os mesmos. Além disso, as barras contribuem para a rigidez da estrutura no seu sentido lateral, apesar de não terem conseguido prover rigidez o suficiente nesse sentido, que pode ser melhorado.

5.7.7. MULTIFUNCIONALIDADE

O requisito da multifuncionalidade da máquina, ou seja a possibilidade de trabalho com diferentes tipos de manufatura mecânica, foi buscado através de um órgão terminal capaz de receber diferentes cabeçotes de trabalho. A ideia foi fazer um carro Z com dimensões maiores (aproximadamente 10x18cm) e com vários furos, onde podem ser usados parafusos e abraçadeiras de nylon para a fixação de diferentes ferramentas como microretíficas, lasers, entre outros.

Também com esse carro é possível acoplar peças intermediárias feitas na impressora capazes de adaptá-lo a receber ferramentas diversas, prendendo-se com parafusos. Assim, seja com abraçadeiras plásticas ou com peças adaptadoras e parafusos, é possível acoplar ao carro Z da máquina praticamente qualquer ferramenta.

Desta maneira, o objetivo da multifuncionalidade foi atingido. É possível trabalhar com fresa, laser, impressão 3D, e qualquer outro tipo de ferramenta na máquina desenvolvida. Pode-se dizer que o projeto atende ao requisito citado.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como apresentado, foi feito uma ampla pesquisa e estudo dos mecanismos de máquinas CNC e seus componentes. Projetos já existentes foram analisados e um novo projeto com características específicas foi concebido. Além disso, componentes foram definidos e adquiridos, prosseguidos da prototipagem da máquina. Com tudo isso, os objetivos do trabalho podem ser ditos alcançados.

Muitas lições também foram aprendidas, com o desenvolvimento do trabalho. As primeiras a se listar são as dificuldades inerentes de um projeto. Desenvolver algo novo, do início ao fim, respeitando um prazo e tentando utilizar o mínimo de recursos financeiros, contornando os problemas encontrados ao longo do caminho, é uma tarefa árdua.

Um projeto envolve vários desafios que podem ser mais facilmente contornados quando se busca ajuda externa. Além do conhecimento agregado na ajuda mútua, também existe a questão do olhar de fora. Muitas vezes a solução para um impasse é mais fácil de se enxergar para quem vem de um contexto mais amplo, fora da realidade do projeto.

Também destaca-se a importância de se utilizar, sempre que possível, tecnologias já existentes. As coisas já desenvolvidas tendem a ser mais eficientes e de menor custo, principalmente financeiro. O esforço deve ser focado em desenvolver algo que ainda não existe para que o resultado valha a pena.

Durante o projeto, o foco no objetivo foi essencial. A máquina CNC deveria ao final do período demonstrar funcionamento, independentemente do que transcorresse até ali. Havia requisitos e restrições para tal, a ser geridos junto com recursos como tempo e dinheiro, para que no fim o objetivo fosse alcançado.

Durante o trabalho dificuldades foram encontradas. A pouca bibliografia sobre o assunto, por exemplo, dificultou inicialmente a obtenção de informações. Isso no entanto foi suprimido pelas informações trazidas em fóruns online na internet. Esses fóruns especificamente trazem muita informação, disjunta e desorganizada, e de fontes duvidosas. Assim, a fonte mais rica de informação encontrada deveria estar sempre sendo filtrada e questionada por um olhar mais crítico, para o desenvolvimento do trabalho.

A fabricação por impressão 3D também se mostrou um desafio no processo de produção das peças. Como mencionado, muitas peças foram refugadas, e a taxa de aproveitamento foi baixa. Além disso, temos o agravante das impressões serem demoradas. Por outro lado a impressão foi feita em um tipo de impressora mais acessível, podendo ser otimizada caso feita em impressoras mais profissionais. Também destaca-se a facilidade de prototipagem pela impressora, sendo que com um desenho em CAD de praticamente qualquer peça pode-se facilmente obter um modelo em poucas horas.

Por fim, analisando aos requisitos adotados para o projeto inicialmente, e os testes finais com a máquina, podemos admitir que a multifuncionalidade, o volume de trabalho proposto e o controle de gastos afim de atingir um baixo custo, foram requisitos atingidos. Por se tratar de um protótipo inicial, e um projeto feito com recursos limitados incluindo o tempo, ainda existem pontos a melhorar no projeto como por exemplo a rigidez da estrutura. No entanto, com os requisitos englobados, os testes de funcionamento tendo retornado resultados positivos e os objetivos atingidos, podemos concluir que o projeto foi bem sucedido.

7. PROJETOS FUTUROS

7.1. OTIMIZAÇÃO DE CARREGAMENTO DE CONTÊINERS

Projeto de mestrado que utilizará o robô cartesiano desenvolvido para movimentar peças que simbolizam contêineres, simulando o carregamento de navios cargueiros e podendo assim, testar algoritmos de otimização.

7.2. MAPEAMENTO DE LABIRINTO POR IMAGEM

Projeto de doutorado que trabalha com um software que mapeia e resolve pequenos labirintos percorridos por robôs, onde a máquina CNC será utilizada para movimentar uma câmera fotográfica sobre o labirinto e permitir a captura de imagens. Esse projeto, e o respectivo labirinto, foram a causa da necessidade da área útil de 1,10x1,10m.

7.3. PROJETO DE FIRMWARE E SOFTWARE PRÓPRIOS

Uma sugestão como projeto futuro envolvendo o protótipo seria sua utilização como “cobaia” para testes de software e/ou firmware desenvolvidos por alunos. Assim, a programação poderia ser testada na máquina, permitindo a observação prática do código desenvolvido.

7.4. MODELAGENS CINEMÁTICAS DE TRAJETÓRIAS

Outra sugestão de trabalhos que poderiam ser desenvolvidos com o uso do robô cartesiano seria para cálculo e/ou teste de trajetórias cinemáticas, utilizando os modelos de predição e orientação de movimentos.

7.5. ESTUDOS EM MÉTODOS DE FABRICAÇÃO MECÂNICOS

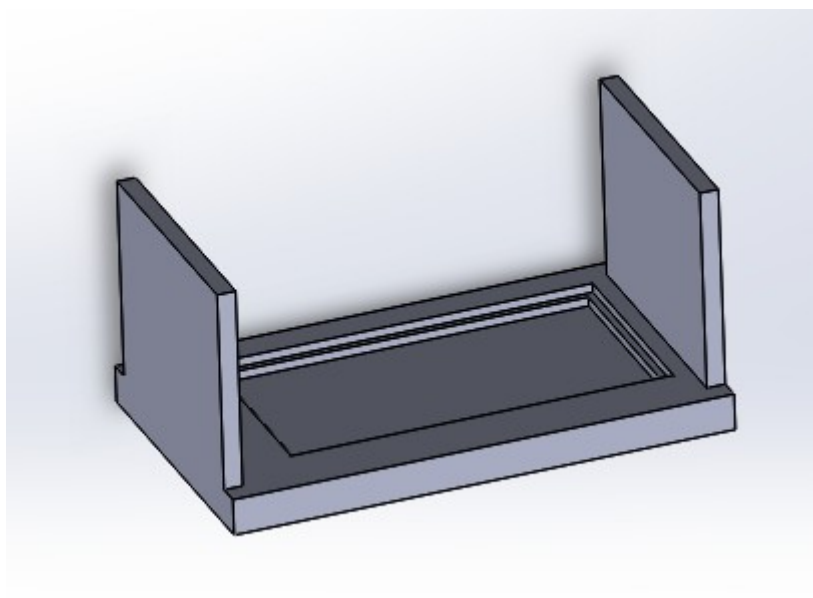
Outra sugestão de estudos sobre a máquina seria o tema de fabricação mecânica. O protótipo poderia ser utilizado para testes de usinagem computadorizada, bem como solda, furação e/ou corte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

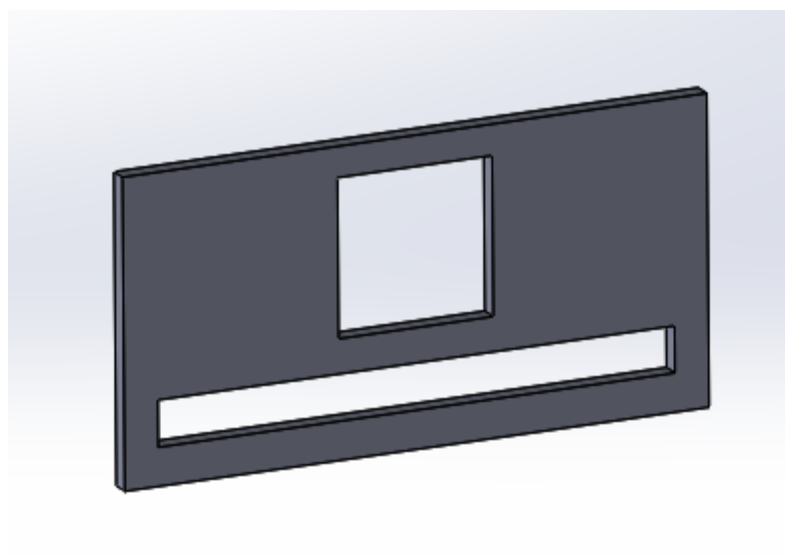
- [1] - GROOVER, M. P., Automação Industrial e Sistemas de Manufatura. 3ª. Edição, Editora Pearson Education do Brasil, 2010.
- [2] - FITZGERALD, A.E., Máquinas Elétricas. 6ª Edição, Editora Artmed.
- [3] – BRITES, F. G; SANTOS, V. P. A., Motor de Passo. Niteroi, Julho de 2008.
- [4] - www.pololu.com/file/download/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf?file_id=0J450, acesso em 10/04/2016.
- [5] - <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-sobre-motor-de-passo>, acesso em 11/04/2016.
- [6] - <http://www.guiacnc.com.br/projetos-de-usuarios/startrecko/>, acesso em 09/04/2016.
- [7] - <http://www.clubecncbrasil.com.br/clubecnc/index.php>, acesso em 09/04/2016.
- [8] - <http://www.guiacnc.com.br/projetos-de-usuarios/starpower-cassio-alvarenga/>, acesso em 09/04/2016.
- [9] - <https://eshop.ntn-snr.com/pt/608-ZZ-668534.html>, acesso em 09/04/2016.
- [10] - <http://www.guiacnc.com.br/projetos-de-usuarios/projeto-cnc-havell/>, acesso em 09/04/2016.
- [11] - <http://omecatronico.com.br/blog/introducao-as-impressoras-3d-eletronica/>, acesso em 18/04/2016.
- [12] - https://pt.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrila_butadieno_estireno, acesso em 02/03/2017.
- [13] - <https://pt.wikipedia.org/wiki/Stakeholder>, acesso em 07/03/2017.
- [14] – Todas as figuras foram acessadas em 29/07/2017 pelos sites indicados nas legendas.

9. APÊNDICE

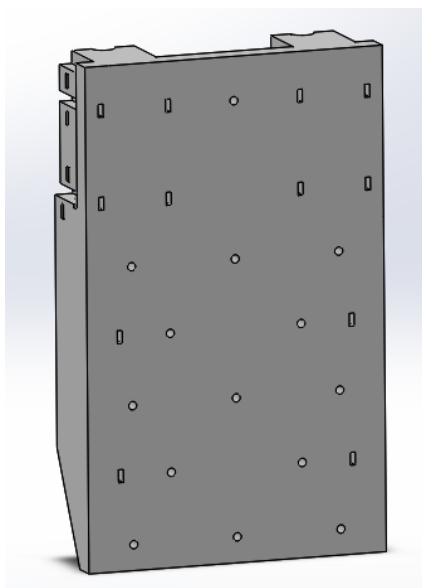
APÊNDICE A – Peça “Caixa_Control_1”



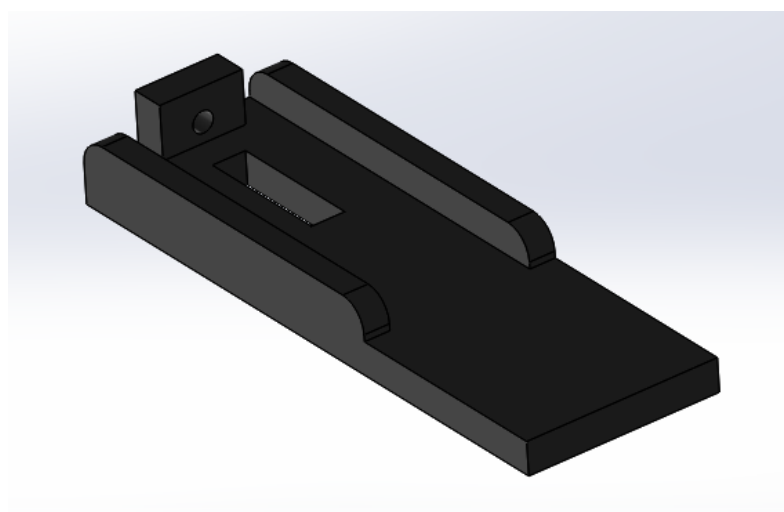
APÊNDICE B – Peça “Caixa_Control_2”



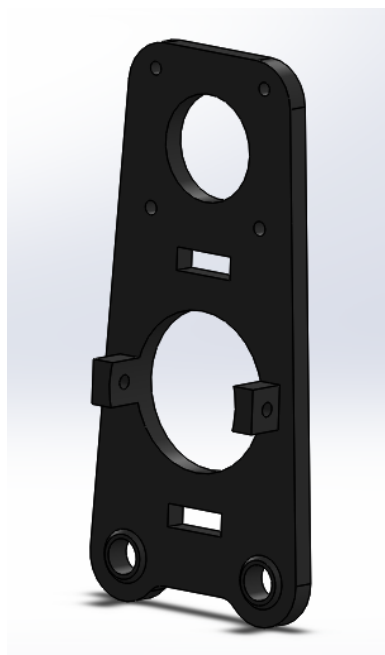
APÊNDICE C – Peça “CarroZ”



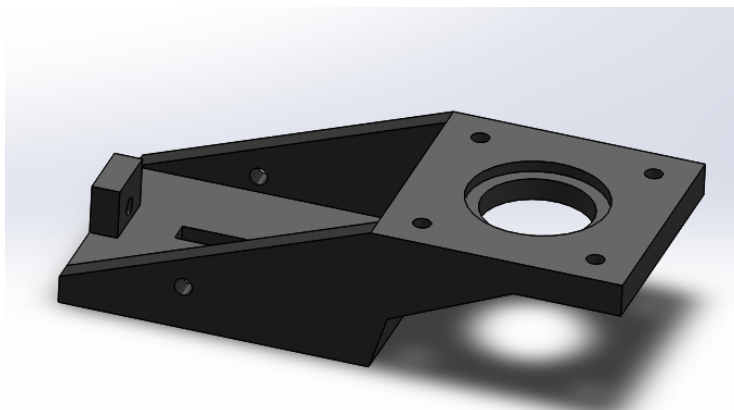
APÊNDICE D – Peça “FixadorEsteira”



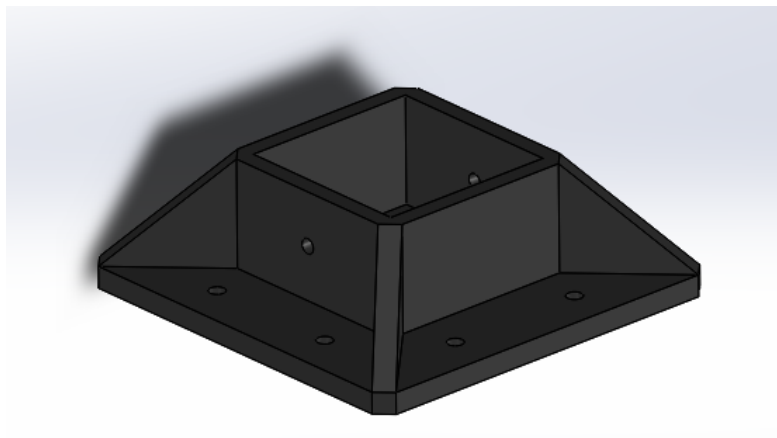
APÊNDICE E – Peça “MontanteMotorXeY”



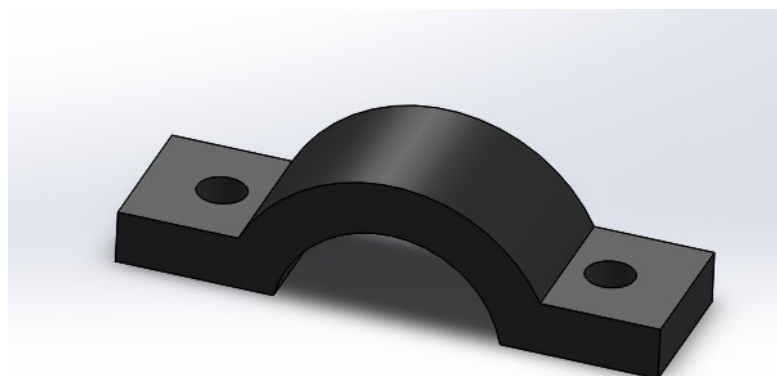
APÊNDICE F – Peça “MontanteMotorZ”



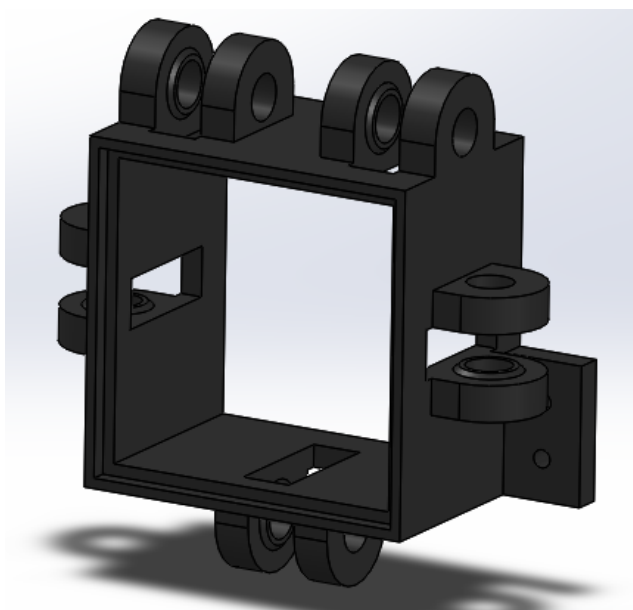
APÊNDICE G – Peça “Pes”



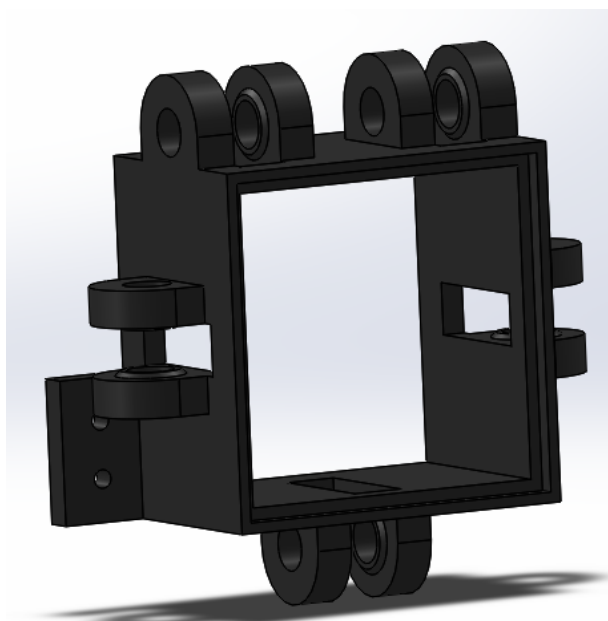
APÊNDICE H – Peça “PrendedorLM8”



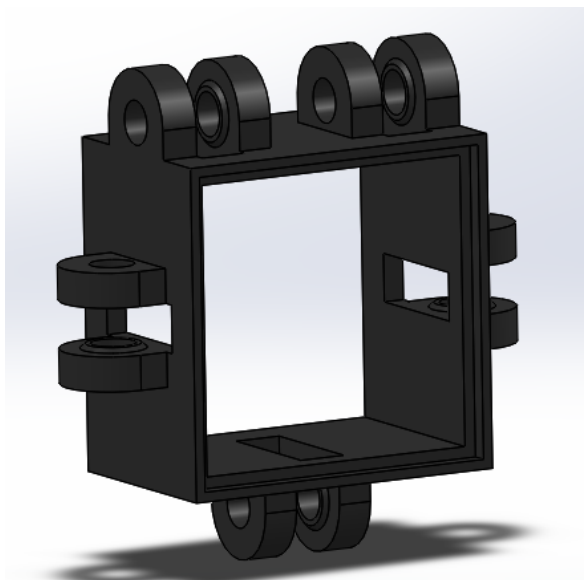
APÊNDICE I – Peça “PT1.1_CarroX”



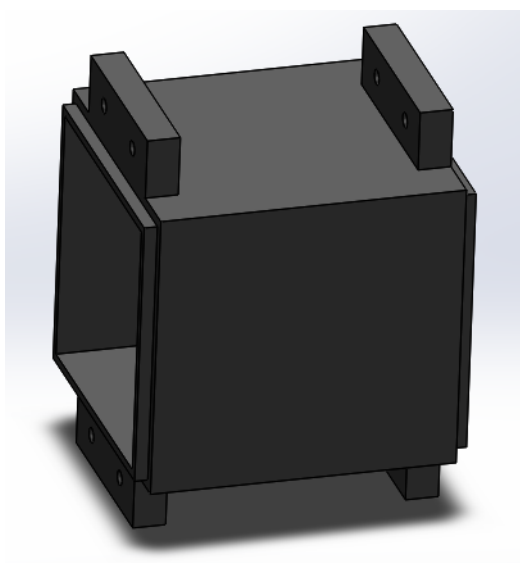
APÊNDICE J – Peça “PT1.1_CarroXmirror”



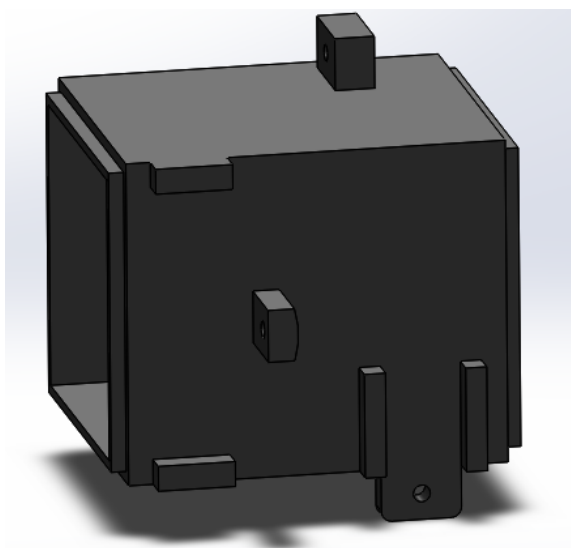
APÊNDICE K – Peça “PT1_CarroXeY”



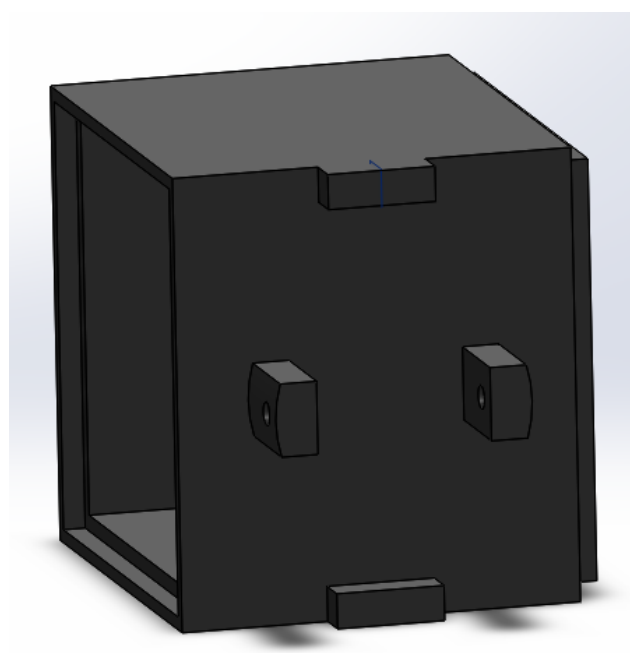
APÊNDICE L – Peça “PT2.1_CarroX”



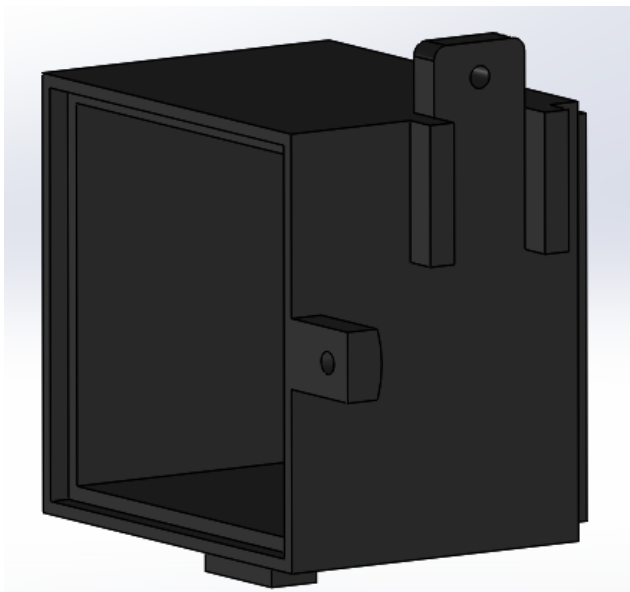
APÊNDICE M – Peça “PT2.1_CarroY”



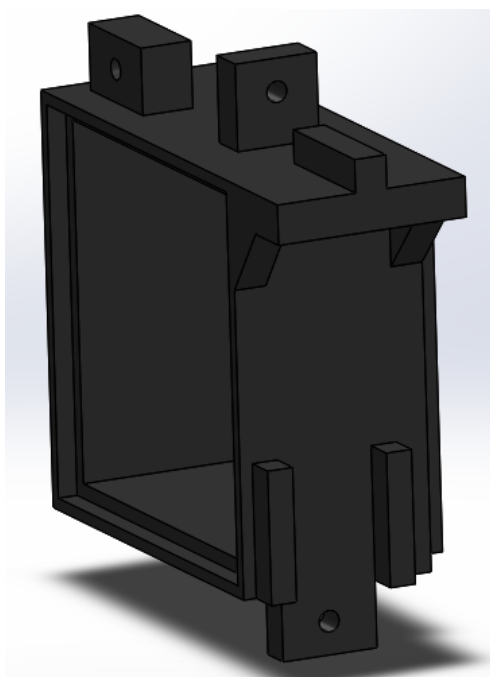
APÊNDICE N – Peça “PT2.2_CarroX”



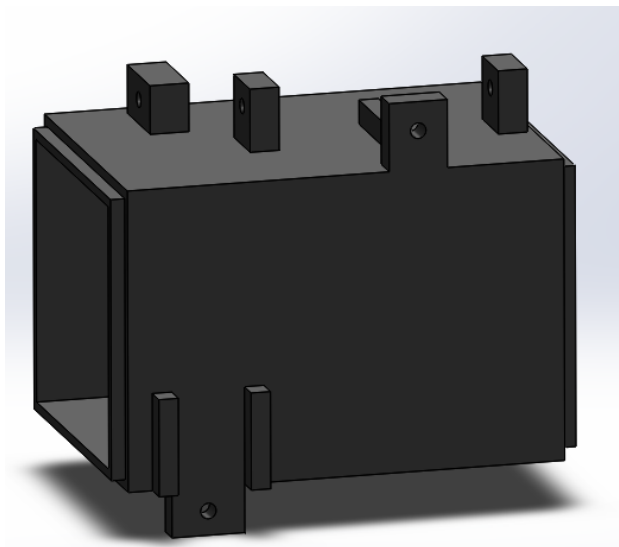
APÊNDICE O – Peça “PT2.2_CarroY”



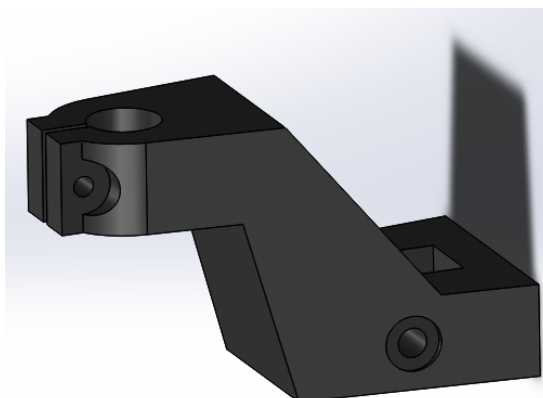
APÊNDICE P – Peça “PT3.1_CarroY”



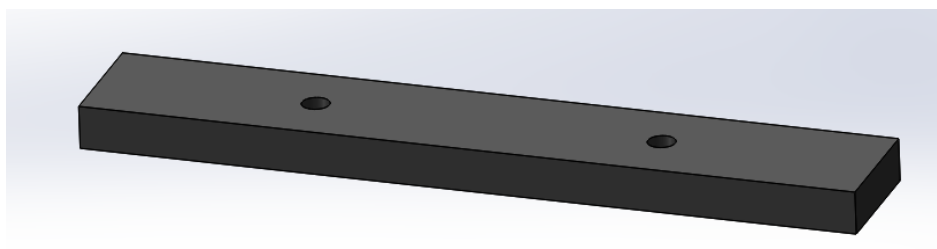
APÊNDICE Q – Peça “PT3.2_CarroY”



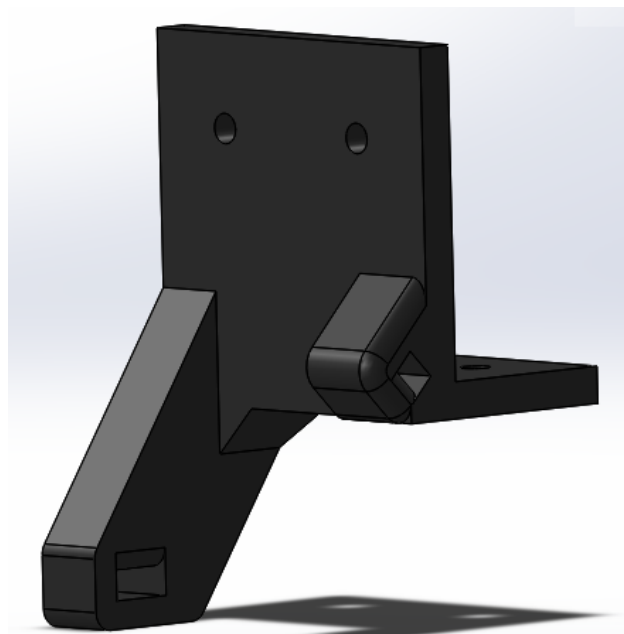
APÊNDICE R – Peça “PT4_CarroY”



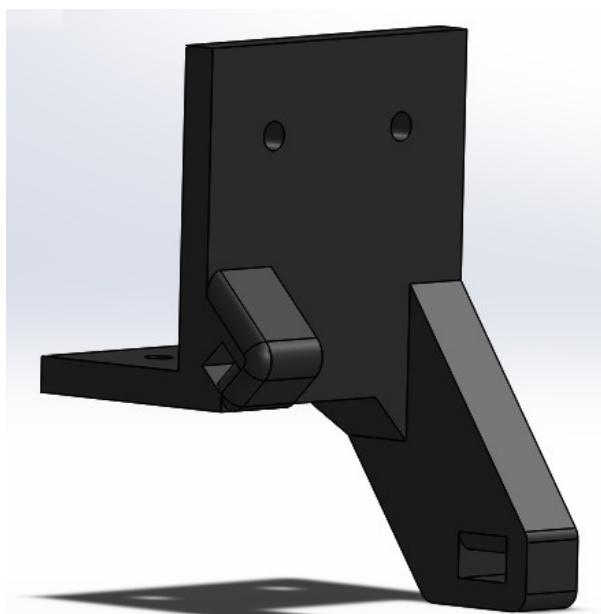
APÊNDICE S – Peça “PT5_CarroY”



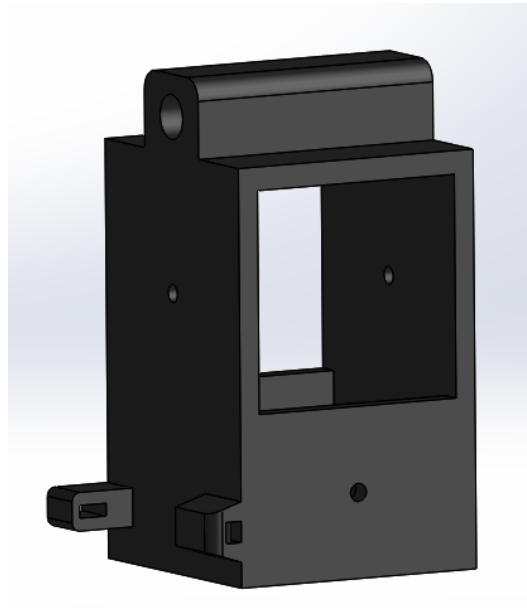
APÊNDICE T – Peça “SuporteCorreiaX”



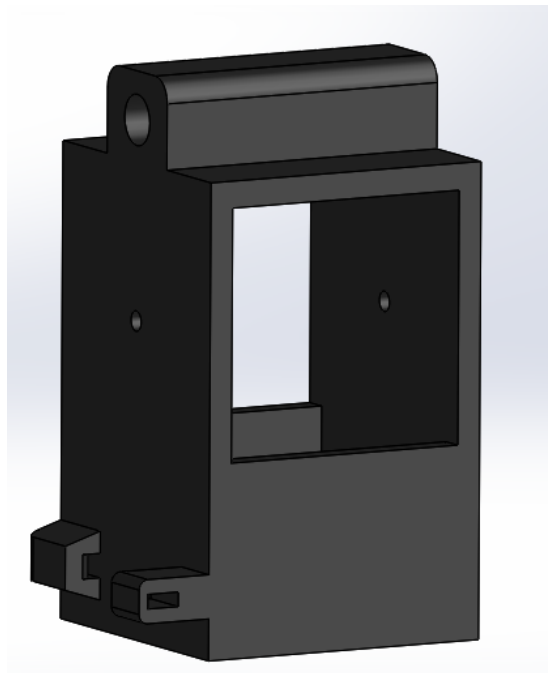
APÊNDICE U – Peça “SuporteCorreiaXmirror”



APÊNDICE V – Peça “SuportePes”



APÊNDICE W – Peça “SuportePesmirror”



10. ANEXOS

ANEXO A – Datasheet Rolamento Radial 608 ZZ



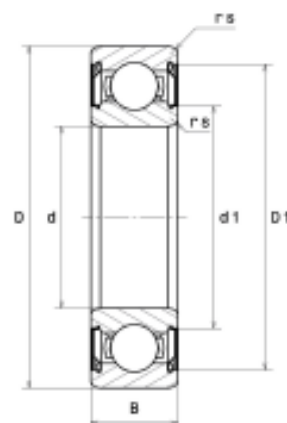
Ficha técnica em PDF 608.ZZ



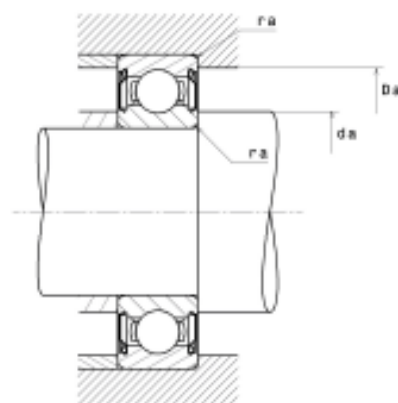
Rolamentos de uma carreira de esferas

Rolamento rígido de esferas, carga radial, gaiola em aço, blindagem nos dois lados

Características técnicas	
d	8 mm
D	22 mm
B	7 mm
d1	11,20 mm
D1	19,10 mm
rs mín	0,30 mm
Classe de folga radial	CN
Peso	0,01 kg
Marca	SNR



Desempenho	
Capacidade de carga dinâmica, C	3,15 kN
Capacidade de carga estática, C ₀	1,37 kN
Limite de de carga à fadiga, C _u	0,10 kN
f ₀	12,4
N _{ref}	32.000 r.p.m.
N _{lim}	46.000 r.p.m.
Temperatura mín, T _{mín}	-20 °C
Temperatura máx. de operação	120 °C
Frequência de giro da gaiola, FTF	0,37 Hz
Frequência de giro do elemento rolante, BSF	3,52 Hz
Frequência de passagem na pista externa, BPFO	2,57 Hz
Frequência de passagem na pista interna, BPFI	4,43 Hz



ANEXO B – Datasheet Driver A4988

**A4988**

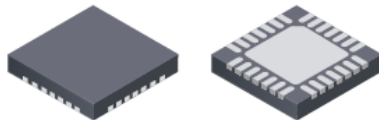
DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

Features and Benefits

- Low $R_{DS(ON)}$ outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full, $1/2$, $1/4$, $1/8$, and $1/16$

Package:

28-contact QFN
with exposed thermal pad
5 mm × 5 mm × 0.90 mm
(ET package)



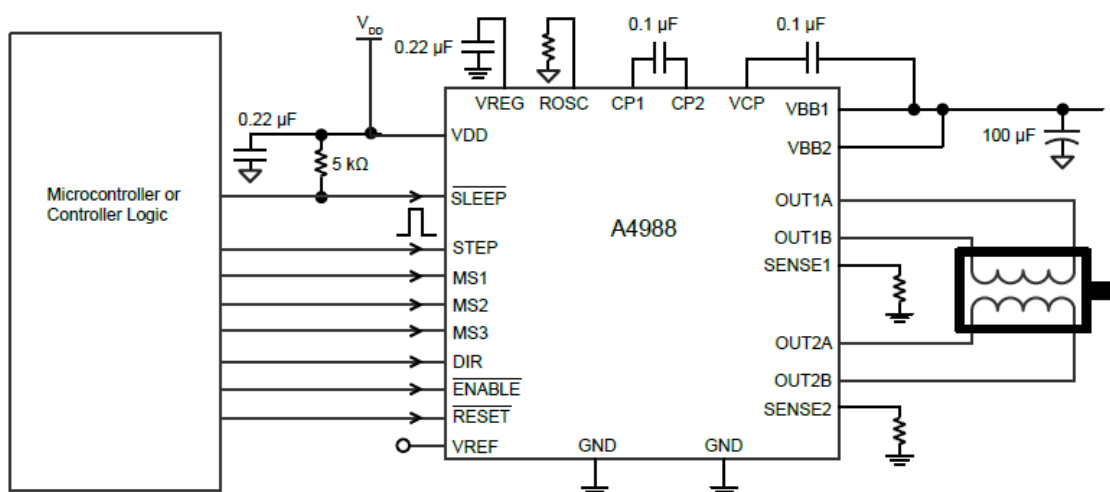
Approximate size

Description

The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and ± 2 A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

*Continued on the next page...***Typical Application Diagram**

A4988***DMOS Microstepping Driver with Translator
And Overcurrent Protection*****Description (continued)**

Internal synchronous rectification control circuitry is provided to improve power dissipation during PWM operation. Internal circuit protection includes: thermal shutdown with hysteresis, undervoltage lockout (UVLO), and crossover-current protection. Special power-on sequencing is not required.

The A4988 is supplied in a surface mount QFN package (ES), 5 mm × 5 mm, with a nominal overall package height of 0.90 mm and an exposed pad for enhanced thermal dissipation. It is lead (Pb) free (suffix -T), with 100% matte tin plated leadframes.

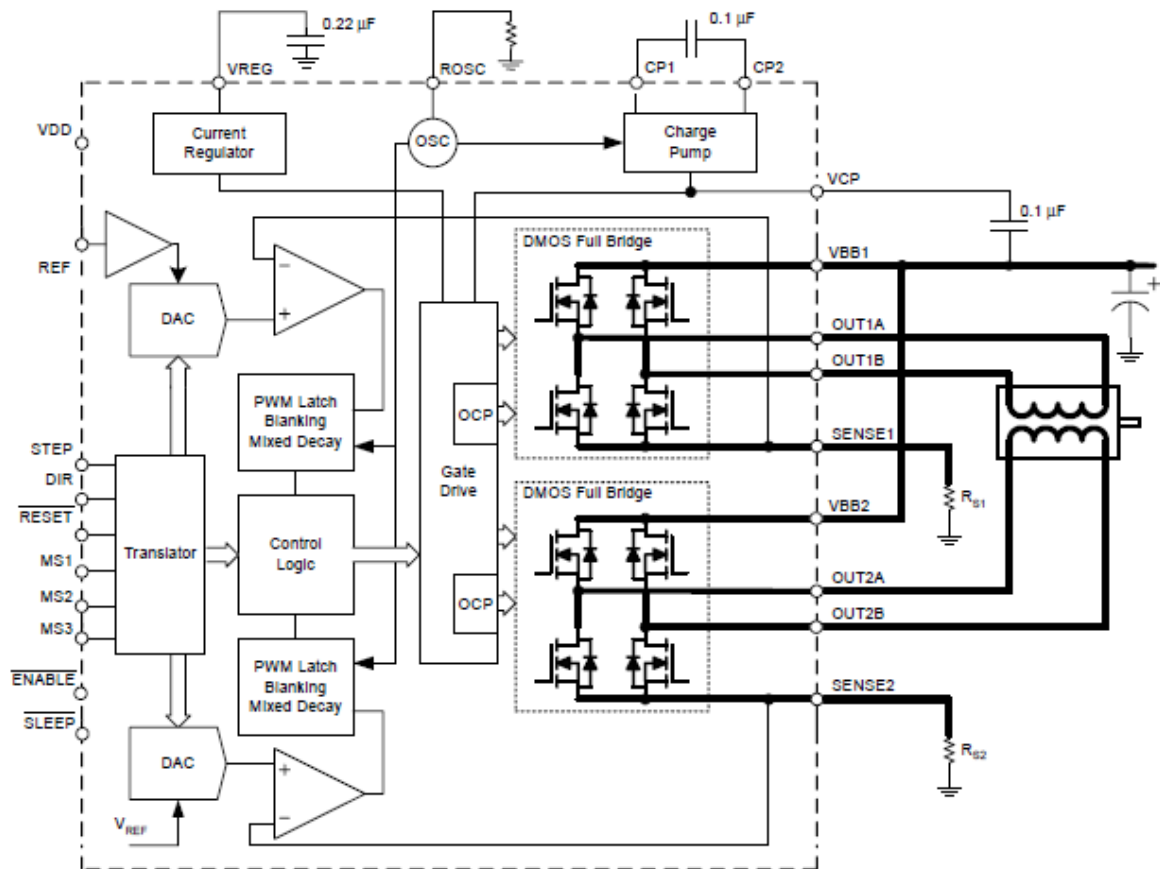
Selection Guide

Part Number	Package	Packing
A4988SETTR-T	28-contact QFN with exposed thermal pad	1500 pieces per 7-in. reel

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		35	V
Output Current	I_{OUT}		±2	A
Logic Input Voltage	V_{IN}		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	V_{DD}		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	V_{SENSE}		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	V_{REF}		5.5	V
Operating Ambient Temperature	T_A	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-55 to 150	°C



A4988***DMOS Microstepping Driver with Translator
And Overcurrent Protection*****Functional Block Diagram**

A4988**DMOS Microstepping Driver with Translator
And Overcurrent Protection****ELECTRICAL CHARACTERISTICS**¹ at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{BB} = 35\text{ V}$ (unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. ²	Max.	Units
Output Drivers						
Load Supply Voltage Range	V _{BB}	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	V _{DD}	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	R _{DS(on)}	Source Driver, I _{OUT} = –1.5 A	–	320	430	mΩ
		Sink Driver, I _{OUT} = 1.5 A	–	320	430	mΩ
Body Diode Forward Voltage	V _F	Source Diode, I _F = –1.5 A	–	–	1.2	V
		Sink Diode, I _F = 1.5 A	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	I _{BB}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	I _{DD}	f _{PWM} < 50 kHz	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	V _{IN(1)}		V _{DD} ×0.7	–	–	V
	V _{IN(0)}		–	–	V _{DD} ×0.3	V
Logic Input Current	I _{IN(1)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.7	–20	<1.0	20	μA
	I _{IN(0)}	V _{IN} = V _{DD} ×0.3	–20	<1.0	20	μA
Microstep Select	R _{MS1}	MS1 pin	–	100	–	kΩ
	R _{MS2}	MS2 pin	–	50	–	kΩ
	R _{MS3}	MS3 pin	–	100	–	kΩ
Logic Input Hysteresis	V _{HYS(IN)}	As a % of V _{DD}	5	11	19	%
Blank Time	t _{BLANK}		0.7	1	1.3	μs
Fixed Off-Time	t _{OFF}	OSC = VDD or GND	20	30	40	μs
		R _{OSC} = 25 kΩ	23	30	37	μs
Reference Input Voltage Range	V _{REF}		0	–	4	V
Reference Input Current	I _{REF}		–3	0	3	μA
Current Trip-Level Error ³	err _i	V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 38.27%	–	–	±15	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 70.71%	–	–	±5	%
		V _{REF} = 2 V, %I _{TRIPMAX} = 100.00%	–	–	±5	%
Crossover Dead Time	t _{DT}		100	475	800	ns
Protection						
Overcurrent Protection Threshold ⁴	I _{OCPST}		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	T _{TSD}		–	165	–	°C
Thermal Shutdown Hysteresis	T _{TSDHYS}		–	15	–	°C
VDD Undervoltage Lockout	V _{DDUVLO}	V _{DD} rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	V _{DDUVLOHYS}		–	90	–	mV

¹For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.²Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.³ $V_{ERR} = [(V_{REF}/8) - V_{SENSE}] / (V_{REF}/8)$.⁴Overcurrent protection (OCP) is tested at $T_A = 25^\circ\text{C}$ in a restricted range and guaranteed by characterization.

ANEXO C – Datasheet Motor de Passo Nema 17



Stepper Motor NEMA 17

This document describes mechanical and electrical specifications for PBC Linear stepper motors; including standard, hollow, and extended shaft variations.

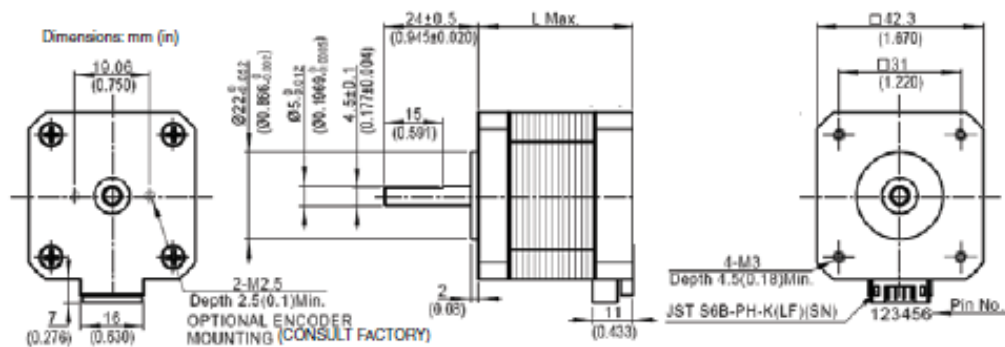


Standard shaft motor shown.

Phases	2
Steps/Revolution	200
Step Accuracy	±5%
Shaft Load	20,000 Hours at 1000 RPM
Axial	25 N (5.6 lbs.) Push 65 N (15 lbs.) Pull 29 N (6.5 lbs.) At Flat Center
Radial	40
IP Rating	RoHS
Approvals	-20° C to +40° C
Operating Temp	B, 130° C
Insulation Class	100 MegOhms
Insulation Resistance	

Description	Length	Mounted Rated Current	Mounted Holding Torque	Winding Ohms	Defect Torque	Rotor Inertia	Motor Weight
(Stack)	"L" Max	Amps	Nm oz-in Typ. Typ.	±10% @ 20°C Typ.	mNm oz-in	g cm ² oz-in ²	kg lbs
Single	39.8 mm (1.57 in)	2	0.48 68	1.04 2.2	15 2.1	57 0.31	0.28 0.62
Double	48.3 mm (1.90 in)	2	0.63 89	1.3 2.9	25 3.5	82 0.45	0.36 0.79
Triple	62.8 mm (2.47 in)	2	0.83 120	1.49 3.8	30 4.2	123 0.67	0.6 1.3

*All standard motors have plug connector. Consult factory for other options.



Dimensions: mm (in)
4 Lead Connector, PBC Part#6200490
(Consult factory for optional motor connectors)





NEMA 17 Stepper Motor

*Performance curves apply to continuous duty cycles.
Consult factory for intermittent cycles or other voltages.

