

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONCEPÇÃO, PROJETO, MONTAGEM E
CONTROLE DE UMA MESA DE SOLDAGEM 3D
PARA PEÇAS COM SIMETRIA CILÍNDRICA**

Por,
**Alex Cortes de Vasconcellos
Gibson Rolemberg Santos Figueiredo**

Brasília, Dezembro de 2016



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONCEPÇÃO, PROJETO, MONTAGEM E CONTROLE DE UMA MESA DE SOLDAGEM 3D PARA PEÇAS COM SIMETRIA CILÍNDRICA

POR,

Alex Cortes de Vasconcellos
Gibson Rolemberg Santos Figueiredo

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Banca Examinadora

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Walter de Britto Vidal Filho, UnB/ ENM
(Co-orientador)

Prof. José Maurício Santos Torres da Motta,
UnB/ENM

Brasília, Dezembro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

ALEX, C. VASCONCELLOS; GIBSON, R. S. FIGUEIREDO

CONCEPÇÃO, PROJETO, MONTAGEM E CONTROLE DE UMA MESA DE SOLDAGEM 3D PARA PEÇAS COM SIMETRIA CILÍNDRICA,

[Distrito Federal] 2016.

xvii, 109p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, Ano). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Soldagem 3D

2. Controle de soldagem

3. Simetria cilíndrica

4. Prototipagem rápida

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VASCONCELLOS, A. C.; FIGUEIREDO, G. R. S., (2016). Concepção, projeto, montagem e controle de uma mesa de soldagem 3D para peças com simetria cilíndrica. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 34/2016, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alex Cortes de Vasconcellos; Gibson Rolemberg Santos Figueiredo.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Concepção, projeto, montagem e controle de uma mesa de soldagem 3D para peças com simetria cilíndrica.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alex Cortes de Vasconcellos
GRACO
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 – Brasília – DF – Brasil

Gibson Rolemberg Santos Figueiredo
GRACO
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília (UnB)
Campus Darcy Ribeiro
CEP 70919-970 – Brasília – DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais e ao meu irmão por todo o suporte que me deram durante minha vida, sem eles não conseguiria nada que conquistei até hoje. Agradeço também a toda minha família que sempre me apoiou e torceu por mim.

Agradeço ao professor Guilherme Caribé pela oportunidade de trabalhar em um projeto como esse, além de toda ajuda e atenção que nos deu durante os dois semestres de trabalho. Agradeço também ao professor Walter de Britto que também nos ajudou bastante durante esse tempo.

Agradeço a todos os técnicos do SG9 e do GRACO, que nos ajudaram sempre que precisamos, agradeço ao Pereira e ao Artur, que nos ajudaram bastante para conseguirmos completar projeto.

Agradeço ao meu amigo e parceiro de trabalho Alex que esteve sempre comigo e me ajudou durante toda a graduação.

Agradeço aos meus amigos e colegas Cássio, Paulo, Alexandre, Mickael, Keyla, Caio, Davi, Luiz, Izabella, Letícia e tantos outros que tive o grande prazer de ter conhecido e estudado junto.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram comigo durante grande parte da minha vida, Luis, Luciano, Lucas, André, Pablo, Victor e tantos outros, que sempre me ajudaram e me apoiaram nos momentos mais difíceis.

Muito obrigado a todos!

Gibson Rolemberg

Agradeço a todas as pessoas que me deram suporte durante a graduação, como familiares, professores, técnicos e amigos.

Dos familiares, em especial a meus pais, avós, meu irmão e meu primo Rafael.

Dos professores, em especial ao professor Guilherme Caribé, que nos orientou durante o trabalho e sempre esteve à disposição para nos ajudar, chegando a passar horas conosco no GRACO nos auxiliando e sempre ensinando coisas novas e ao professor Walter de Britto, que estava sempre em volta perguntando sobre o andamento do trabalho e auxiliando no que fosse necessário.

Dos técnicos, em especial ao Cláudio Pereira e ao Artur, que estavam sempre a disposição para ajudar na fabricação do trabalho. Sem eles o trabalho seria impossível de ser implementado.

Dos amigos, em especial ao parceiro de trabalho Gibson que, além do trabalho, também esteve ao meu lado durante toda a graduação dando suporte quando necessário. Também ao Cássio, Alexandre, Paulo, Keyla, Mickael, Davi, Caio, Izabella, Letícia, Luiz, Raphael, Baiano, Breno, Henrique e Gabriella.

Alex Cortes de Vasconcellos

RESUMO

O presente trabalho de graduação apresenta uma proposta de reprojeto de uma bancada experimental de soldagem de prototipagem rápida por soldagem 3D para uso didático. A concepção do projeto partiu da necessidade de corrigir os problemas existentes no projeto anterior. Nesse, problemas de vazamento pelo rolamento, folga nos mancais e má fixação estrutural da bancada que geravam vibrações indesejadas e falta de precisão do posicionamento. O trabalho também envolve a inclusão de um novo grau de liberdade para o sistema, aumentando as possibilidades de geometria da peça produzida. Com a inserção de um motor, foram necessárias modificações no controle da bancada. Também foram trocados os controladores dos motores já existentes e os sensores de temperatura do sistema de arrefecimento. A aquisição de sinais e o controle do processo são feitos pelo *software* LabView. Os dados são obtidos por uma placa de aquisição da National Instruments e a comunicação com o computador feita por uma interface serial RS232. Com isso, os problemas de vazamento e de vibrações foram solucionados, assim como foi implementado com sucesso o novo grau de liberdade. Porém, ainda resta fazer a conexão do sistema de soldagem ao restante do sistema.

Palavras Chave: soldagem 3D, controle de soldagem, simetria cilíndrica, prototipagem rápida.

ABSTRACT

This undergraduate research project proposes the redesign of an experimental bench for rapid prototyping using 3D welding for didactic use. The project design stemmed from the need to correct the problems in the previous project. These issues were leakage by the bearing, bearings looseness and poor structural fixing of the bench which generated unwanted vibrations and lack of positioning accuracy. This research also involves the inclusion of a new degree of freedom for the system, increasing the possibilities of geometry of the part produced. With the insertion of an engine, modifications were necessary to control the system. In addition, the existing motors controllers were changed as well as the cooling system temperature sensors. The signal acquisition and the control of the process are made through the LabView software. The data is obtained by an acquisition board from National Instruments and the communication with the computer is made by a serial interface RS232. As a result, the leakage and vibration issues were solved, also, the new degree of freedom was successfully implemented. However, the welding system still needs to be connected to the rest of the system.

Keywords: 3D welding; welding control; cylindrical symmetry; rapid prototyping;

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.4 CONCEPÇÃO ANTERIOR	2
1.5 CONCEPÇÃO ATUAL	6
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO	9
2.2 SOLDAGEM MIG/MAG	10
2.3 PROJETO DE EIXOS E VIGAS	11
2.4 ELEMENTOS DE MÁQUINA	12
2.4.1 Rolamentos	12
2.4.2 Mancais	13
2.4.3 Engrenagens	14
2.4.4 Elementos de vedação	15
2.5 SELEÇÃO DE MOTORES	16
2.6 TROCADOR DE CALOR	19
2.7 LABVIEW	21
2.8 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS HOMOGÊNEAS	25
2.8.1 Coordenadas Homogêneas	25
2.8.2 Translação	25
2.8.3 Rotação	25
3. PROJETO MECÂNICO	26
3.1 PROJETO DOS EIXOS	26
3.2 PROJETO DAS VIGAS	27
3.3 FABRICAÇÃO	28
3.4 MONTAGEM	29
4. SISTEMA DE ARREFECIMENTO	33
4.1 DESCRIÇÃO	33
4.2 PERDAS DO SISTEMA HIDRÁULICO	34
4.3 LM35	37

5. SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	40
5.1 DESCRIÇÃO	40
5.2 CINEMÁTICA	41
5.3 ESPECIFICAÇÃO DA PEÇA	46
5.4 SELEÇÃO DOS MOTORES	48
5.4.1 Motor do Fuso Y	48
5.4.2 Motor do Fuso Z	50
5.4.3 Motor do Ângulo θ	51
5.4.4 Motor do Ângulo Φ	52
5.6 SELEÇÃO DOS DRIVERS	53
5.7 DRIVER TB6560	54
5.8 DRIVER VDB3722MA	56
6. SISTEMA DE SOLDAGEM	59
6.1 DESCRIÇÃO	59
6.2 ROBOT INTERFACE	60
7. INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS	63
7.1 DESCRIÇÃO	63
7.2 PLACA DE AQUISIÇÃO NI PCI-6229	64
7.3 PROGRAMA ARDUINO	67
7.4 PROGRAMA LABVIEW	69
8. TESTES E DISCUSSÃO	79
9. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXO A – TABELAS E CURVAS DE FLUIDOS	86
APÊNDICE A – CÓDIGO DO ARDUINO	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema de arrefecimento do projeto	3
Figura 1.2 Parte superior da concepção anterior da bancada.....	3
Figura 1.3 Mancal com detalhe para folga no rolamento e vazamento no retentor.	4
Figura 1.4 Escovas de carvão para dreno da corrente de solda.	4
Figura 1.5 Trocador de calor do fluido de arrefecimento com a peça.	5
Figura 1.6 Reservatório intermediário de fluido de arrefecimento.	5
Figura 1.7 Sistema de posicionamento para a coordenada Φ	6
Figura 1.8 Sistema de posicionamento da tocha para as coordenadas Y e Z.....	6
Figura 1.9 Mesa com novo grau de liberdade.....	7
Figura 1.10 Exemplo de peça com curvatura no eixo Z.....	7
Figura 1.11 Reservatório intermediário com tampa e retentor.	7
Figura 1.12 Fixação do sistema na bancada.	8
Figura 2.1 Processo de usinagem MIG/MAG	10
Figura 2.2 Fração da tocha MIG.....	11
Figura 2.3 Exemplos de configuração de fixação de vigas	12
Figura 2.4 Rolamento fixo de uma carreira de esferas.	13
Figura 2.5 Rolamento de rolos cônicos.	13
Figura 2.6 Mancal axial.	13
Figura 2.7 Mancal radial.	14
Figura 2.8 Mancal misto.	14
Figura 2.9 Esquemático de engrenagem.....	14
Figura 2.10 Engrenagem cilíndrica de dentes retos.....	15
Figura 2.11 O-ring sendo utilizado em um pistão.....	15
Figura 2.12 Seção transversal de um retentor	16
Figura 2.13 Sistema de controle de Motor DC.....	17
Figura 2.14 Diagrama de blocos de controle de motor de passo	18
Figura 2.15 Torre de resfriamento, um exemplo de trocador de contato direto.....	19
Figura 2.16 Trocador de armazenamento, um trocador de contato indireto.....	20
Figura 2.17 Trocador de tubo duplo, um exemplo de trocador tubular.....	20
Figura 2.18 Trocador de calor tipo placa.	21
Figura 2.19 Painel frontal do LabVIEW com a interface de usuário.	22
Figura 2.20 Janela de diagrama de blocos do LabVIEW.	22
Figura 2.21 Controles e indicadores numérico, booleano e cadeia de caracteres.	23
Figura 2.22 Programa para cálculo de área de triângulo em LabView.....	23

Figura 2.23 Exemplo de laço while com detalhe para o terminal condicional.....	24
Figura 2.24 Exemplo de laço for com detalhe para o terminal de contagem.....	24
Figura 2.25 Exemplo de estrutura de caso para conversão de unidade.	24
Figura 3.1 Forças aplicadas aos eixos da mesa e suas dimensões.....	26
Figura 3.2 Corte do eixo para cálculo do momento fletor.....	26
Figura 3.3 Força aplicada sobre uma das vigas e suas dimensões.	27
Figura 3.4 Desenho técnico do eixo da mesa.....	28
Figura 3.5 Perfil de alumínio cortado.....	28
Figura 3.6 Tampa do reservatório inferior.....	29
Figura 3.7 Montagem da estrutura de alumínio da mesa.....	29
Figura 3.8 Montagem dos eixos na mesa.....	30
Figura 3.9 Montagem da mesa na bancada pelos mancais.....	30
Figura 3.10 Montagem das escovas e das barras roscadas na mesa.	30
Figura 3.11 Montagem da panela na mesa.	31
Figura 3.12 Montagem da tampa do reservatório e da engrenagem helicoidal.....	31
Figura 3.13 Montagem do reservatório e do chuveiro.....	32
Figura 3.14 Sistema de movimentação da mesa e resfriamento da peça montado.	32
Figura 4.1 Parte superior da bancada	34
Figura 4.2 Fluxo em seção anelar.	35
Figura 4.3 Circuito condicionador para acionamento do trocador de calor	39
Figura 4.4 LM35 instalado na posição com uma cobertura de epóxi.	39
Figura 5.1 Sistema de movimentação da tocha.....	40
Figura 5.2 Sistema de movimentação da mesa.....	41
Figura 5.3 Sistemas de coordenadas da bancada.....	42
Figura 5.4 Distâncias d_i do sistema de movimentação.	45
Figura 5.5 Volume que contém a peça para h_{max} , r_{max} e θ_{max}	47
Figura 5.6 Área de trabalho da tocha para h_{max} , r_{max} e θ_{max}	48
Figura 5.7 Curva de torque para motores Minibea 23LM-C004.	49
Figura 5.8 Curva de torque para motores Minibea 23KM-C740V (23LM-C006).....	51
Figura 5.9 Curva de torque para motores Minibea 23LM-C004 (repetida).	52
Figura 5.10 Curva de torque para motores Berger Lahr VDRM 3910.	53
Figura 5.11 Driver TB6560.	54
Figura 5.12 Detalhes dos pinos e seletores do driver TB6560.....	55
Figura 5.13 Driver VDB3722MA.	56
Figura 5.14 Detalhe dos pinos e seletores do Driver VDB3722MA.....	57

Figura 6.1 Máquina de solda BDH 320.....	59
Figura 6.2 Painel de Controle BDH 320.....	59
Figura 6.3 ROBOT INTERFACE.	60
Figura 6.4 Cabos necessários para o ROBOT INTERFACE	61
Figura 7.1 Topologia da integração dos sistemas.....	63
Figura 7.2 Placa de aquisição NI PCI-6229.....	64
Figura 7.3 Bloco conector CB-68LP.	64
Figura 7.4 Cabo SH68-C68-S.....	65
Figura 7.5 Descrição dos pinos da placa NI PCI-6229.....	65
Figura 7.6 Microcontrolador Arduino UNO.....	67
Figura 7.7 Fluxograma do código do Arduino.	68
Figura 7.8 Painel frontal da VI principal do programa “Main.vi”	69
Figura 7.9 Diagrama de blocos da VI principal do programa “Main.vi”	70
Figura 7.10 Fluxograma do código do LabVIEW – Parte 1.	70
Figura 7.11 Fluxograma do código do LabVIEW – Parte 2.	71
Figura 7.12 Diagrama de blocos da VI “Fim de Curso.vi”.	72
Figura 7.13 Diagrama de blocos da VI “Parada de Emergencia.vi”	72
Figura 7.14 Diagrama de blocos da VI “Inicializacao.vi”.	72
Figura 7.15 Diagrama de blocos da VI “Leitura do Codigo.vi”	73
Figura 7.16 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 1.	73
Figura 7.17 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 2.	74
Figura 7.18 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 3.	74
Figura 7.19 Diagrama de blocos da VI “Controle de Temperatura.vi”.	75
Figura 7.20 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 1.	76
Figura 7.21 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 2.	77
Figura 7.22 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 3.	77
Figura 7.23 Diagrama de blocos da VI “Posicao Segura.vi”	78
Figura 8.1 Nova bomba instalada no sistema de arrefecimento	79
Figura 8.2 Ajuste do zeramento da tocha	80
Figura 8.3 Sistema de travamento da folga do redutor.	81
Figura 8.4 Painel do LABVIEW com perfil da peça.....	82
Figura 8.5 Hidrômetro digital.	82
Figura A.1 Tabela de rugosidade absoluta por material.....	86
Figura A.2 Tabela de Moody.	86

Figura A.3 Coeficientes de atrito para anéis concêntricos.	87
Figura A.4 Coeficientes de resistência para válvulas, joelhos e têis.	87
Figura A.5 Coeficientes de resistência de entrada e saída.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Deslocamentos em Y e Z para tamanhos máximos da peça e angulação.....	47
Tabela 5.2 Drivers disponíveis no mercado com suas características e preços.....	54
Tabela 5.3 Seleção da corrente pelos seletores do driver TB6560.....	55
Tabela 5.4 Seleção da corrente pelo seletor Run Im do driver VDB3722MA.....	57
Tabela 5.5 Seleção do número de pulsos por volta pelo seletor SK do driver VDB3722MA.	57
Tabela 7.1 Conexões dos sinais do sistema no conector 0 da placa de aquisição.....	66
Tabela 7.2 Conexões dos sinais da Robot Interface no conector 1 da placa de aquisição...	66
Tabela 7.3 Conexões do Arduino com os drivers.....	67

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

τ	Tensão de Cisalhamento	[Pa]
σ	Tração	[Pa]
M	Momento Fletor	[Nm]
T	Momento Torsor	[Nm]
I	Momento de Inércia	[Kgm ²]
P	Potência	[W]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
h_x	Perda de carga	[m]
μ	Viscosidade	[Pa*s]
d	Diâmetro	[m]
T_x	Temperatura	[°C]
Q	Vazão	[m ³]
c	Raio mínimo do eixo	[mm]
ζ	Fator de correção	
K	Coeficiente de resistência	
f	Coeficiente de atrito	

Siglas

GRACO	Grupo de Automação e Controle
CAD	Desenho Assistido por Computador
RP	Prototipagem Rápida
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
FDM	Deposição de Material Fundido
BMP	Manufatura com Partícula Balística (BPM)
LOM	Manufatura por Objetos Laminados
SGC	Cura Sólida na Base
MIG	Metal Inert Gas
STL	Standard Tessellation Language
AC	Alternate Current
PWM	Pulse Width Modulation
DC	Direct Current
PID	Proporcional Integral Derivativo
VI	Instrumentos Virtuais

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é um conjunto de processos de fabricação para a criação de um objeto físico tridimensional a partir de um modelo digital, geralmente por sua representação CAD. O objeto geralmente é construído por sucessivas adições de camadas de material controladas por um computador. Esse método de fabricação é diferenciado dos outros métodos tradicionais de manufatura por ser baseado em uma tecnologia avançada que constrói as partes em camadas a nível milimétrico, possibilitando praticamente qualquer geometria desejada. Outro grande benefício deste método de fabricação é o fato dele utilizar o conceito de adição de material, ao contrário dos métodos tradicionais que se baseiam na subtração de material, ou seja, há grande redução no desperdício de material [2].

As primeiras tecnologias de impressão 3D tiveram seu início na década de 80. Nessa época, essa tecnologia era chamada de tecnologia de prototipagem rápida (RP), devido à sua rapidez e custo-benefício em relação aos demais métodos de prototipagem. O primeiro sistema de prototipagem rápida a ser comercializado, SLA-1, foi introduzido em 1987 pela 3D Systems e teve sua primeira venda em 1988. Esse sistema utilizava a estereolitografia, que é uma técnica de manufatura aditiva cujo princípio se baseia na polimerização, ou seja, utiliza a luz para a junção de uma cadeia de moléculas, formando polímeros. Ainda em 1987, Carl Deckard criou a patente para a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), permitindo a impressão de peças metálicas por meio da sinterização de pós, geralmente metálicos, utilizando como fonte de energia laser. Em 1989, Scott Crump criou a patente para a Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM), que produz a peça pela extrusão de material fundido que é depositado em camadas sucessivas. Outras tecnologias de impressão 3D surgiram durante esses anos, tais como Manufatura com Partícula Balística (BPM), Manufatura por Objetos Laminados (LOM) e Cura Sólida na Base (SGC) [2].

A soldagem 3D é um caso específico do FDM, onde o material adicionado é o cordão de solda e a peça é construída pela deposição sucessiva de solda em uma base metálica. Esse método, ao contrário do FDM tradicional com materiais plásticos, apresenta complicações por trabalhar com materiais de alta temperatura de fusão, o que transfere bastante calor para a peça em fabricação. Por esse motivo, dependendo das dimensões da peça, pode ser necessário um sistema de arrefecimento para manter a peça em uma temperatura admissível, amenizando deformações mecânicas e imprecisões durante o processo de fabricação.

1.2 MOTIVAÇÃO

Frequentemente, em ambientes acadêmicos, tem-se dificuldade em compreender melhor as aplicações práticas dos conceitos aprendidos durante o estudo. Desta forma, há a necessidade da utilização de equipamentos didáticos para auxiliar o aprendizado. A bancada de experimentos projetada neste trabalho auxilia no entendimento dos conceitos de disciplinas relacionadas a soldagem, manufatura, sistemas de medição, controle, transferência de calor e manipulação robótica.

A utilização da solda MIG para a deposição do material pode ser analisada nas disciplinas de soldagem. A fabricação por FDM serve como exemplo de método de manufatura para disciplinas relacionadas a manufatura. Os sensores utilizados na bancada servem como exemplo da utilização de sistemas de medição. O controle realizado no sistema de arrefecimento para controlar a temperatura do sistema pelo acionamento da ventoinha e o controle dos motores para posicionamento servem como exemplos de sistemas de controle. O sistema de arrefecimento utilizando o trocador de calor é um exemplo de sistema de transferência de calor. O posicionamento da tocha de solda utiliza os conhecimentos de manipulação robótica.

1.3 OBJETIVOS

Tornar uma bancada experimental de soldagem apta à realização de testes controlados de prototipagem rápida por soldagem 3D pelo reprojeto da mesa posicionadora, adicionando um grau de liberdade θ para manter a deposição de material paralela à ação da força gravitacional, assim como pelo reprojeto do sistema de refrigeração e do sistema de movimentação.

1.4 CONCEPÇÃO ANTERIOR

Diversos trabalhos, como os trabalhos [12] e [14], foram feitos nesta bancada para se chegar na concepção anterior a este projeto. De início, a bancada não possuía o sistema de arrefecimento, realizando apenas o controle do posicionamento da tocha nas coordenadas cilíndricas p e z em conjunto com a rotação da mesa responsável pela coordenada Φ . Devido à necessidade de se analisar e controlar a temperatura da peça durante o processo, o sistema de arrefecimento (Fig. 1.1) foi projetado em um dos trabalhos. Porém, faltava a integração dos sistemas de arrefecimento e controle de posição, que foi realizado no trabalho [14].

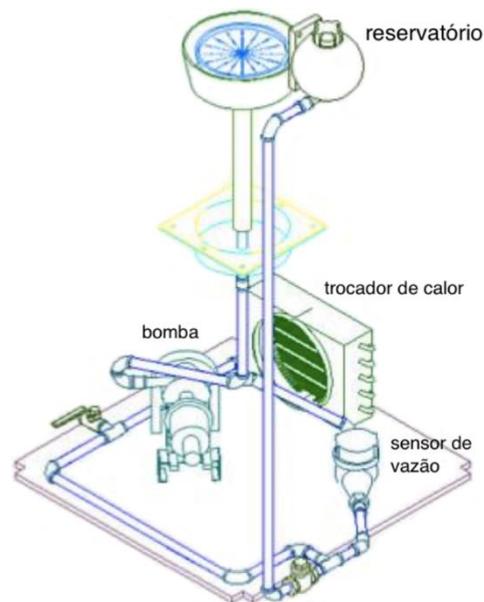


Figura 1.1 Sistema de arrefecimento do projeto [14].

Ao final do último trabalho [14], o sistema de arrefecimento estava funcionando, apenas com problemas no sensoriamento da temperatura, necessitando a substituição desses sensores. Já na parte superior da bancada (Fig. 1.2), havia folga considerável entre o mancal e o rolamento inferior que gerava vibrações durante a atuação do motor de rotação da mesa e vazamento de fluido do sistema de arrefecimento por esse mancal (Fig. 1.3). Desta forma, a bancada não estava em condições de operação, necessitando reprojeto desse mancal.



Figura 1.2 Parte superior da concepção anterior da bancada.

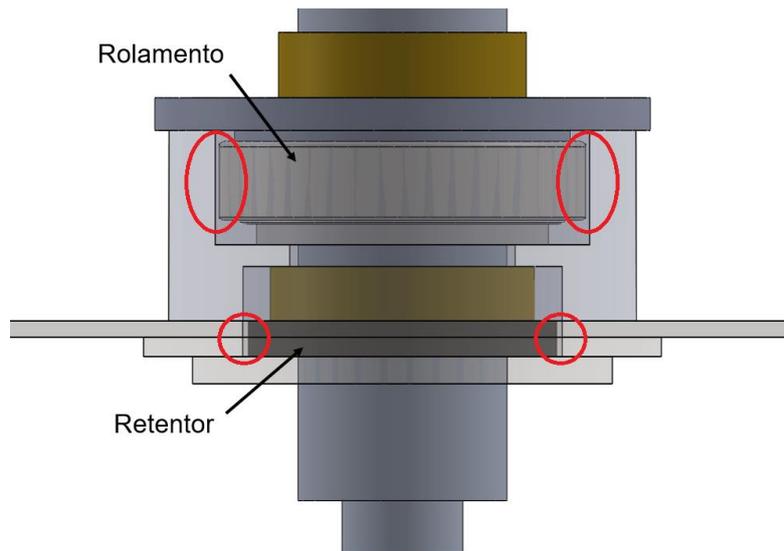


Figura 1.3 Mancal com detalhe para folga no rolamento e vazamento no retentor.

O princípio de funcionamento do sistema da Fig. 1.4 é fazer a corrente de solda fluir pela peça, passando pela estrutura metálica do sistema até chegar nas escovas de carvão em destaque na figura, onde é ligado o terra do sistema de solda. As escovas têm seu contato forçado com o anel coletor de corrente pela ação de uma mola contra seu suporte e são isoladas do resto do sistema, garantindo que não haja fuga de corrente para o resto da estrutura metálica do sistema.

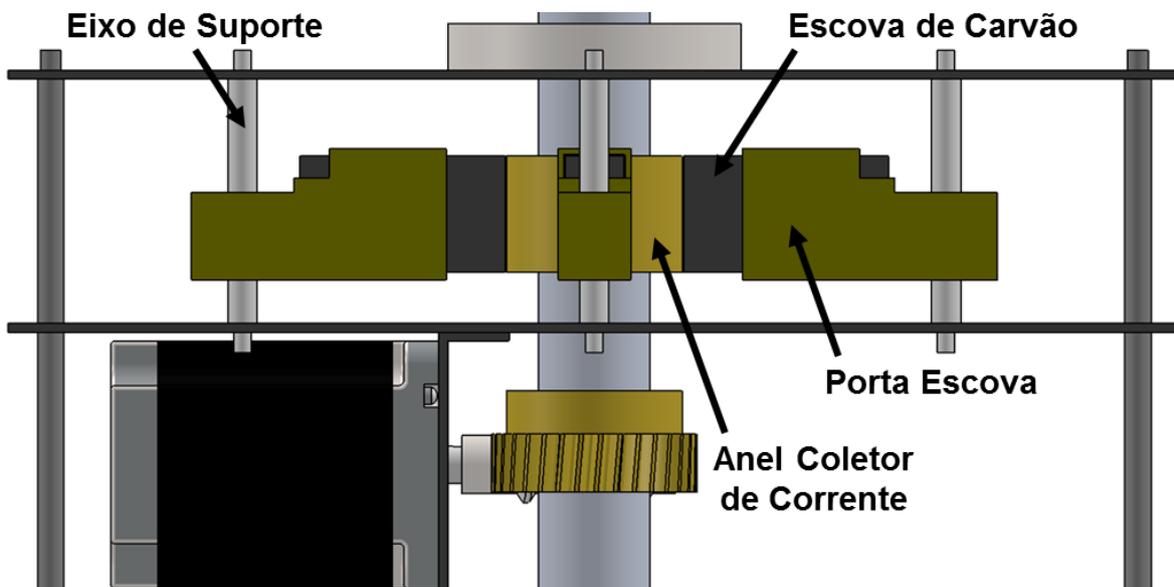


Figura 1.4 Escovas de carvão para dreno da corrente de solda.

O fluido do sistema de arrefecimento é bombeado pelo tubo do chuveiro por baixo do reservatório intermediário até o bico do chuveiro (Fig. 1.5), onde troca calor com a base de deposição e retorna pelo eixo principal do sistema, com diâmetro interno maior que o diâmetro externo do chuveiro, de forma a possibilitar o escoamento do fluido entre os dois. O fluido aquecido então é despejado no reservatório intermediário (Fig. 1.6) e enviado para o sistema de arrefecimento pelo dreno para trocar calor com o ar, fechando o ciclo. O sistema de arrefecimento é totalmente inundado, sendo crítica a vedação em todas as partes por onde o fluido passa.

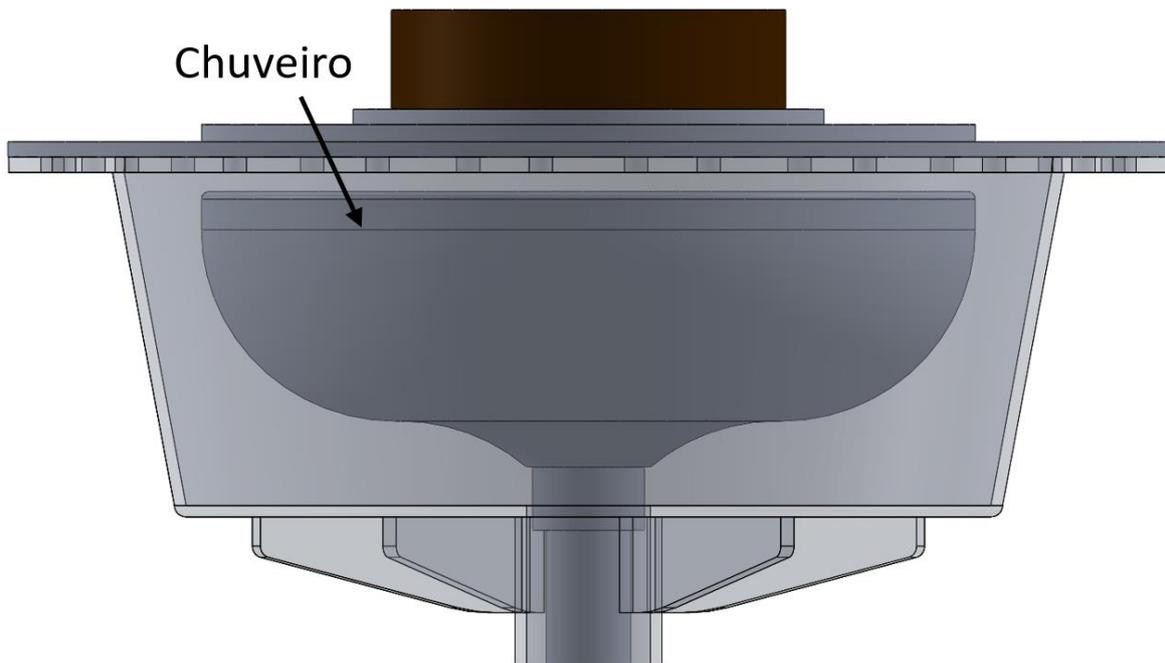


Figura 1.5 Trocador de calor do fluido de arrefecimento com a peça.

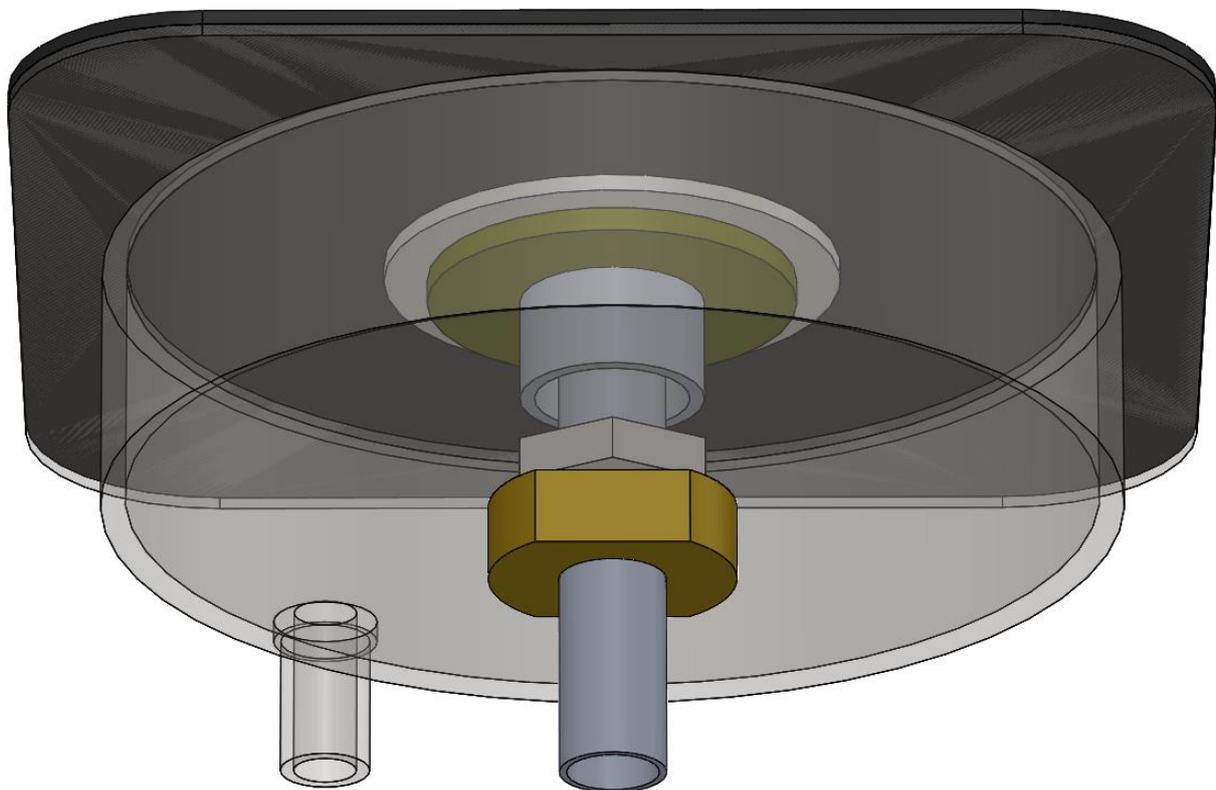


Figura 1.6 Reservatório intermediário de fluido de arrefecimento.

O sistema de posicionamento utilizado no sistema é de coordenadas cilíndricas. Um motor localizado abaixo das escovas gira a engrenagem helicoidal que é fixada no eixo central (Fig. 1.7) para controlar a coordenada Φ . As coordenadas ρ e z são controladas por dois motores fixados na estrutura da bancada (Fig. 1.8).

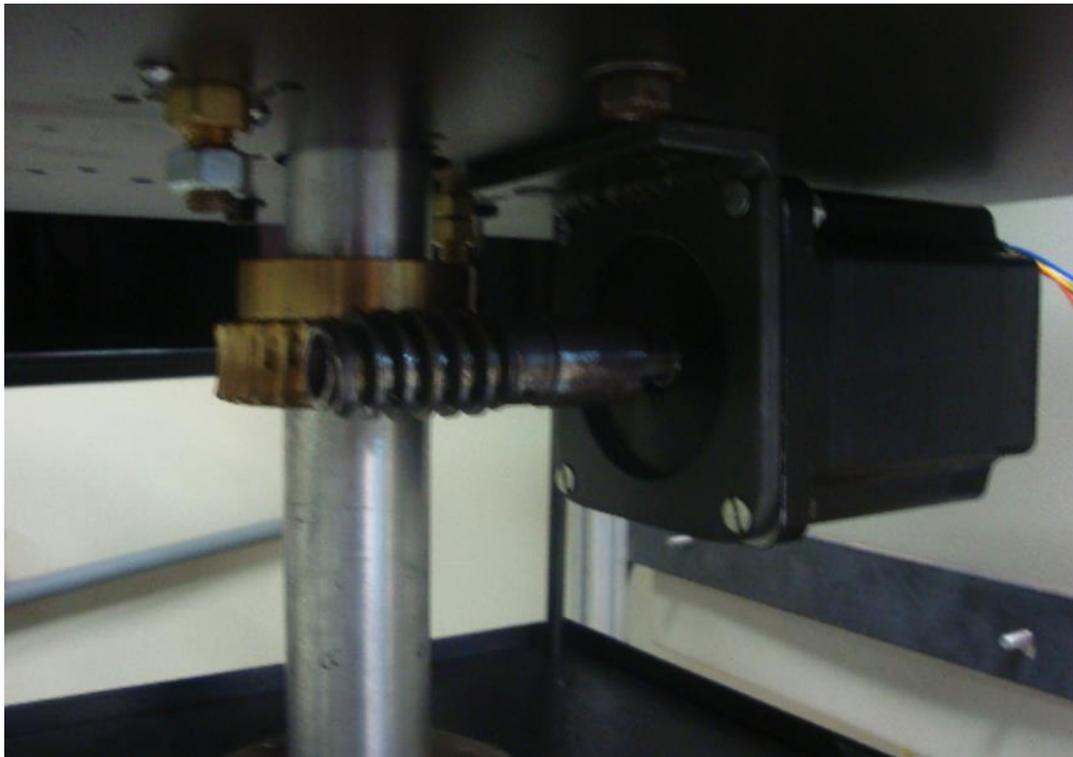


Figura 1.7 Sistema de posicionamento para a coordenada Φ [14].

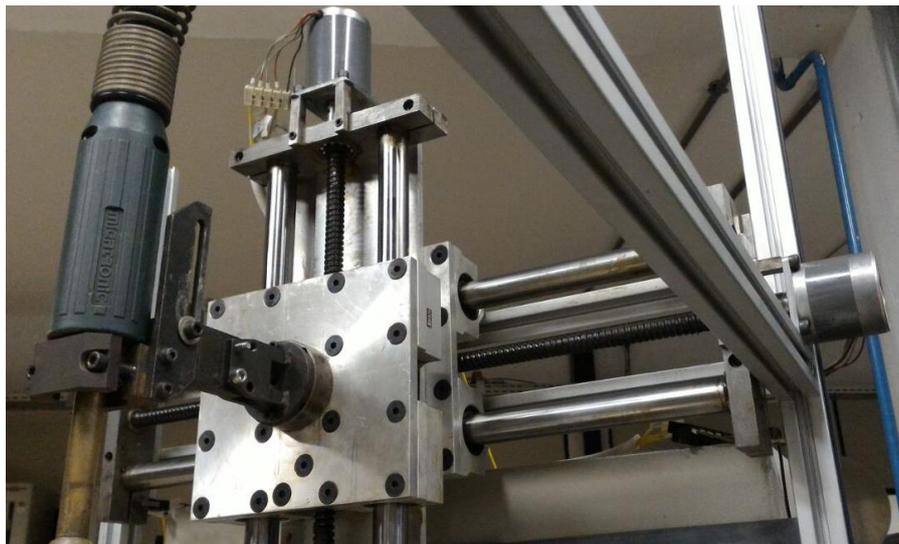


Figura 1.8 Sistema de posicionamento da tocha para as coordenadas Y e Z.

1.5 CONCEPÇÃO ATUAL

As alterações propostas foram em sua maioria estruturais para resolver os problemas encontrados na concepção anterior e levar o sistema a operar normalmente, visto que nos trabalhos anteriores não houve o total funcionamento do sistema, funcionando apenas os sistemas isolados. Também se adicionou um grau de liberdade ao sistema para rotação da mesa no eixo perpendicular ao eixo central (Fig. 1.9) de forma a possibilitar a manufatura de peças com curvatura no eixo Z (Fig. 1.10). Foram mantidos os outros motores para controle de posicionamento, o sistema de arrefecimento e sistema de dreno da corrente de solda.



Figura 1.9 Mesa com novo grau de liberdade.

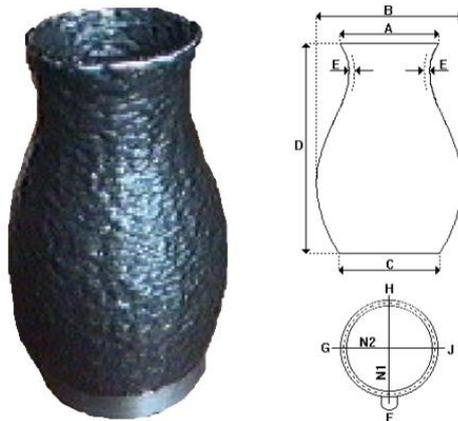


Figura 1.10 Exemplo de peça com curvatura no eixo Z [18].

O problema de vazamento no mancal inferior devido à folga existente entre o mancal e o retentor foi resolvido com a fabricação de uma tampa de aço para o reservatório intermediário com uma flange para a inserção do retentor com interferência de 0,05 mm (Fig. 1.11). Dessa forma, o reservatório intermediário fica vedado sem a necessidade do mancal inferior, permitindo diversas configurações de posição.

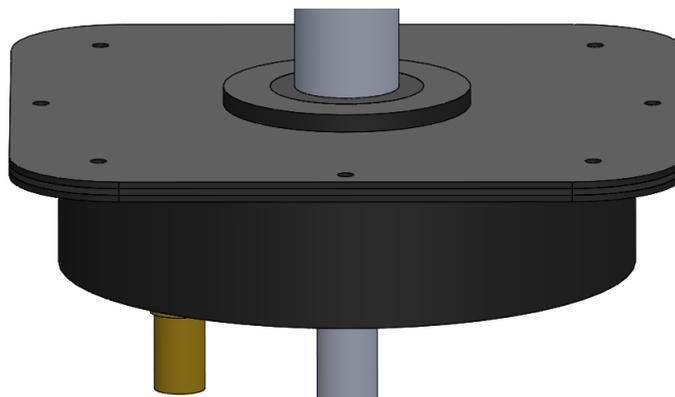


Figura 1.11 Reservatório intermediário com tampa e retentor.

Como o sistema não está mais apoiado na bancada pela estrutura metálica de quatro pernas com pouca rigidez, as vibrações foram atenuadas a níveis imperceptíveis. A nova fixação na bancada (Fig. 1.12) utiliza dois eixos presos por mancais com rolamentos para permitir rotação da mesa. Os eixos foram projetados para suportar o peso do sistema, além de ter rigidez suficiente para atenuar as vibrações.

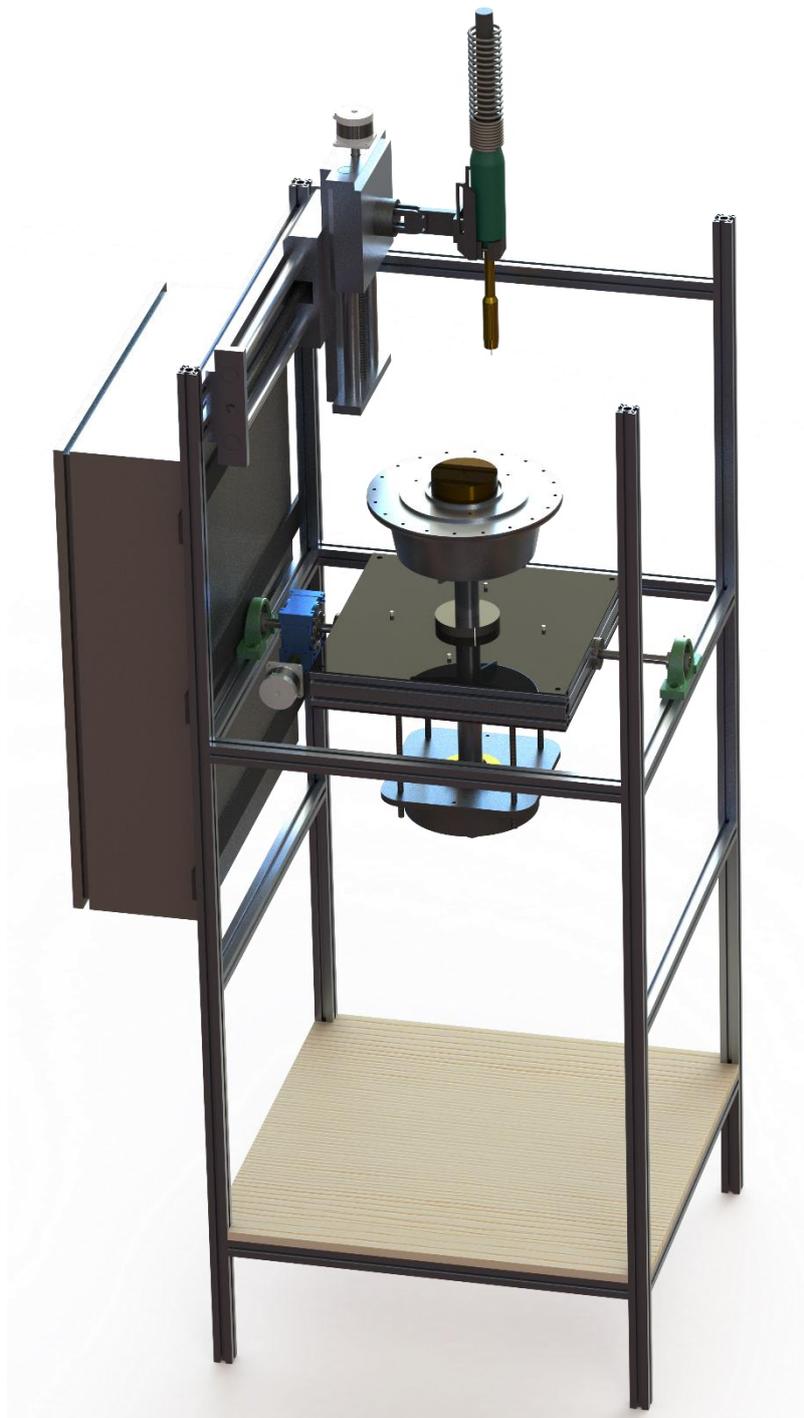


Figura 1.12 Fixação do sistema na bancada.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho possui três segmentos principais. O primeiro, constituído do capítulo 2, trata da fundamentação teórica, que contém todo o conhecimento utilizado para desenvolver o trabalho. O segundo segmento engloba o desenvolvimento do trabalho em si, e é constituído do capítulo 3, que envolve o projeto dos sistemas mecânicos, do capítulo 4, que envolve o projeto do sistema de arrefecimento, do capítulo 5, que envolve o projeto do sistema de movimentação, do capítulo 6, que envolve o sistema de soldagem e do capítulo 7, que trata sobre a integração de todos os sistemas mencionados anteriormente. Por fim, o terceiro segmento, constituído do capítulo 8, traz a realização dos testes e discussão dos resultados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO

Modelagem por deposição de material fundido (FMD) é uma técnica de manufatura aditiva bastante utilizada para fins de modelagem e prototipagem. O seu princípio, assim como o de outras técnicas de manufatura aditiva, se baseia na formação da peça por meio da deposição de camadas sucessivas de material. Essa deposição de material é feita pelo aquecimento e extrusão de um filamento de plástico ou de um cordão metálico [2].

O processo para a realização da FMD envolve algumas etapas. Primeiramente, é feito a construção do modelo 3D do objeto desejado via algum software CAD. Em sequência, esse arquivo CAD é convertido para o formato STL, o qual será processado pelo software que realizará a fabricação da peça. As vantagens desse formato são a sua ampla compatibilidade com a maioria dos sistemas CAD e a simplificação do desenho pela redução de seus componentes em geometrias mais básicas, porém, devido a essa simplificação, ocorre uma perda de resolução do desenho da peça. Essa diminuição da resolução, entretanto, é geralmente aceitável para o processo de fabricação [1].

O software Quickslice da FMD carrega, então, o arquivo STL e particiona o seu conteúdo em diversas seções. Essas seções contêm os caminhos bidimensionais que a ferramenta de extrusão deverá percorrer para a construção da peça, assim, quanto maior for a partição feita, maior será a precisão da peça final [1]. Com isso, o software utiliza as informações produzidas para gerar o plano de processos, que irá indicar as ações que devem ser tomadas na máquina para a fabricação da peça.

A fabricação em si é feita, como dito anteriormente, pelo aquecimento e extrusão de material por um bico, esse material sai pelo bico e se funde ao entrar em contato com o material já disposto. A movimentação do bico se dá pelo eixo Y, conforme o caminho traçado pelo programa, e ao terminar o trecho determinado pela seção, o bico se movimenta no eixo Z para a construção de uma nova camada. Assim, a construção da peça é feita no sentido de baixo para cima [1].

É importante notar que é necessária uma base de suporte para a construção da peça, pois se não houver uma base para a deposição, o material iria simplesmente cair de maneira indesejada. Por esse motivo, existe um bico auxiliar que tem como função depositar material suporte para a deposição do material principal. Esse material suporte é similar ao material principal, porém esse é facilmente removível após a construção da peça [1].

A peça produzida pela técnica FMD é bastante robusta em relação às outras técnicas de manufatura aditiva devido ao modo ao qual essa é produzida. Assim, as peças produzidas são inigualáveis em termos de resistência mecânica, térmica e química [2].

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem por arco elétrico com gás de proteção, conhecida como soldagem MIG/MAG, é um processo onde um arco elétrico é estabelecido entre a peça e o material consumido em forma de arame. O arco elétrico funde continuamente o arame enquanto esse é fornecido à poça de fusão, realizando assim a junção dos materiais desejados. Nesse processo, um gás de proteção é transmitido pela tocha de soldagem de maneira a proteger a poça de fusão de contaminações. O arco elétrico é gerado por uma fonte de corrente contínua, e o arame é geralmente utilizado no pólo positivo. Essa configuração é denominada de polaridade reversa e permite a formação de um arco com maior estabilidade, embora forneça uma menor taxa de fusão do eletrodo. Assim, utilizando uma alimentação por corrente contínua e tendo o alimentador de arame com velocidade constante, temos um arco elétrico estável e autocorrigido [7].

A soldagem MIG/MAG possui diversas vantagens sobre os outros métodos de soldagem, como por exemplo, uma maior flexibilidade em relação a quantidade de materiais que esse é capaz de soldar. Outras vantagens são a facilidade de operação, alta produtividade, a ausência de necessidade de remoção de escória, além da possibilidade de automatização do processo. Porém, é um processo cujo ajuste é bastante complexo, além de não ser aconselhado sua operação em locais com correntes de ar [3].

O conceito inicial de soldagem por arco elétrico com gás de proteção foi introduzido na década de 20, porém seu desenvolvimento final e introdução no mercado ocorreu somente na década de 40, com o objetivo inicial de ser utilizada para soldagem de alumínio e outros materiais não ferrosos [4]. Entretanto, em pouco tempo essa técnica também começou a ser utilizada para soldagem de aços, devido a sua velocidade. Com o decorrer dos anos, essa técnica sofreu melhorias e com isso passou a ser uma das mais utilizadas no ambiente industrial, devido a sua velocidade, a qual sempre foi observada, baixo custo e adaptação relativamente fácil a automação, proveniente da sua evolução com o tempo.

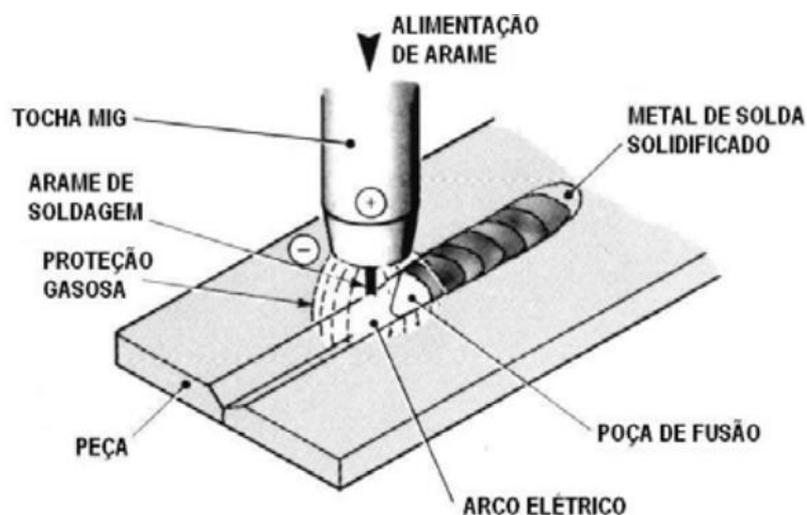


Figura 2.1 Processo de soldagem MIG/MAG [7].

A Figura 2.1 representa um esquemático do processo de soldagem MIG/MAG. Pode-se observar que a soldagem é feita pelo arco elétrico produzido na tocha de solda, assim como o gás inerte que protege a poça de fusão de contaminantes presentes na atmosfera.

A tocha de usinagem MIG contém diversos componentes fundamentais para a sua utilização, como por exemplo, a chave de controle, a ponta de contato, o cabo de energia, o bico pelo qual o gás inerte fluirá, o condutor e alinhador do eletrodo e a mangueira pelo qual o gás irá passar [4]. Uma fração da tocha de usinagem utilizada na soldagem MIG pode ser vista na Fig. 2.2.

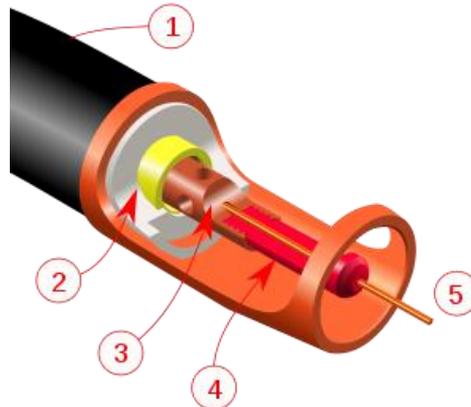


Figura 2.2 Fração da tocha MIG [4].

2.3 PROJETO DE EIXOS E VIGAS

Eixos com seções transversais circulares geralmente são utilizados para transmitir potência, sendo submetidos a cargas combinadas de flexão e torção aplicadas a polias e engrenagens acopladas no eixo. O projeto de eixo consiste em determinar os momentos fletor M e torsor T resultantes e calcular as tensões correspondentes. Conhecidas as máximas tensões normal σ e de cisalhamento τ , as dimensões do eixo são selecionadas com base em uma teoria de falha. Para materiais dúteis, utiliza-se a teoria de falha da tensão de cisalhamento admissível [9]. A equação de transformação de tensão é utilizada para obter a tensão de cisalhamento admissível

$$\tau_{adm} = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

Para seções transversais circulares, a equação torna-se

$$\tau_{adm} = \frac{2}{\pi c^3} \sqrt{M^2 + T^2} \quad (2)$$

Resolvendo para o raio c , temos

$$c = \left(\frac{2}{\pi \tau_{adm}} \sqrt{M^2 + T^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Vigas são elementos estruturais projetados para suportar cargas aplicadas perpendicularmente a seus eixos longitudinais, sendo submetidas as cargas combinadas de

flexão e cisalhamento. Uma viga pode ser projetada para resistir a ambas tensões de cisalhamento e flexão, neste caso diz-se que o projeto é com base na resistência. Muitas vezes é preciso limitar o grau de deflexão que uma viga pode sofrer quando submetida a uma carga. Quando a viga é projetada para admitir uma máxima deflexão, diz-se que o projeto é com base na deflexão. A deflexão depende de como o esforço é aplicado e de como a viga é fixada. A Figura 2.3 apresenta algumas configurações de fixação de vigas [9].

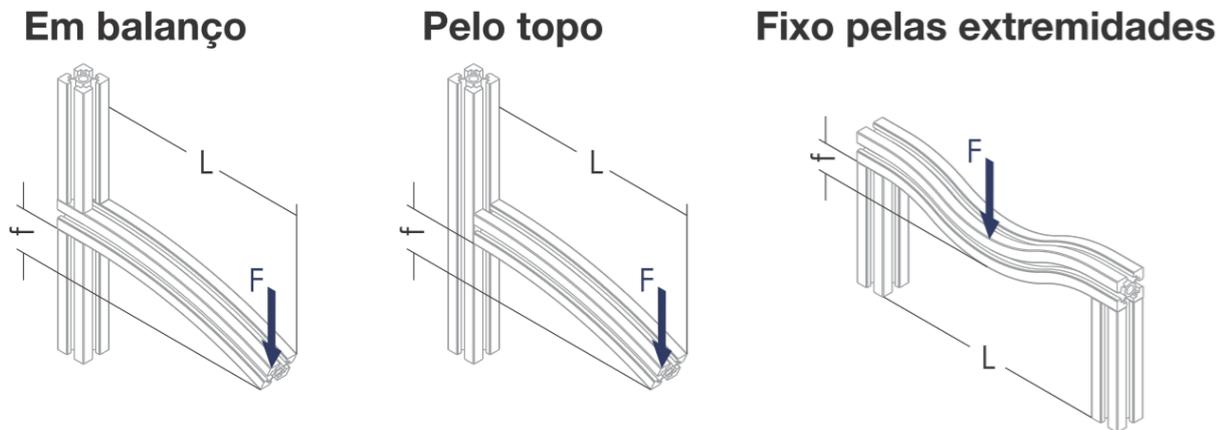


Figura 2.3 Exemplos de configuração de fixação de vigas [15].

As máximas deflexões f para essas configurações são função do comprimento livre L da viga, do momento de inércia I e da força aplicada F . Para a configuração em balanço temos [15]

$$f = \frac{F \cdot L^3}{2,07 \cdot I \cdot 10^9} \quad (4)$$

Para a configuração pelo topo temos

$$f = \frac{F \cdot L^3}{1,24 \cdot I \cdot 10^9} \quad (5)$$

Para a configuração fixo pelas extremidades temos

$$f = \frac{F \cdot L^3}{1,32 \cdot I \cdot 10^{11}} \quad (6)$$

2.4 ELEMENTOS DE MÁQUINA

2.4.1 Rolamentos

Rolamentos são elementos constituídos por 2 anéis de aço separados por uma ou mais fileiras de esferas ou rolos. O propósito dos rolamentos é permitir o movimento relativo, diminuindo o atrito rotacional e suportar cargas tanto radiais quanto axiais. O anel exterior é fixado em um mancal ou na peça e o anel interior é fixado diretamente no eixo, permitindo o seu movimento rotacional.

Existem diversos tipos de rolamentos, que podem ser classificados pelos tipos de carga que esses suportam e pelas suas características mecânicas. Um tipo de rolamento bastante utilizado é o rolamento fixo de uma carreira de esferas. Esse rolamento, que pode ser

observado na Fig. 2.4, suporta cargas radiais e pequenas cargas axiais e é apropriado para elevadas rotações. Esse rolamento possui uma limitação em relação à sua ajustagem angular, é exigido um alinhamento perfeito entre o eixo e o rolamento [6].

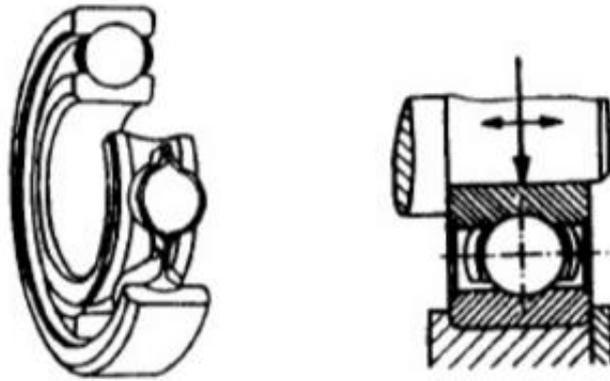


Figura 2.4 Rolamento fixo de uma carreira de esferas [6].

Outro tipo de rolamento comumente utilizado é o rolamento de rolos cônicos, que pode ser observado na Fig. 2.5. Esse tipo de rolamento suporta cargas radiais e cargas axiais em um sentido. Esse tipo de rolamento permite a montagem dos anéis de forma separada, devido ao fato de suportarem cargas axiais somente em um sentido [6].

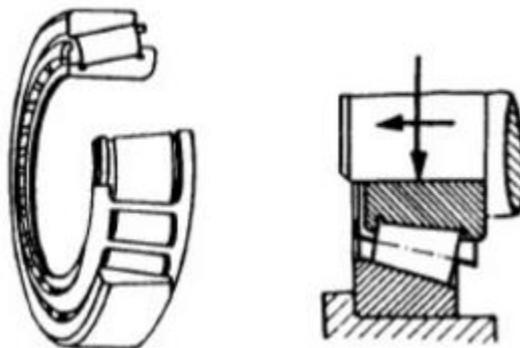


Figura 2.5 Rolamento de rolos cônicos [6].

2.4.2 Mancais

Mancais são elementos mecânicos fixos destinados a suportar cargas, geralmente um eixo girante, deslizante ou oscilante. Os mancais podem ser classificados em relação a carga ao qual estão dando suporte. Assim existem mancais axiais, radiais e mistos. Os mancais axiais impedem o deslocamento na direção do eixo, ou seja, absorvem esforços axiais. [6]

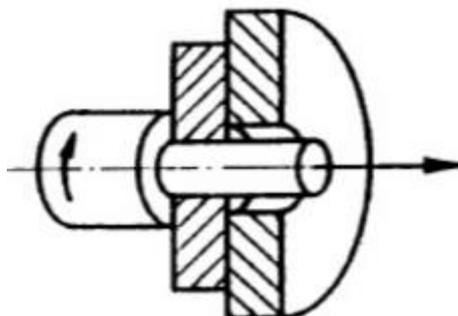


Figura 2.6 Mancal axial [6].

Os mancais radiais impedem o deslocamento na direção transversal do eixo, ou seja, absorvem esforços radiais.

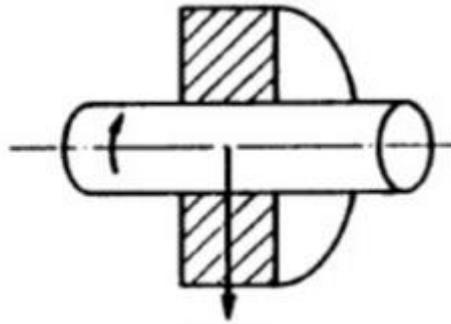


Figura 2.7 Mancal radial [6].

Os mancais mistos possuem as características tanto dos mancais axiais quanto dos mancais radiais.

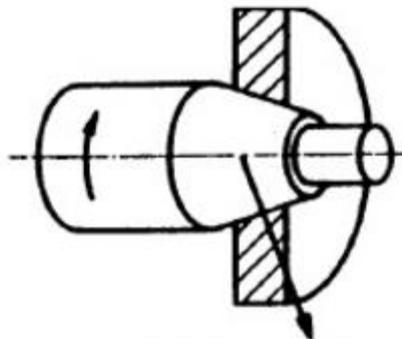


Figura 2.8 Mancal misto [6].

2.4.3 Engrenagens

Engrenagens são elementos básicos compostos por rodas dentadas utilizados para a transmissão de potência. Engrenagens operam aos pares, de maneira que os dentes de uma se encaixa nos dentes da outra. Por não ocorrer deslizamento entre o movimento dos dentes, as engrenagens permitem o aumento ou redução do momento torsor de um eixo para o outro com perda mínima de energia. A relação entre os momentos ou velocidades é determinada pela razão entre os diâmetros primitivos (D_p) das engrenagens, que é o diâmetro intermediário entre o diâmetro externo (D_e) e interno da engrenagem (D_i), o qual pode ser observado pela Figura 2.9 [6].

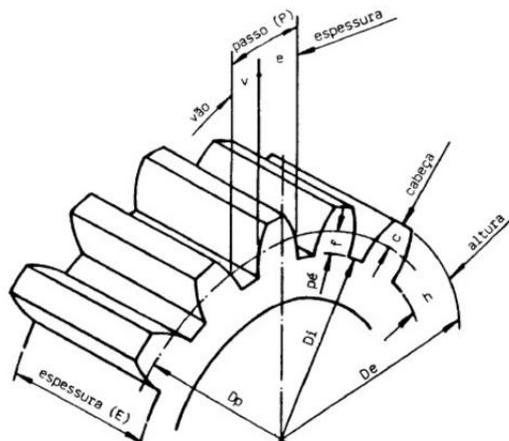


Figura 2.9 Esquemático de engrenagem [6].

Existem diversos tipos de engrenagem, um deles é a engrenagem cilíndrica de dentes retos, que é o tipo mais comum e com mais baixo custo. Nesse modelo, que pode ser observado na Fig. 2.10, os dentes estão dispostos de maneira paralela entre si em torno do eixo. Devido a produção de ruído, essa engrenagem é mais utilizada em transmissões de baixas rotações [6].

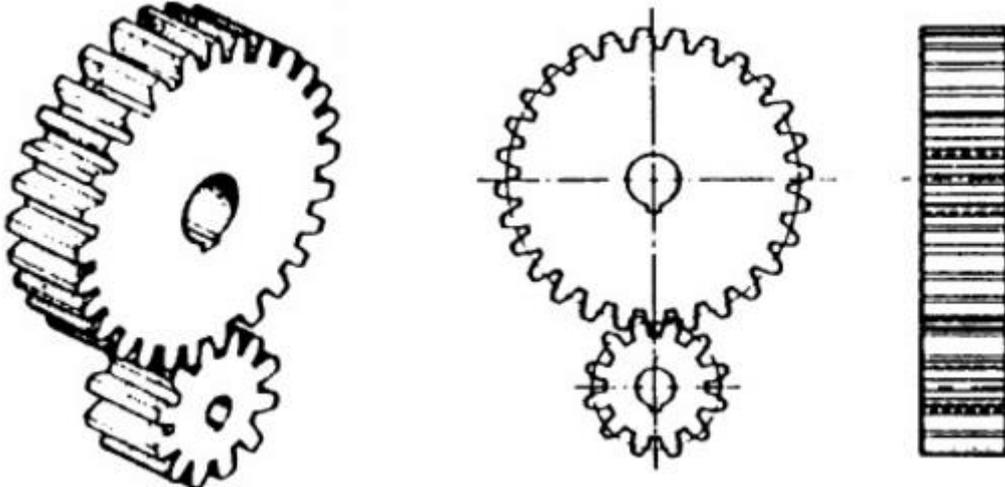


Figura 2.10 Engrenagem cilíndrica de dentes retos [6].

Outro tipo de engrenagem bastante utilizado é a engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais. Os dentes, nesse modelo, são dispostos transversalmente em forma de hélice em relação ao eixo. Esse tipo de engrenagem é utilizado em transmissões fixas de rotações elevadas, além de sistemas onde os eixos formam um ângulo qualquer entre si [6].

2.4.4 Elementos de vedação

O O-ring, ou junta tórica, é uma junta em formato de anel com o objetivo de impedir fluxo indesejado de fluídos. O o-ring pode ser composto de diversos materiais, mas geralmente é composto por elastômeros, que permite uma grande flexibilidade e suporte altas temperaturas. A vedação é feita pela deformação do material que irá preencher o espaço ao qual está posicionado, impedindo a entrada de substâncias indesejadas e mantendo a pressão constante [21].

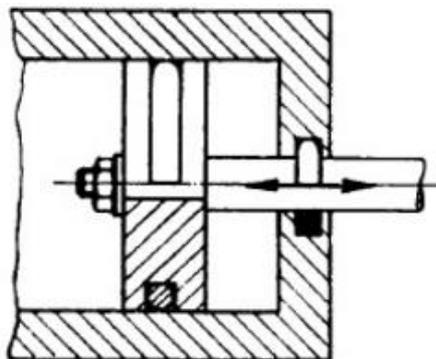


Figura 2.11 O-ring sendo utilizado em um pistão [6].

Retentores são geralmente utilizados na vedação de eixos rotativos, especialmente na construção de máquinas. Retentores são geralmente compostos de borracha ou couro, alguns

possuem carcaça metálica para ajuste no alojamento. A existência de um lábio de vedação com carga de mola garante a vedação dinâmica e estática. A mola helicoidal tem como função manter a pressão ao vedar. A vedação ocorre pelo contato do lábio de vedação com o eixo, essa interferência produz uma força de atrito no lábio com a direção do movimento do eixo e sentido contrário em relação ao mesmo.



Figura 2.12 Seção transversal de um retentor [6].

2.5 SELEÇÃO DE MOTORES

Os motores mais comumente utilizados para acionamento de manipuladores são motores de corrente contínua e os motores de passo. Essa opção se deve ao fato de serem motores de custos relativamente baixos, de menor porte, de pequeno a médio torque e de controle relativamente simples. Por outro lado, motores AC possuem o custo bem mais elevado, o torque produzido alto e necessitam de alimentação trifásica, o que encarece e dificulta a construção do sistema.

Os motores de corrente contínua têm como princípio de funcionamento um condutor, pelo qual percorre uma corrente elétrica, sofrendo a ação de forças, as quais tentam movimentá-lo, quando submetido a um campo eletromagnético.

Os motores DC são constituídos por certos elementos essenciais como o estator, rotor, comutador e as escovas. O estator é um ímã permanente ou um material ferromagnético envolto por um enrolamento, chamado de enrolamento de campo, com a finalidade de produzir um campo magnético fixo. O rotor é o elemento que irá se movimentar durante o funcionamento do motor, esse é constituído por um material ferro magnético laminado envolto por um enrolamento, chamado enrolamento de armadura, conectado ao anel comutador. O comutador tem a função de alterar o sentido da corrente que circula o enrolamento de armadura, as polaridades são alternadas durante o giro do rotor. Por fim, as escovas são responsáveis por alimentar o circuito do rotor [5].

Para obter um alto torque de partida e frenagem aliado à uma baixa inércia, é necessária a realização de um controle da velocidade e posicionamento relacionado a utilização do motor DC. É possível controlar o motor DC tanto de maneira analógica quanto digital, conhecido por PWM ou por ciclo de trabalho.

O controle analógico é feito pela variação contínua do valor de uma tensão contínua aplicada para controle da velocidade ou torque. Para a aplicação em robótica, esse controle deve ser feito por um computador e os sinais de controle devem ser convertidos para sinais

analogicos para a realizaçao da açao de controle. Em ambos os casos, são utilizadas técnicas PID para o sistema de controle. A Figura 2.13 mostra o esquema de um sistema de controle para aplicação em robótica [5].

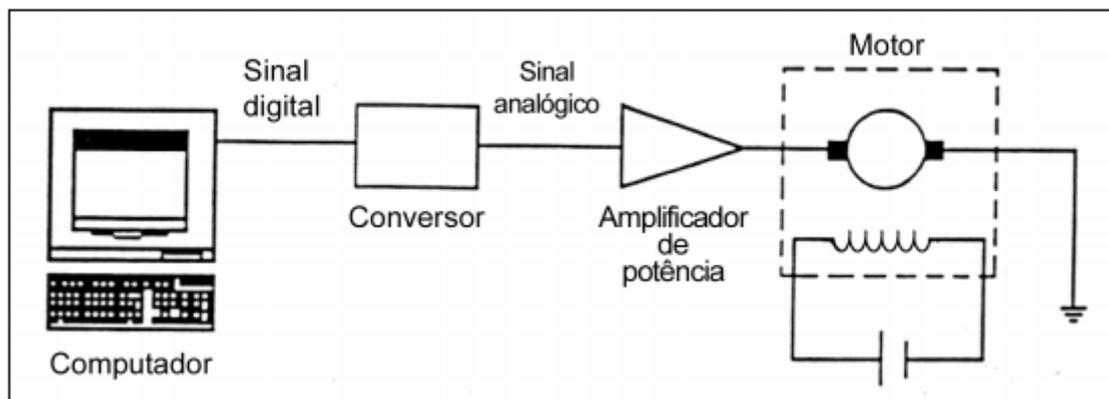


Figura 2.13 Sistema de controle de Motor DC [5].

Outro método de se controlar a velocidade do motor é utilizando o controle PWM, que tem como princípio o uso de transistores para chaveamento do circuito. O controle PWM determina o tempo que os transistores dos amplificadores de potência ficam em condução ou corte. É importante notar que a operação em modo ativo dos transistores gera uma alta dissipação de energia. Pelo chaveamento dos transistores, o circuito ora receberá níveis altos de tensão e ora receberá níveis baixo, se o tempo em que os transistores operam em modo ativo for maior que o tempo em modo corte, a média de tensão resultante irá ditar a velocidade do motor. Quanto maior for a tensão média resultante, maior será a velocidade do motor. A relação entre o tempo em que o transistor opera na região ativo e o tempo de ciclo total é chamada de ciclo de trabalho [5].

$$D = \frac{T_p}{T} \quad (7)$$

Onde D é o ciclo de trabalho (*dutycycle*), T_p é a duração do pulso positivo e T é o valor do período de chaveamento.

Existem tipos de motores DC que são projetados de maneira a facilitar a realização da ação de controle. Por exemplo, existem motores que são construídos com sensores de velocidade e posição em sua estrutura e esses motores são chamados de servo motores [5].

Motores de passo são motores cujo princípio é a conversão de pulsos elétricos em movimentos mecânicos de rotação. O deslocamento angular é proporcional ao número de pulsos aplicados, assim a velocidade de rotação depende da frequência de pulsos aplicados. O movimento gerado pela aplicação de um pulso é denominado de passo, os quais são bem definidos e constantes, com isso, esse tipo de motor é operado geralmente em malha aberta. Motores de passo possuem uma quantidade fixa de pólos magnéticos que determinam o número de passos por revolução. A movimentação do rotor depende do tipo de motor de passo [10].

Nos motores de passo com relutância variável, o acionamento de um par de bobinas produz um campo magnético no estator e o rotor gira de maneira a encontrar a menor relutância com as linhas de campo magnético. Os motores de passo de ímã permanente operam de maneira semelhante aos de relutância variável, porém, o rotor é constituído de ímãs permanentes, o que resulta em um maior torque aplicado. Entretanto, os motores de passo mais utilizados na indústria são os motores de passo híbridos, o qual combina as vantagens dos dois tipos anteriores, em relação ao torque e ao tamanho do passo [10]. Os motores de passo híbridos são geralmente de 2 fases, porém também existem de 3 e 5 fases.

Existem 2 formas de operação de motores de passo, unipolar e bipolar. No modo unipolar existe dois enrolamentos por fase e a corrente flui por um único sentido. No modo bipolar existe um enrolamento por fase e a corrente pode fluir em ambos sentidos em cada enrolamento. No modo unipolar pode se utilizar chaves simples, um TJB por enrolamento por exemplo. Já para o modo bipolar, o chaveamento de cada enrolamento deve ser feito por ponte completa, ponte H [10].

Na aplicação em robótica, o controle do motor de passo deve ser automático, ou seja, a geração da combinação de pulsos a serem realizados deve ser feita por um computador para ser enviada ao controlador, conforme o diagrama de blocos da Fig. 2.14 [5].

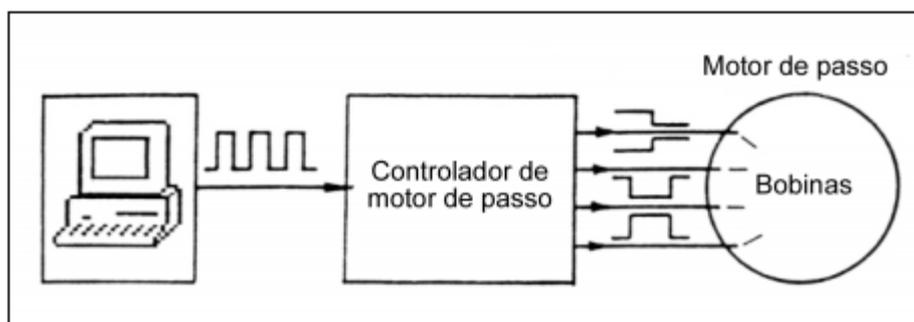


Figura 2.14 Diagrama de blocos de controle de motor de passo [5].

Selecionado o motor que irá ser utilizado, deve-se escolher um driver compatível para o controle do mesmo. Primeiramente deve-se atentar aos valores de tensão e corrente consumidos pelo motor, pois o driver para ser compatível e poder ser uma opção de escolha deve operar para tais valores. Geralmente os drivers de motores operam em certas faixas de corrente e tensão, dependendo da aplicação e tipo de motor. Outro fator importante para a escolha do driver é a compatibilidade de comunicação entre os dispositivos do sistema. Os requerimentos de ligações do driver devem ser possíveis de ser realizados no sistema, caso contrário não há como realizar a comunicação entre o driver e os demais dispositivos.

No caso de seleção de um driver para um motor de passo, por exemplo, deve-se atentar ao tipo de motor de passo utilizado, à resolução e o método de acionamento desejados do motor, além da maneira de como o motor é alimentado. Tendo em vista esses aspectos, já é possível reduzir a quantidade de drivers que possam ser utilizados drasticamente. Dentre uma gama menor de possibilidades, busca-se eliminar os drivers não compatíveis com o motor escolhido, conforme os aspectos mencionados anteriormente.

2.6 TROCADOR DE CALOR

Os equipamentos utilizados para trocar o calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas, geralmente separados por uma parede sólida, são denominados trocadores de calor [16]. Esses dispositivos são amplamente utilizados em resfriadores, aquecedores, condensadores, evaporadores, caldeiras, condicionadores de ar. A eficiência de um trocador de calor depende do material utilizado, das características geométricas e das características dos fluidos envolvidos. O método mais tradicional para melhorar a eficiência é pela alteração da geometria do trocador para aumentar a superfície de contato entre os fluidos, geralmente adicionando aletas pela tubulação [16]. Há diversos tipos de trocador de calor, podendo ser classificados de acordo com o processo de transferência (contato direto ou indireto) ou pelo tipo de construção (tubular ou com placas).

Os trocadores de contato direto, como ilustrado pela Fig. 2.15, funcionam pela mistura dos fluidos e geralmente envolvem transferência de massa além da transferência de calor. As taxas de transferência são muito altas e sua construção é relativamente barata. Porém, as aplicações são limitadas a esse caso específico onde é permissível o contato direto entre os fluxos [19].

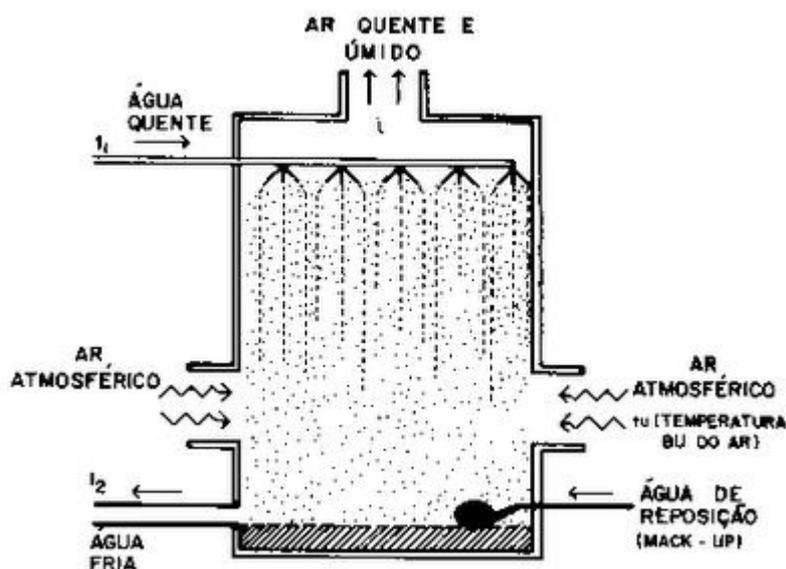


Figura 2.15 Torre de resfriamento, um exemplo de trocador de contato direto [19].

Os trocadores de contato indireto, como ilustrado pela Fig. 2.16, funcionam pela transferência de calor contínua entre fluidos separados por uma parede. É o tipo de trocador mais utilizado devido ao baixo custo tanto para fabricação quanto para manutenção, apesar da baixa eficiência [19].

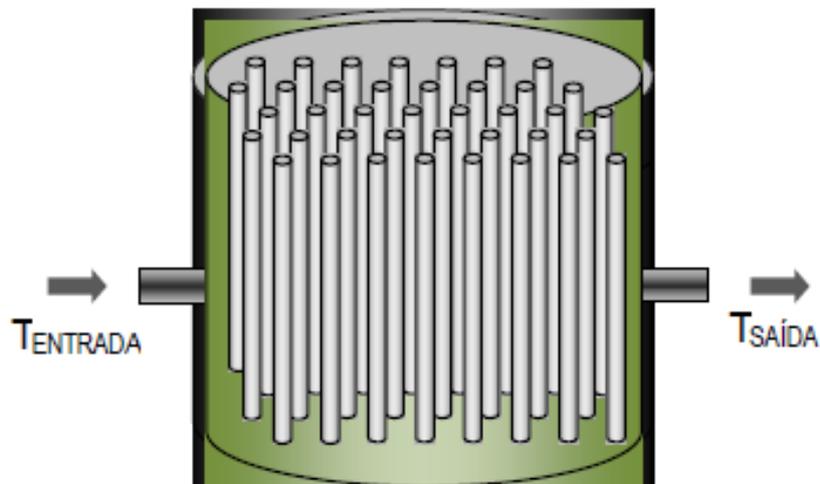


Figura 2.16 Trocador de armazenamento, um trocador de contato indireto [19].

Os trocadores tubulares, como ilustrado pela Fig. 2.17, são construídos com tubos circulares e são utilizados para transferência de calor entre fluidos em uma ou duas fases. Têm seu uso ótimo em aplicações onde as pressões e/ou temperaturas são muito elevadas e impossibilitam o uso de outros tipos de trocadores [19].

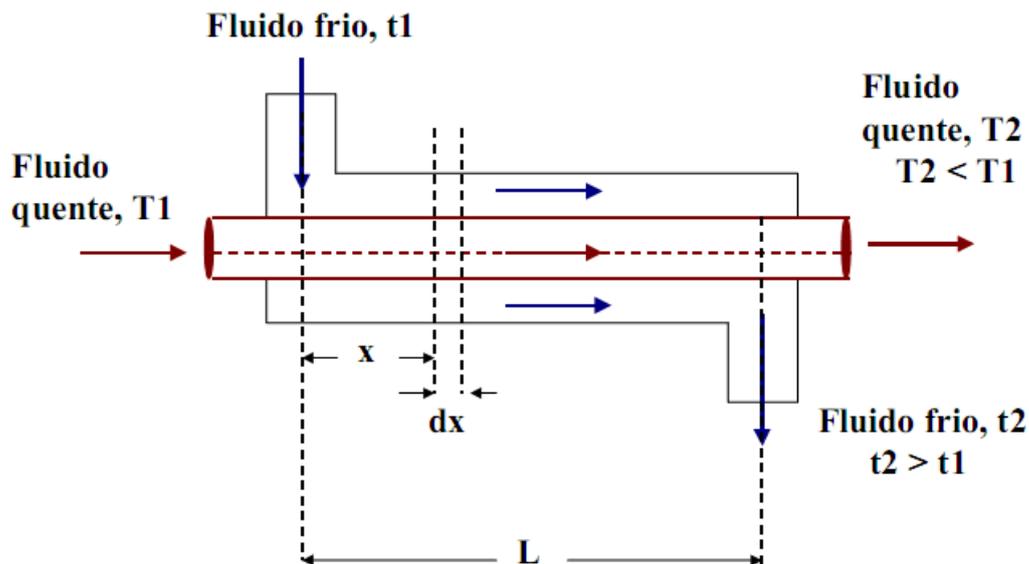


Figura 2.17 Trocador de tubo duplo, um exemplo de trocador tubular [19].

Os trocadores tipo placa, como ilustrado pela Fig. 2.18, são construídos com placas finas em camadas múltiplas levemente separadas com alta área de superfície e pequenas passagens de fluido. Quando comparados com os trocadores tubulares, têm custo e volume menores, mas não suportam as pressões elevadas como os tubulares [19].

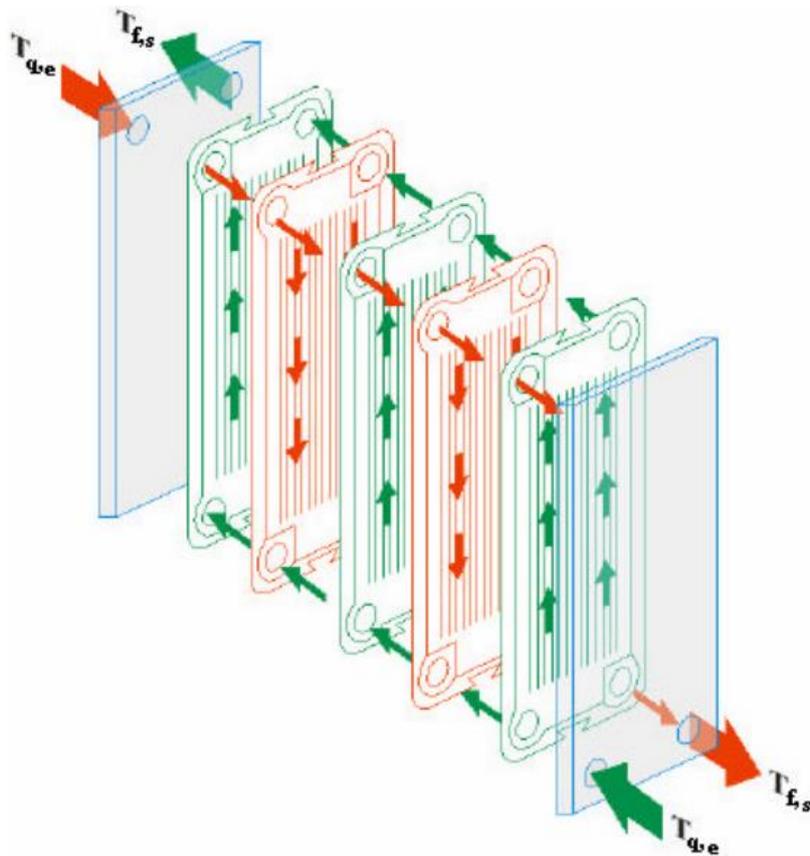


Figura 2.18 Trocador de calor tipo placa [19].

2.7 LABVIEW

LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que utiliza blocos intuitivos para criar aplicações. A programação é baseada em fluxo de dados, o qual determina a execução, ao contrário das linguagens de programação baseadas em texto, onde as instruções determinam a execução do programa. O programa é feito com os blocos em uma janela e em outra janela é construída a interface de usuário, onde são mostradas as variáveis indicadoras do processo durante a execução do programa. O LabVIEW suporta diversos protocolos de comunicação como RS232 e RS485, além de suportar dispositivos de aquisição de dados. Desta forma, o LabVIEW funciona como elemento de condicionamento, processamento e apresentação do sinal [11].

Os programas do LabVIEW são chamados instrumentos virtuais (VI) por que sua aparência e operação imitam instrumentos físicos, tais como osciloscópios e multímetros. Quando uma nova VI é criada, são abertas as janelas de interface de usuário (Figura 2.19) e de diagramas de bloco (Figura 2.20) [11].

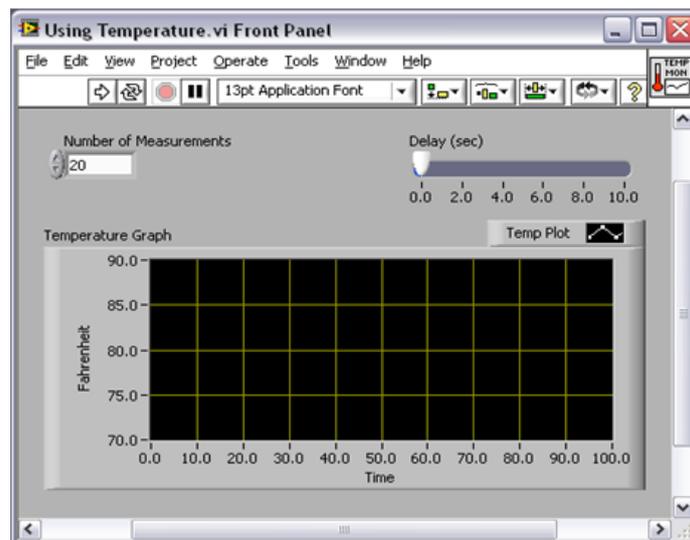


Figura 2.19 Painel frontal do LabVIEW com a interface de usuário [11].

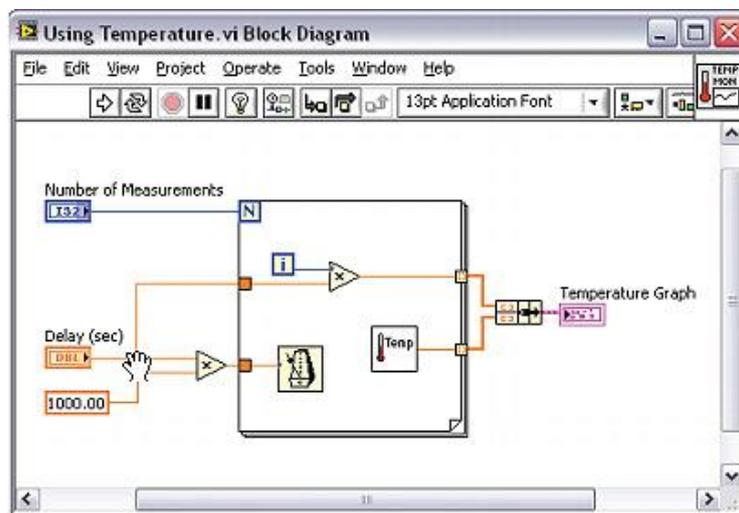


Figura 2.20 Janela de diagrama de blocos do LabVIEW [11].

O painel frontal é a janela de interface de usuário, onde é possível a inserção de controles e indicadores, que são terminais de entrada e saída do VI respectivamente. Os controles são botões, chaves e outros dispositivos que simulam instrumentos de entrada e fornecem dados para o diagrama de blocos. Os indicadores são gráficos, fitas indicadores, LEDs e outros dispositivos que simulam instrumentos de saída e mostram os dados obtidos ou gerados pelo diagrama de blocos. A Figura 2.19 mostra dois controles, número de medições (Number of Measurements) e atraso (Delay) e mostra um indicador, um gráfico de temperatura no do tempo (Temperature Graph). Existem controles e indicadores dos tipos numérico, booleano e cadeia de caracteres. A Figura 2.21 mostra exemplos desses três tipos de controles e indicadores [11].

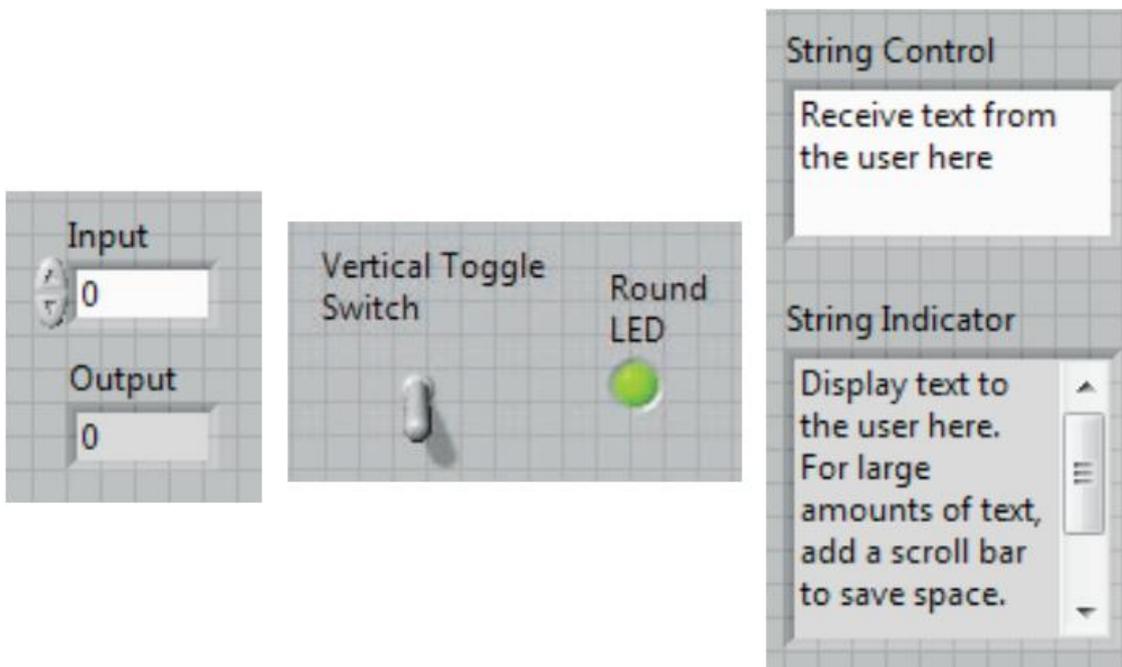


Figura 2.21 Controles e indicadores numérico, booleano e cadeia de caracteres [11].

O diagrama de blocos é a janela de programação, onde são utilizados terminais, sub VIs, funções, constantes, estruturas e fios que transferem dados entre os blocos. Os objetos no painel frontal aparecem como terminais no diagrama de blocos, que são portas de entrada e saída análogos a variáveis e constantes nas linguagens baseadas em texto. O programa ilustrado pela Fig. 2.22 calcula a área de um triângulo. As informações de base (Base) e altura (Height) são as entradas (controles), a informação de área (Area) é a saída (indicador), o valor 0.5 é uma constante e os blocos de multiplicação são funções [11].

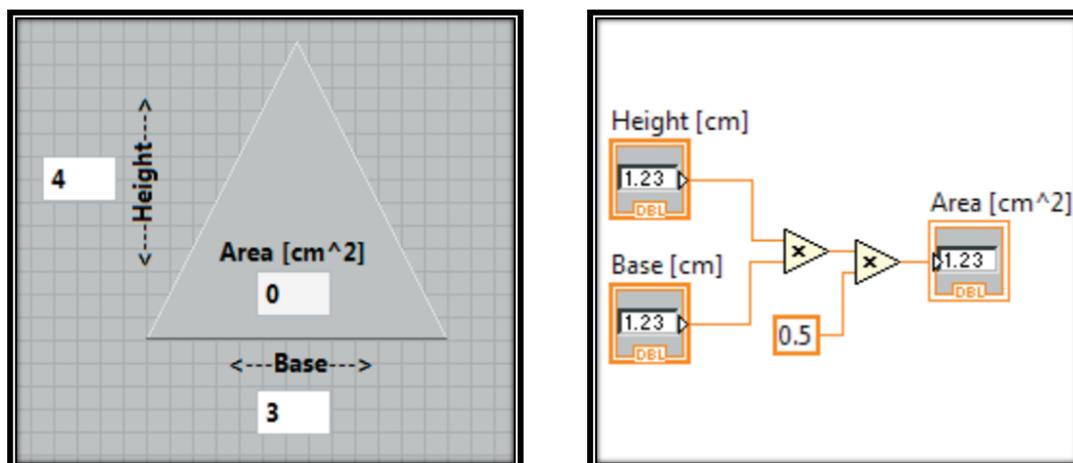


Figura 2.22 Programa para cálculo de área de triângulo em LabView [11].

As estruturas de execução servem para implementar os laços de execução em *loop* até que uma condição seja satisfeita ou enquanto uma condição é satisfeita. O laço *while* é um retângulo que engloba o trecho que se deseja repetir (Fig. 2.23). Dentro dele há um terminal condicional de entrada, ilustrado pelo detalhe na Fig. 2.23, que interromperá a repetição quando receber um valor booleano específico. Também há um terminal de iterações que indica quantas iterações foram completadas [11].

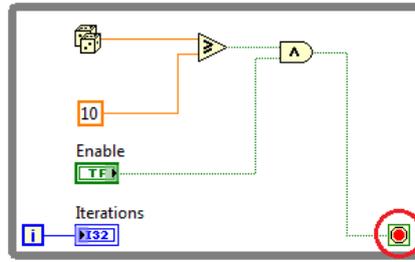


Figura 2.23 Exemplo de laço while com detalhe para o terminal condicional [11].

O laço *for* também é um retângulo que engloba o trecho que se deseja repetir (Fig. 2.24). Dentro dele há um terminal de contagem de *loop*, ilustrado pelo detalhe na Fig. 2.24, que recebe como entrada o valor de quantas vezes o subdiagrama deve ser repetido. Também há um terminal de iterações que indica quantas iterações foram completadas [11].

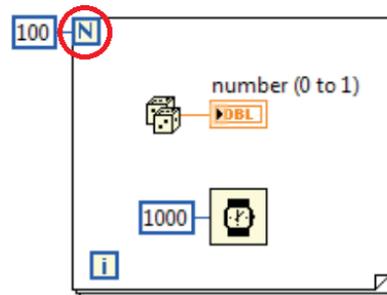


Figura 2.24 Exemplo de laço for com detalhe para o terminal de contagem [11].

Na Figura 2.24 também é possível ver um bloco com a função de espera representado pelo relógio que permite que o VI aguarde um determinado tempo em milissegundos, permitindo que o processador realize outras tarefas durante esse tempo. Outra estrutura de execução é a estrutura de caso, que é um retângulo que possui dois ou mais subdiagramas em seu interior. O caso é escolhido para a execução pelo terminal seletor por uma entrada conectada a ele. A Figura 2.25 mostra um programa que utiliza estrutura de caso para conversão de temperatura de °F para °C. A entrada do terminal seletor é um booleano que é positivo se a temperatura já estiver em °C e falso se estiver em °F. O caso verdadeiro da estrutura de caso apenas segue a informação, pois já está em °C e o caso falso faz o cálculo de conversão de °F para °C [11].

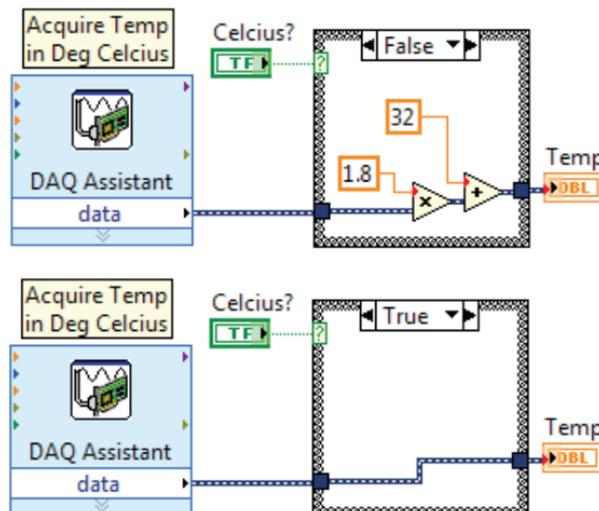


Figura 2.25 Exemplo de estrutura de caso para conversão de unidade [11].

2.8 TRANSFORMAÇÃO DE COORDENADAS HOMOGÊNEAS

2.8.1 Coordenadas Homogêneas

As coordenadas homogêneas, também chamadas de coordenadas projetivas, são um sistema de coordenadas utilizadas na geometria projetiva, assim como as coordenadas cartesianas são utilizadas na geometria euclidiana. Essa tem a vantagem em relação às coordenadas cartesianas por permitir a representação de pontos no infinito utilizando coordenadas finitas e por terem formulas mais simples e simétricas.

Por definição, um ponto representado por (X,Y,Z) nas coordenadas cartesianas é representado por $[x,y,z,w]$ em coordenadas homogêneas, onde [19]:

$$X = \frac{x}{w} \quad Y = \frac{y}{w} \quad Z = \frac{z}{w} \quad (8)$$

O valor w é chamado de peso. Portanto, é possível obter uma relação direta entre as coordenadas utilizando peso igual a 1. Desta forma, o ponto V pode ser representado por [19]:

$$V(X,Y,Z) = [x \ y \ z \ 1]^T \quad (9)$$

2.8.2 Translação

Para transladar um ponto u em x_0 , y_0 e z_0 unidades nas direções x , y e z , utiliza-se a transformação T_{trans} , onde [19]:

$$v = T_{trans} \cdot u$$
$$T_{trans}(x_0, y_0, z_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.8.3 Rotação

Para rotacionar um ponto u em θ graus em relação aos eixos x , y e z , utiliza-se as transformações T_{rot} , onde [19]:

$$v = T_{rot} \cdot u$$
$$T_{rot}(\theta, x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_{rot}(\theta, y) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$T_{rot}(\theta, z) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3. PROJETO MECÂNICO

3.1 PROJETO DOS EIXOS

Os eixos que sustentam o sistema na bancada para dar o grau de liberdade de rotação da mesa no eixo perpendicular ao eixo central (Fig 1.9) devem suportar não só o peso do sistema, mas também o peso final da peça que está sendo depositada tendo a menor deflexão possível para reduzir os erros de precisão. Estimando o peso máximo de 10kg para uma peça depositada, peso do sistema de 30kg e peso do fluido de arrefecimento de 10kg, temos uma carga total de 50kgf distribuídas entre os dois eixos. A Figura 3.1 mostra as forças de reação da bancada nos eixos e as dimensões desses e da mesa.

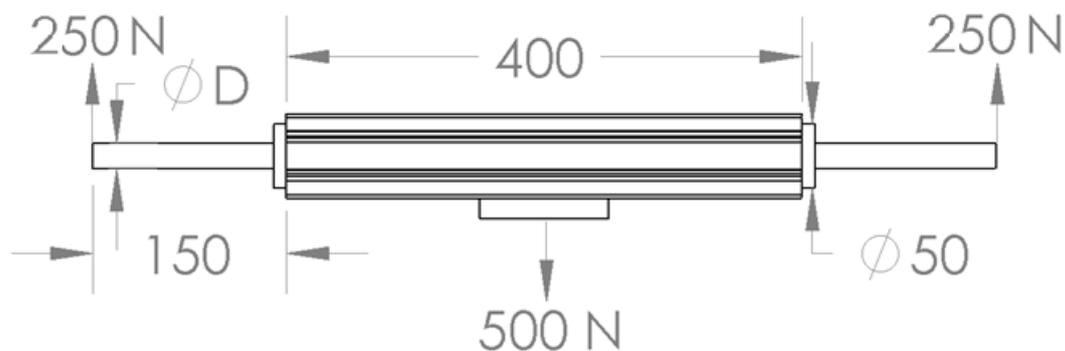


Figura 3.1 Forças aplicadas aos eixos da mesa e suas dimensões.

Com as forças de reação e o comprimento dos eixos, pode-se calcular o momento fletor ao longo do eixo utilizando o corte da Fig. 3.2. Para cada um dos eixos, o momento fletor é dado por $250x$, sendo máximo para $x = 150\text{mm}$, resultando em $37,5\text{Nm}$. O momento torçor máximo utilizado foi 15Nm , que é o maior torque que o motor da mesa pode fornecer ($0,5\text{Nm}$) vezes a redução do redutor (30:1).

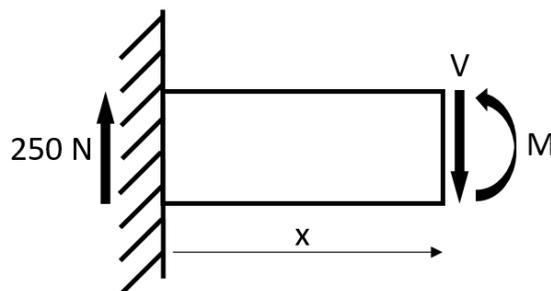


Figura 3.2 Corte do eixo para cálculo do momento fletor.

Utilizando os valores M e T máximos calculados, a Equação 3 é utilizada para calcular o raio mínimo de cada eixo. A tensão de cisalhamento admissível utilizada foi a do aço 1020 de 125MPa com fator de segurança 2, resultando em $62,5\text{Mpa}$:

$$c = \left(\frac{2}{\pi \tau_{adm}} \sqrt{M^2 + T^2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{2}{\pi \cdot 62,5 \cdot 10^6} \sqrt{37,5^2 + 15^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,44 \text{ mm} \quad (14)$$

3.2 PROJETO DAS VIGAS

As vigas que sustentam o sistema na bancada (Fig 1.12) devem suportar a mesma carga dos eixos mais o peso dos eixos e dos mancais, também mantendo a menor deflexão possível para reduzir os erros de precisão. A carga utilizada foi a mesma, visto que os valores utilizados nos eixos foram estimados acima dos valores reais, o peso dos eixos e dos mancais podem ser incluídos nessa estimativa mantendo a carga total de 50kgf. A Figura 3.3 mostra as forças de reação do sistema em uma das vigas da bancada e as dimensões dessa.

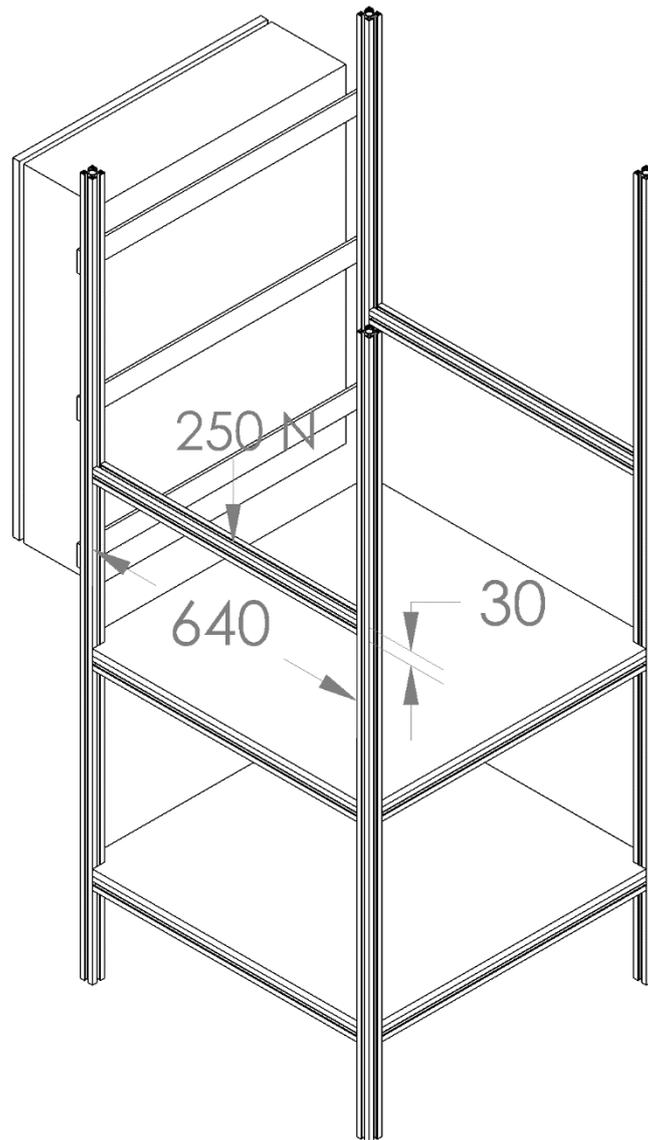


Figura 3.3 Força aplicada sobre uma das vigas e suas dimensões.

Utilizando a Equação 6, pode-se calcular a deflexão da viga para essa carga, onde o comprimento livre L é 640 mm e o momento de inércia de área I fornecido pelo fabricante do perfil 30x30mm é 3.32cm^4 :

$$f = \frac{F \cdot L^3}{1,32 \cdot I \cdot 10^{11}} = \frac{250 \cdot 640^3}{1,32 \cdot 3,32 \cdot 10^{11}} = 0,15 \text{ mm} \quad (15)$$

3.3 FABRICAÇÃO

Os eixos da mesa foram fabricados no SG9 a partir do desenho técnico da peça (Fig. 3.4). Pela Equação 14, o diâmetro mínimo do eixo é de 14.88 mm, escolheu-se 15 mm por disponibilidade de mancais no mercado. Ao invés de usinar um tarugo de 50 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, foram usinados dois tarugos em um torno universal, um para o eixo e outro para a flange. O acoplamento entre as peças é feito por uma rosca de 12.7 mm de diâmetro. Como foi utilizado um fator de segurança 2, isso não causará falha da peça. Os furos foram feitos na furadeira de coordenadas. O eixo foi projetado considerando a tensão de cisalhamento admissível do aço 1020, mas o material disponível no SG9 para a fabricação foi o aço inox. Desta forma, o eixo ficou superdimensionado.

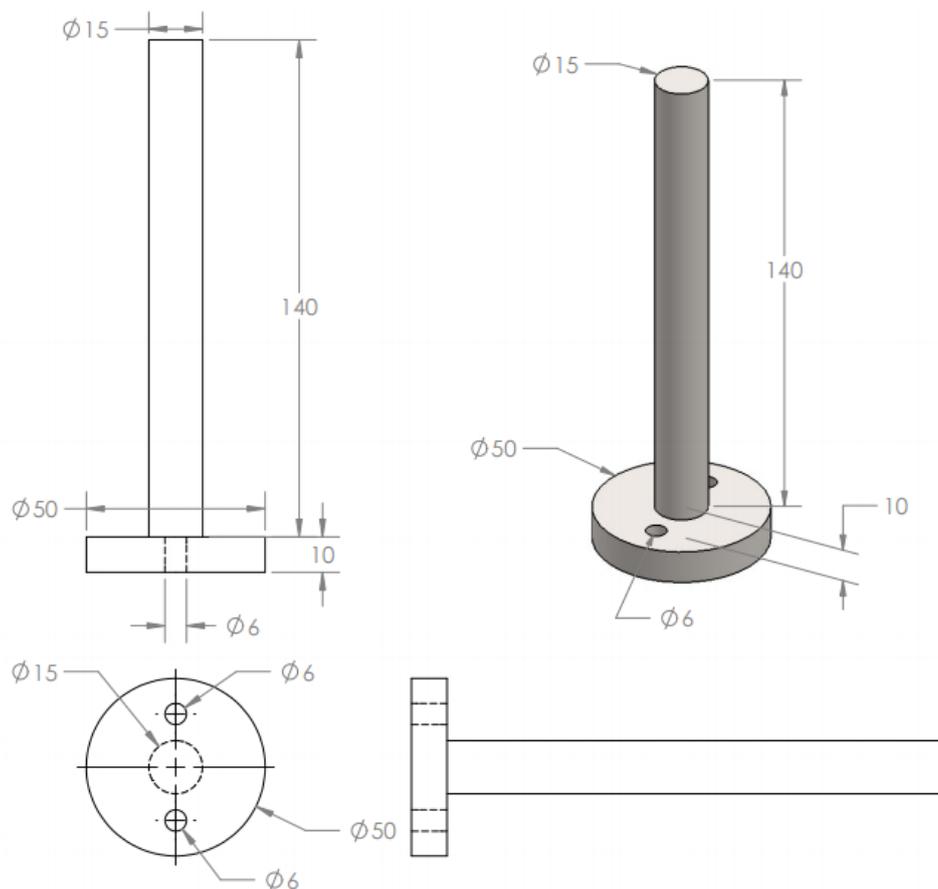


Figura 3.4 Desenho técnico do eixo da mesa.

Os perfis de alumínio que sustentam a bancada e os utilizados na estrutura de alumínio da mesa (Fig. 3.5) foram cortados no SG9 a partir de barras de 2 m pela serra fita horizontal.

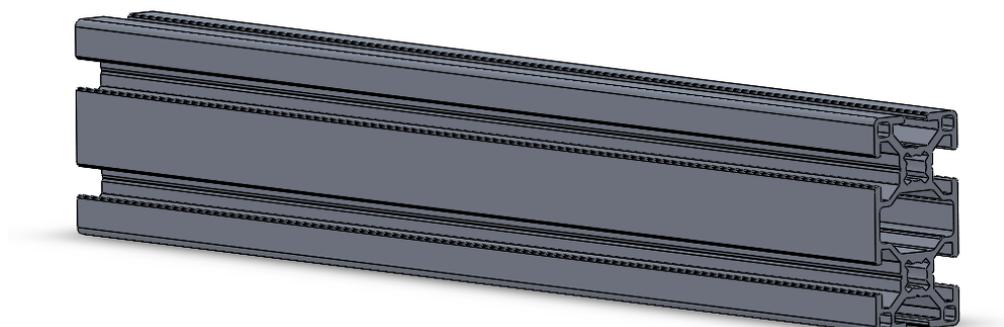


Figura 3.5 Perfil de alumínio cortado.

A tampa do reservatório inferior (Fig. 3.6) foi fabricada no SG9 utilizando o reservatório inferior como gabarito para manter os furos coincidentes, pois esses não estavam simétricos em relação ao furo central. Uma chapa de aço 1010 de 6 mm de espessura foi cortada na guilhotina de pedal e os furos feitos em uma furadeira de bancada.

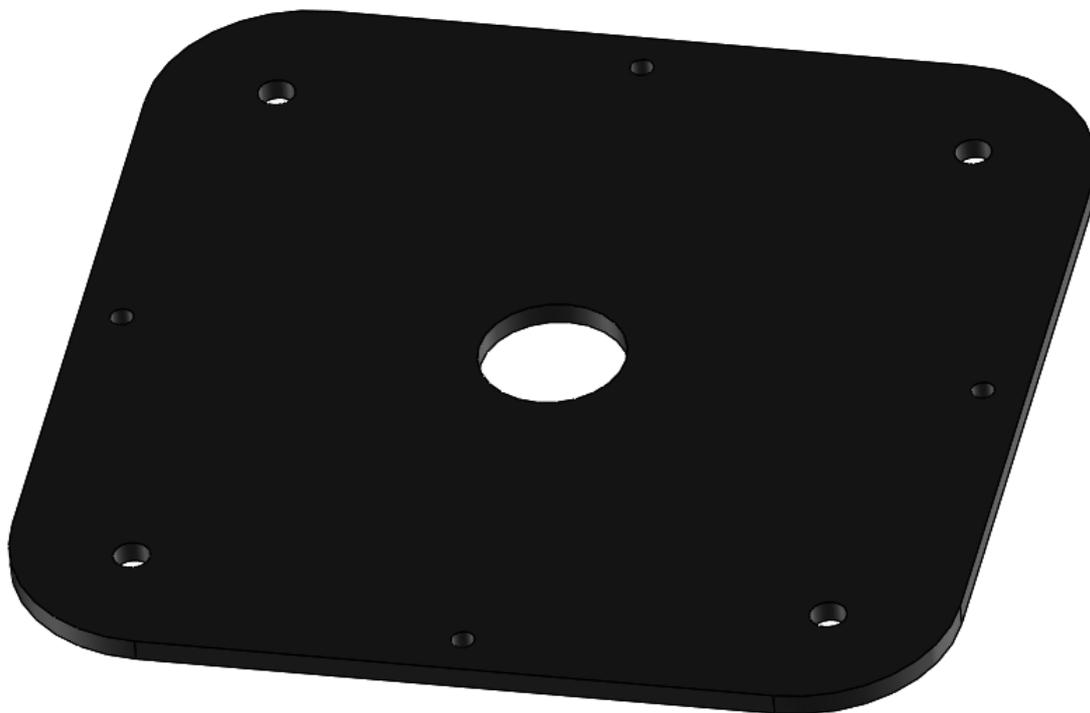


Figura 3.6 Tampa do reservatório inferior.

As demais peças pequenas foram fabricadas no GRACO utilizando limas, furadeira de bancada, esmeril, arco de serra e demais ferramentas de mão.

3.4 MONTAGEM

O sistema montado possui diversas partes que são tampadas e sem acesso para manuseio. Portanto, é necessário seguir uma ordem de montagem para que todos os parafusos e porcas sejam devidamente apertados.

A primeira estrutura a ser montada é a mesa, iniciando pela união dos perfis de alumínio utilizando as cantoneiras e porcas para esses perfis (Fig. 3.7).

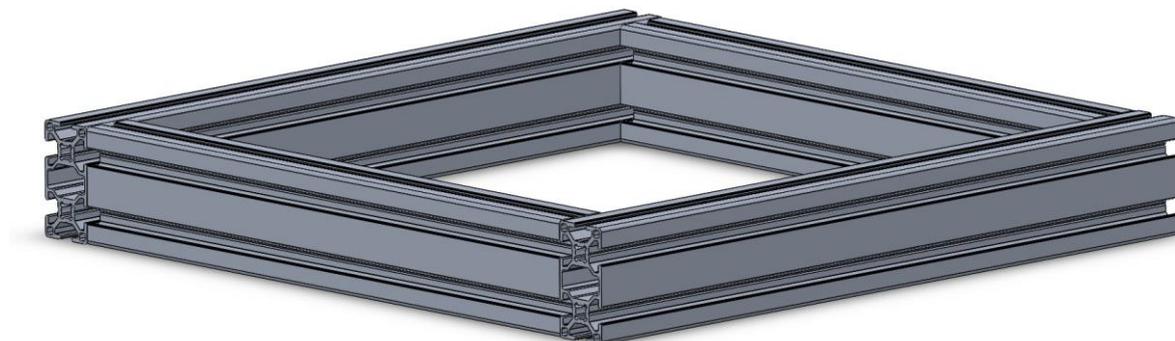


Figura 3.7 Montagem da estrutura de alumínio da mesa.

Montada a estrutura com os perfis, é fixada a placa de aço inferior e os dois eixos nas laterais utilizando porcas para os perfis (Fig. 3.8).



Figura 3.8 Montagem dos eixos na mesa.

O redutor com o motor θ é fixado no eixo com o rasgo para a chave e a mesa é fixada na bancada pelos mancais (Fig. 3.9). Esse passo pode ser deixado para o final, mas é recomendado fazê-lo nessa etapa para facilitar no processo de montagem.

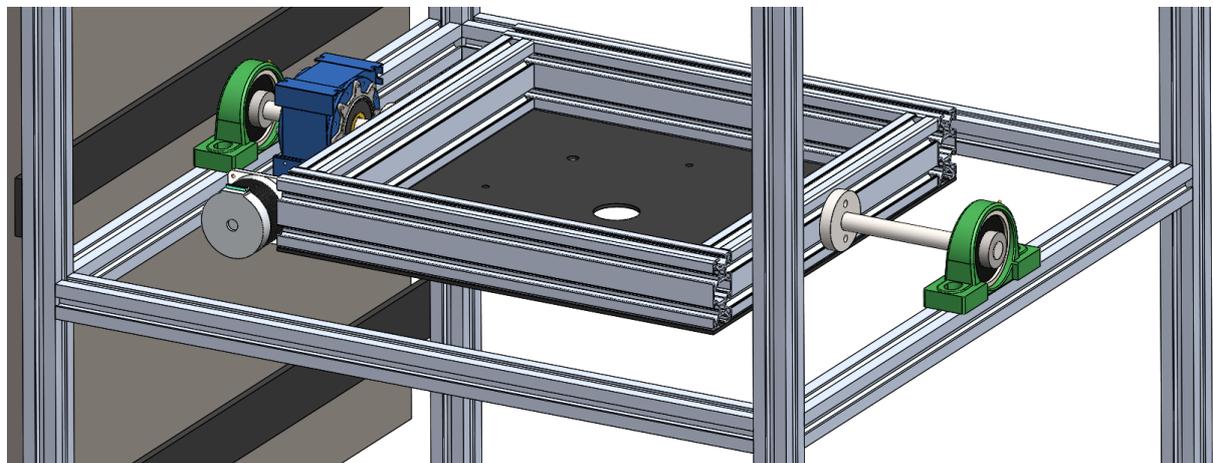


Figura 3.9 Montagem da mesa na bancada pelos mancais.

As escovas, as barras roscadas e o motor Φ são fixadas por porcas na placa de aço inferior da mesa (Fig. 3.10). É recomendado utilizar uma porca em cada face da placa para fixar a barra roscada para dar mais rigidez e precisão no alinhamento do reservatório.

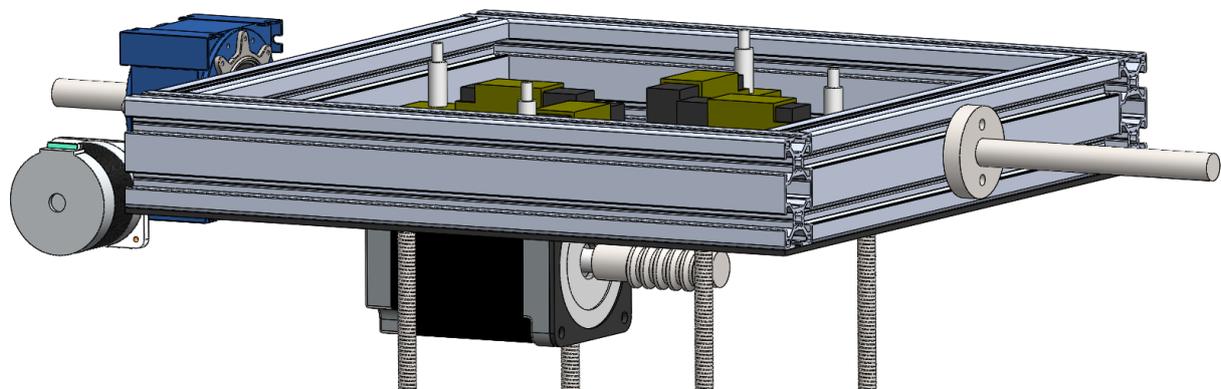


Figura 3.10 Montagem das escovas e das barras roscadas na mesa.

A panela com o rolamento e o anel das escovas em seu eixo central são fixadas na placa de aço superior da mesa por parafusos no mancal do rolamento. A placa então é fixada na mesa utilizando porcas para os perfis da mesma forma que a placa inferior (Fig. 3.11).

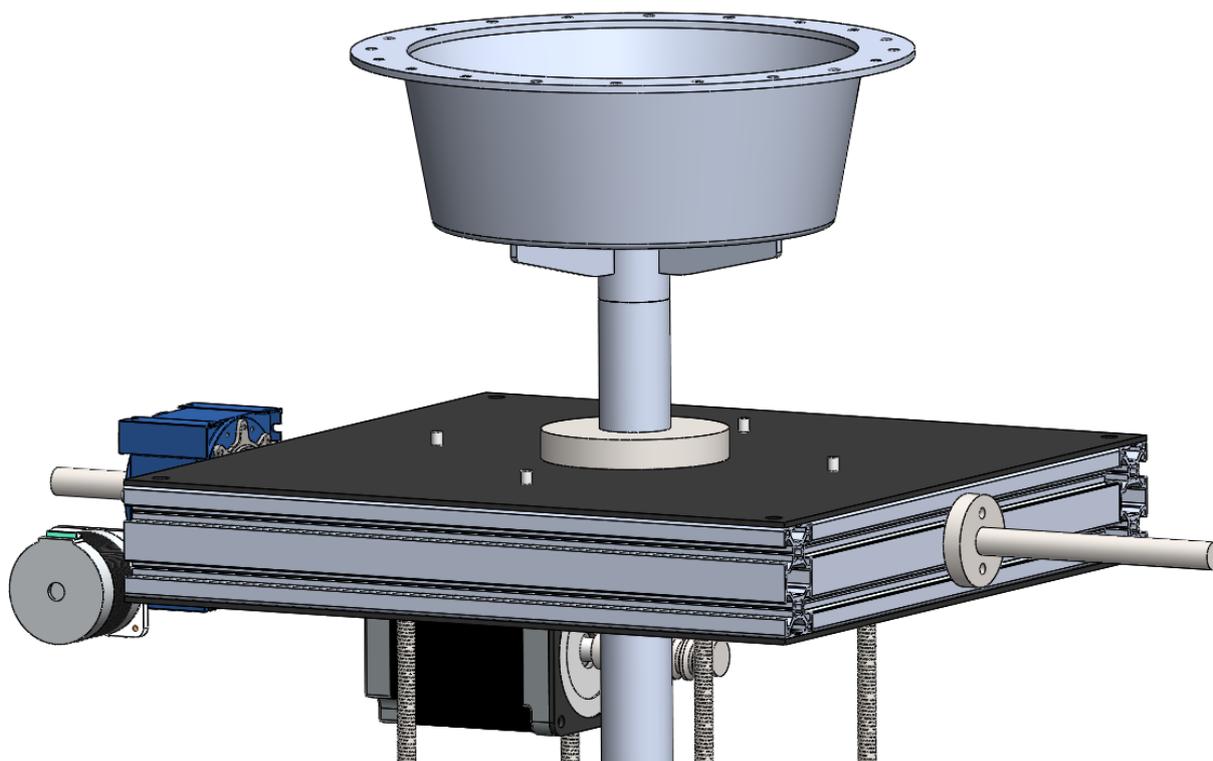


Figura 3.11 Montagem da panela na mesa.

A engrenagem helicoidal que é acoplada ao motor Φ é inserida no eixo central com os dentes para baixo. Em seguida, a tampa do reservatório já com o retentor e seu suporte fixados é inserida até uma altura que permita manusear o reservatório (Fig. 3.12). Lembre-se de inserir uma porca em cada barra roscada antes da tampa do reservatório caso sejam usadas duas porcas para fixá-lo.

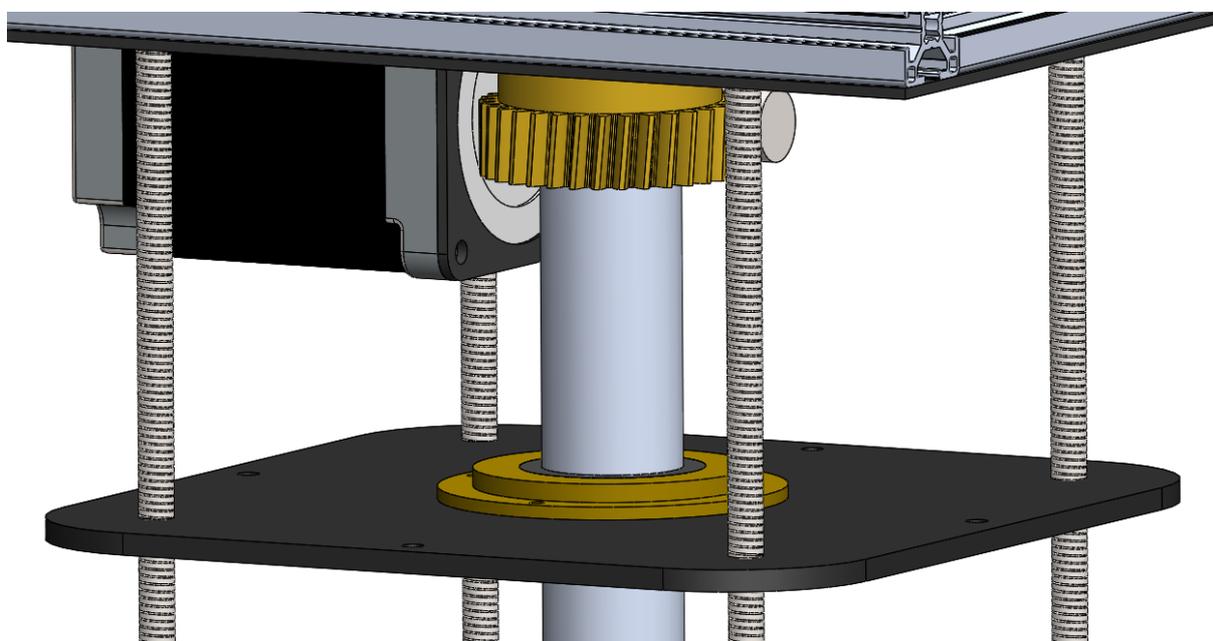


Figura 3.12 Montagem da tampa do reservatório e da engrenagem helicoidal.

O chuveiro é inserido pela parte superior da panela até que seu eixo saia pelo eixo central. O reservatório então é inserido junto com sua borracha de vedação e é fixado ao chuveiro por duas porcas, uma em cada face do seu fundo (Fig. 3.13).

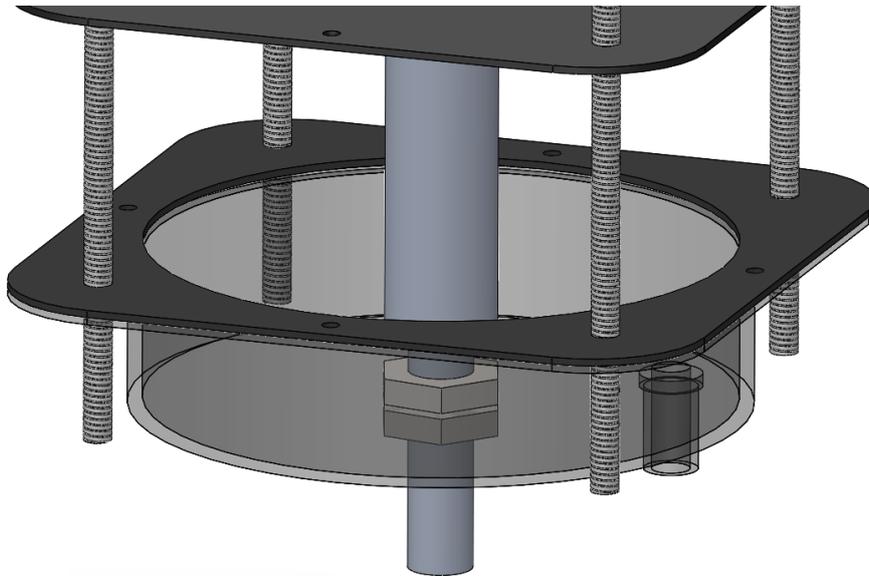


Figura 3.13 Montagem do reservatório e do chuveiro.

Por fim, a tampa do reservatório é abaixada até o reservatório e fixada pelas porcas nas barras roscadas pelas duas faces e por mais quatro parafusos. A tampa da panela com sua borracha de vedação é fixada na parte superior por vinte parafusos (Fig. 3.14). Caso a montagem não tenha sido feita com o sistema fixado à bancada, deve-se fixá-lo agora pelos mancais utilizando as porcas para os perfis.

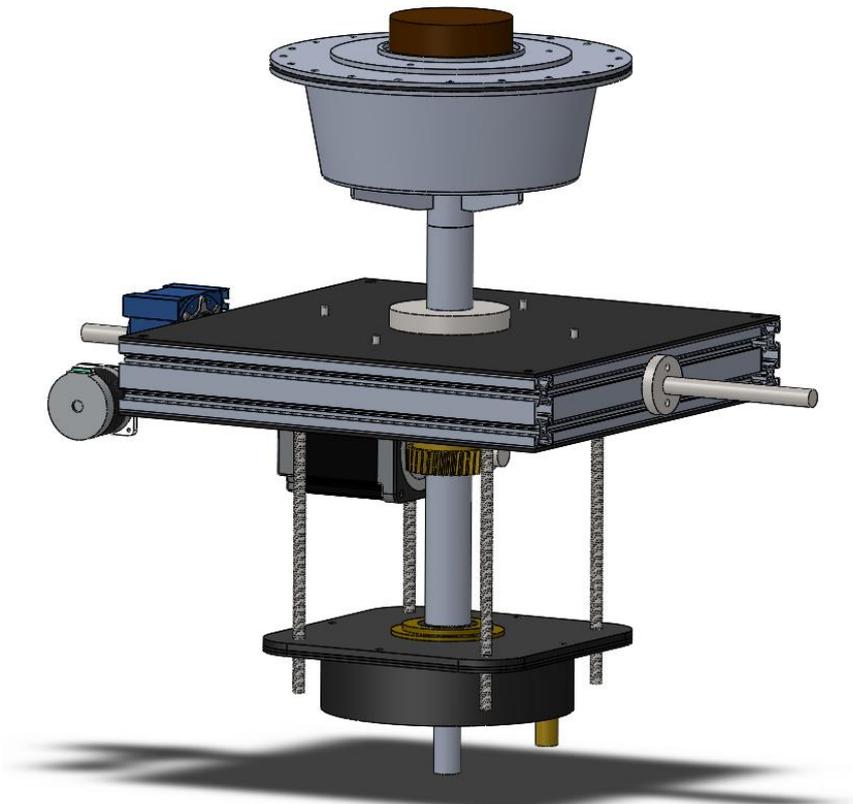


Figura 3.14 Sistema de movimentação da mesa e resfriamento da peça montado.

4. SISTEMA DE ARREFECIMENTO

4.1 DESCRIÇÃO

O resfriamento da área de contato da peça com a mesa foi feito utilizando o sistema hidráulico já existente de trabalhos anteriores. O sistema é basicamente constituído de tubulações de PVC por onde água flui a partir do acionamento de uma bomba. A água é bombeada em direção à panela por meio do chuveiro, cuja função é distribuir o fluido por uma área maior, com isso, a água fica em contato constante com a superfície da tampa da panela, resfriando assim a operação.

A água, aquecida pela troca de calor com a superfície da panela, desce para o reservatório pelo tubo da panela e segue em retorno à tubulação hidráulica para ser resfriada. Esse resfriamento é feito pela passagem por um trocador de calor, o qual está situado logo após a saída do reservatório. Depois de passar pelo trocador de calor, o fluido segue para um outro reservatório situado à uma dada altura da área de trabalho, com o intuito de manter certa pressão para auxiliar o escoamento e manter o sistema inundado. Desse reservatório, a água passa por um hidrômetro para leitura de vazão e então retorna à bomba para ser novamente empurrada em direção a panela.

Pelo circuito hidráulico, estão situados sensores de temperatura para o monitoramento e controle de temperatura da água. Além disso, existe uma válvula que pode ser utilizada caso se queira retirar a água do sistema.

O sistema de arrefecimento que estava implementado anteriormente continha problemas de vazamento em certos pontos críticos, já mencionados anteriormente, porém esses vazamentos foram devidamente concertados com a inserção de borrachas de vedação nesses locais. Por exemplo, o vazamento que ocorria entre o suporte do retentor e o mancal da mesa, o qual não existe mais na nova estrutura, foi solucionado inserindo uma seção de borracha entre o suporte do retentor e a tampa do reservatório.

Realizando alguns testes, notou-se a existência de um vazamento na bomba, e a solução encontrada foi a sua substituição por uma nova. Foram executados diversos testes para a verificação de vazamentos no sistema, testes tanto com a bomba ligada quanto desligada, e todos os menores vazamentos encontrados durante os mesmos foram solucionados, utilizando veda-roscas ou dando um melhor aperto na devida seção. Além disso, com o novo grau de liberdade implementado ao sistema, foi necessário a troca das mangueiras que conectavam o reservatório ligado a panela com o restante da tubulação. Pois a tubulação que existia no sistema era rígida, e não permitiam a movimentação do sistema no eixo X. No lugar dos tubos PVC nessa seção, foram inseridas mangueiras grandes e flexíveis, de maneira a permitir uma movimentação sem interferências e suave do sistema.

4.2 PERDAS DO SISTEMA HIDRÁULICO

Utilizando a equação de Bernoulli [22] entre as seções 1 e 2, observadas na figura 4.1 tem-se:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_c + \sum_{i=0}^n h_{f_i} + \sum_{i=0}^n h_{m_i} = \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right) + h_p \quad (16)$$

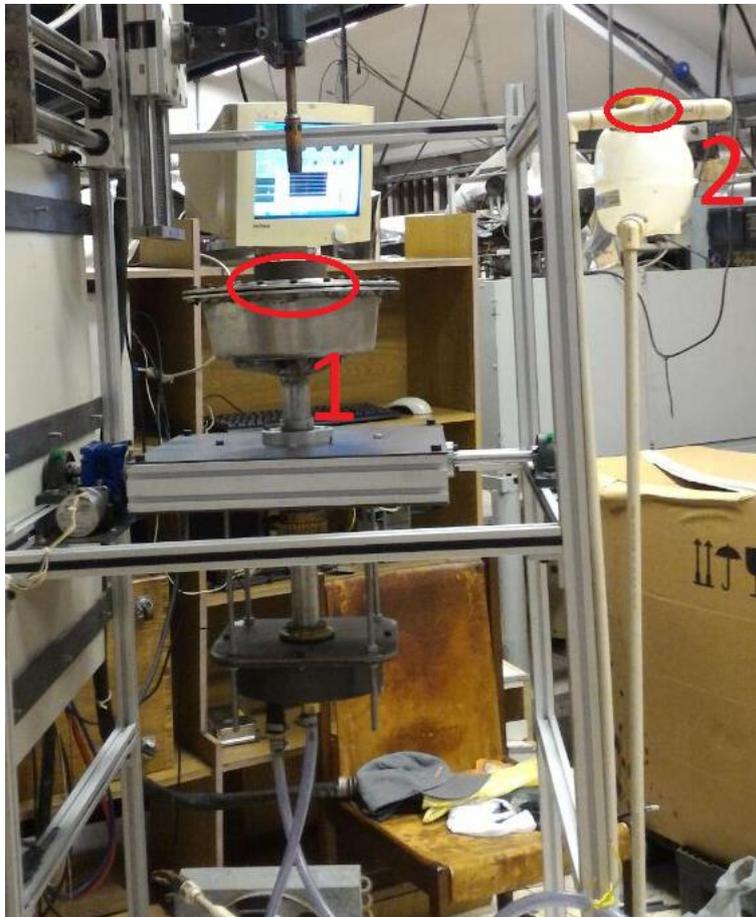


Figura 4.1 Parte superior da bancada

Onde p é a pressão na seção, g é a gravidade, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade do fluido, z é a altura da seção, h_c , h_f e h_m são referentes às perdas de carga do sistema, onde h_c é referente as perdas de carga por calor, h_f é relacionado a perda de carga pelo comprimento da tubulação, e h_m é relacionado às perdas de cargas equivalentes aos fatores restantes, como expansão ou contração súbita, válvulas, joelhos.

$$h_{f_1} = \frac{V^2 \cdot f \cdot l}{2 \cdot g \cdot d} \quad (17)$$

Onde l é o comprimento da tubulação. O valor do coeficiente de atrito f é obtido pela tabela de moody, utilizando o número de reynolds e a rugosidade da parede da tubulação.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu} \quad (18)$$

Onde d é o diâmetro do tubo, μ é a viscosidade do fluido e ε é a rugosidade absoluto do tubo.

Caso o escoamento seja laminar temos que o coeficiente de atrito pode ser calculado por [22]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (19)$$

$$h_{f_1} = \frac{V^2 \cdot \frac{0,00505}{V} \cdot 8,12}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,0127} = 0,1647 \cdot V$$

Para o trecho do chuveiro, tem-se [22]:

$$h_{f_2} = \frac{V^2 \cdot \frac{0,00505}{V} \cdot 0,425}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,019} = 0,0057 \cdot V$$

Para o trecho da panela, tem-se um trecho com perfil anelar, assim o cálculo para perda é determinado por [22]:

$$h_f = \frac{V^2 \cdot f \cdot l}{2 \cdot g \cdot D_h} \quad (20)$$

Onde D_h é o diâmetro hidráulico para um anel concêntrico, determinado por [22]:

$$D_h = \frac{4\pi \cdot (a^2 - d^2)}{2\pi \cdot (a + b)} = 2 \cdot (a - b) = 2 \cdot (0,016 - 0,011) = 0,01 \quad (21)$$

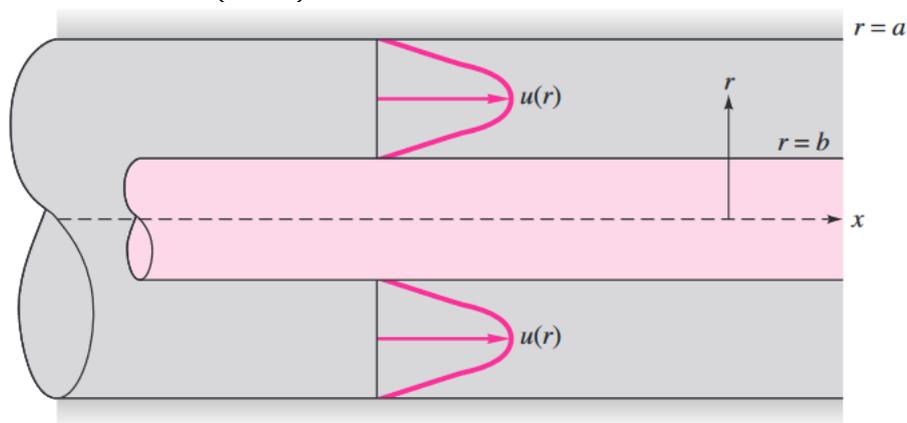


Figura 4.2 Fluxo em seção anelar [22].

O coeficiente de atrito para esse caso é determinado por [22]:

$$f = \frac{64 \cdot \zeta}{Re_{D_h}} \quad (22)$$

Onde o valor de ζ se equivale a um fator de correção do diâmetro hidráulico, e pode ser obtido pela Figura A.3.

$$h_{f_3} = \frac{V^2 \cdot \frac{0,01}{V} \cdot 0,380}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,01} = 0,019 \cdot V$$

$$\sum_{i=0}^n h_{f_i} = 0,019 \cdot V + 0,0057 \cdot V + 0,1647 \cdot V = 0,1894 \cdot V \quad (23)$$

Para o restante das perdas, utiliza-se um coeficiente de perda K para cada tipo de perda.

$$\sum_{i=0}^n h_{m_i} = \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \sum_{i=0}^n K_i \quad (24)$$

Os joelhos presentes no sistema são de 90° e 45° , com isso, tem-se pela Figura A.4:

$$\begin{aligned} K_{j_{90}} &= 2 \\ K_{j_{45}} &= 0,39 \\ K_j &= 2 \cdot 9 + 0,39 \cdot 3 = 55,17 \end{aligned}$$

Os têes presentes no sistema servem para auxiliar a medição de temperatura da água e as suas perdas resultantes podem ser obtidas pela figura A.4.

$$K_t = 0,9 \cdot 5 = 4,5$$

Tem-se expansões e contrações entre tubos pelo sistema, e o coeficiente de resistência para esses casos pode ser obtido por:

$$K_{SE} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad (25)$$

$$K_{SC} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \quad (26)$$

Onde d é o diâmetro do tubo antes da expansão e D é o diâmetro do tubo após a expansão.

$$K_{SE_1} = \left(1 - \frac{0,008^2}{0,0127^2}\right)^2 = 0,3639$$

$$K_{SC_1} = 0,42 \cdot \left(1 - \frac{0,008^2}{0,0127^2}\right) = 0,2533$$

$$K_{SE_2} = \left(1 - \frac{0,0127^2}{0,032^2}\right)^2 = 0,8429$$

$$K_{SE_3} = \left(1 - \frac{0,0127^2}{0,026^2}\right)^2 = 0,7614$$

$$K_{SE_4} = \left(1 - \frac{0,0127^2}{0,025^2}\right)^2 = 0,742$$

$$K_{SE} = 0,3639 + 0,8429 + 0,7614 + 0,742 = 2,71$$

Também existem as perdas relacionadas à entrada e saída do fluido entre seções, para essas perdas temos, pela figura A.5:

$$K_e = 0,5 \cdot 4 = 2$$

$$K_s = 1 \cdot 2 = 2$$

Com isso, pela Equação 24 tem-se:

$$\sum h_m = \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \sum K = \frac{V^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 66,63 = 3,396 \cdot V^2$$

Assim, pela Equação 16:

$$\begin{aligned} \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + h_c + \sum_{i=0}^n h_{f_i} + \sum_{i=0}^n h_{m_i} &= \left(\frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2\right) + h_p \\ p_2 - p_1 &= \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,19 \end{aligned} \quad (27)$$

$$z_2 - z_1 = 0,19 \text{ m}$$

$$Q = V \cdot A \quad (28)$$

$$A_1 \cdot V_1 = A \cdot V \quad (29)$$

$$V_1 = \frac{V \cdot A}{A_1} = V \cdot \frac{\pi \cdot \frac{0,0127^2}{4}}{\pi \cdot \frac{0,220^2}{4}} = 0,0033 \cdot V$$

$$V_2 = \frac{V \cdot A}{A_2} = V \cdot \frac{\pi \cdot \frac{0,0127^2}{4}}{\pi \cdot \frac{0,127^2}{4}} = 0,01 \cdot V$$

$$P = h_p \cdot \rho \cdot Q \cdot g \quad (30)$$

$$P = 24 \text{ W}$$

$$3,396 \cdot V^2 + 0,1894 \cdot V - 0,38 - \frac{19,31}{V} \cdot \eta + h_c = 0$$

η é a eficiência da bomba.

Feitos os testes no sistema hidráulico, obteve-se pela leitura do hidrômetro o seguinte valor de vazão:

$$Q = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Assim:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot \frac{0,0127^2}{4}} = 0,3947 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para esse valor de velocidade, calculou-se o número de Reynolds pela Equação 18:

$$Re = \frac{0,3947 \cdot 1000 \cdot 0,0127}{1,003 \cdot 10^{-3}} \approx 5000$$

Com isso, temos que o escoamento é turbulento, e pela tabela de moody, Figura A.2, $f = 0,04$, assim:

$$\sum_{i=0}^n h_{f_i} = \frac{V^2 \cdot f_i \cdot l_i}{2 \cdot g \cdot d_i} = 0,203 + 0,017 + 0,007 = 0,227 \text{ m}$$

$$\sum h_m = \frac{V^2}{2 \cdot g} \cdot \sum K = \frac{0,3947^2}{2 \cdot 9,81} \cdot 66,63 = 0,529 \text{ m}$$

$$h_{total} = 0,227 + 0,529 = 0,756 \text{ m}$$

4.3 LM35

Para realizar o controle do sistema de arrefecimento foram utilizados sensores LM35 para a medição das temperaturas desejadas. A escolha desses sensores se deve ao fato de serem fáceis tanto de se obter quanto de serem utilizados. Inicialmente, em trabalhos passados, eram utilizados LM35 com encapsulamento de metal (TO-46), pois podiam ser soldados e resistiam a temperaturas maiores, mas foram trocados, ainda em trabalhos passados, devido

a mal funcionamento, por sensores LM35 com encapsulamento de plástico (TO-92). Esses sensores são os utilizados na concepção atual pois atendem aos requisitos necessários do projeto e são de fácil utilização.

Um resumo das características dos sensores LM35:

- Linear $10 \frac{mV}{^{\circ}C}$
- $0,5^{\circ}C$ de acurácia a $25^{\circ}C$
- Alimentação de 4 ~ 30 V
- Para encapsulamento de plástico (TO-92), temperaturas de trabalho: ~ $40 \sim 110^{\circ}C$

Esses sensores estão distribuídos pelo sistema hidráulico de maneira a coletar as temperaturas necessárias para a realização do controle do sistema. Existe um sensor situado em baixo do reservatório inferior, o qual coleta a temperatura da água após a saída da panela, um sensor situado um pouco depois da passagem pelo trocador de calor, coletando a temperatura da água resfriada, e um sensor situado um pouco depois da bomba, coletando a temperatura da água sendo bombeada para a superfície da panela. Além de existir também um sensor para a medição da temperatura ambiente.

Os sensores utilizados foram todos devidamente calibrados no laboratório de calibração da universidade de Brasília. Esta calibração foi realizada no trabalho anterior, e com os resultados obtidos, foi possível obter as curvas de calibração para cada sensor, que são descritas pelas equações:

$$T_r = 1,02 \cdot T_m - 0,619 \quad (31)$$

$$T_r = 1,016 \cdot T_m - 1,588 \quad (32)$$

$$T_r = 0,989 \cdot T_m - 1,9 \quad (33)$$

$$T_r = 0,955 \cdot T_m - 0,416 \quad (34)$$

Onde T_r é a temperatura real e T_m é a temperatura medida pelo sensor.

A integração dos sensores ao sistema é feita pela placa de aquisição, o sensor possui 3 terminais, um de alimentação, que no caso é alimentado com 5V fornecidos pela placa, um terminal com o sinal analógico para a temperatura medida, o qual é conectado a uma entrada analógica da placa, e um terminal terra que é conectado ao terra analógico da placa.

Todos os sinais de temperatura enviados pelos sensores são lidos pelo software LabVIEW e são corrigidos de acordo com as equações de calibração obtidas, as quais são implementadas no programa. Com isso, as temperaturas são utilizadas nas funções de controle para acionar a ventoinha do trocador de calor, além de serem mostradas na tela para o usuário em tempo real.

O método de controle de temperatura do sistema é de ligar ou desligar a ventoinha do trocador de calor dependendo das temperaturas lidas pelos sensores. Para o acionamento digital do trocador de calor é necessário um circuito de condicionamento, pois esse opera com

uma tensão de 220V. O circuito de condicionamento que existia na bancada pode ser observado na Figura 4.2.

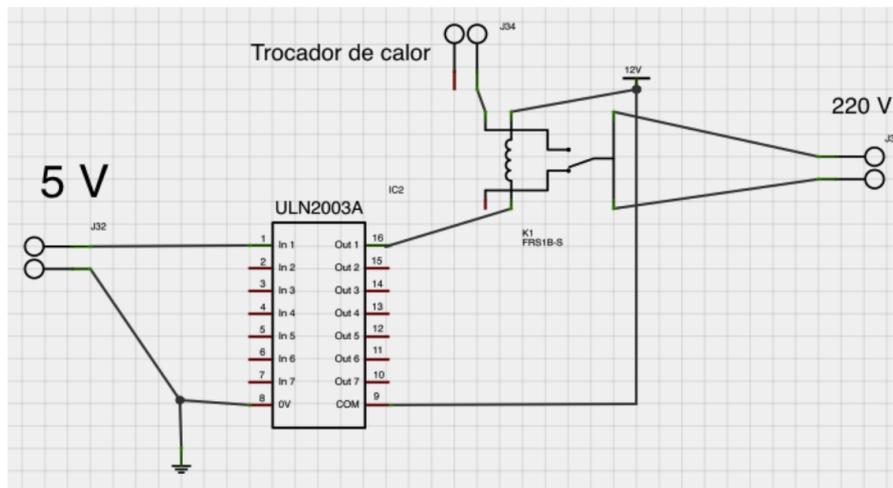


Figura 4.3 Circuito condicionador para acionamento do trocador de calor [14].

O circuito existente foi substituído, ao invés de se utilizar o CI ULN2003A foi utilizado um relé 5V/220V juntamente a um diodo para devida proteção da bobina.

A instalação física dos sensores foi feita de maneira semelhante a do trabalho anterior, os sensores são fixados aos dispositivos imersos no fluido de refrigeração com o auxílio de massa epóxi, assim conforme a Figura 4.3.



Figura 4.4 LM35 instalado na posição com uma cobertura de epóxi [14].

5. SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

5.1 DESCRIÇÃO

O sistema de movimentação possui dois sistemas independentes, o sistema que movimenta a tocha e o sistema que movimenta a mesa.

A movimentação da tocha (Fig. 5.1) é feita por dois motores que a movimentam pelos fusos de esferas, onde o primeiro fuso de esferas movimenta a tocha horizontalmente pelo eixo Y e está fixado na bancada, o segundo fuso de esferas movimenta a tocha verticalmente pelo eixo Z e está fixado na mesa móvel do primeiro fuso de esferas e a tocha é fixada na mesa móvel do segundo fuso de esferas.

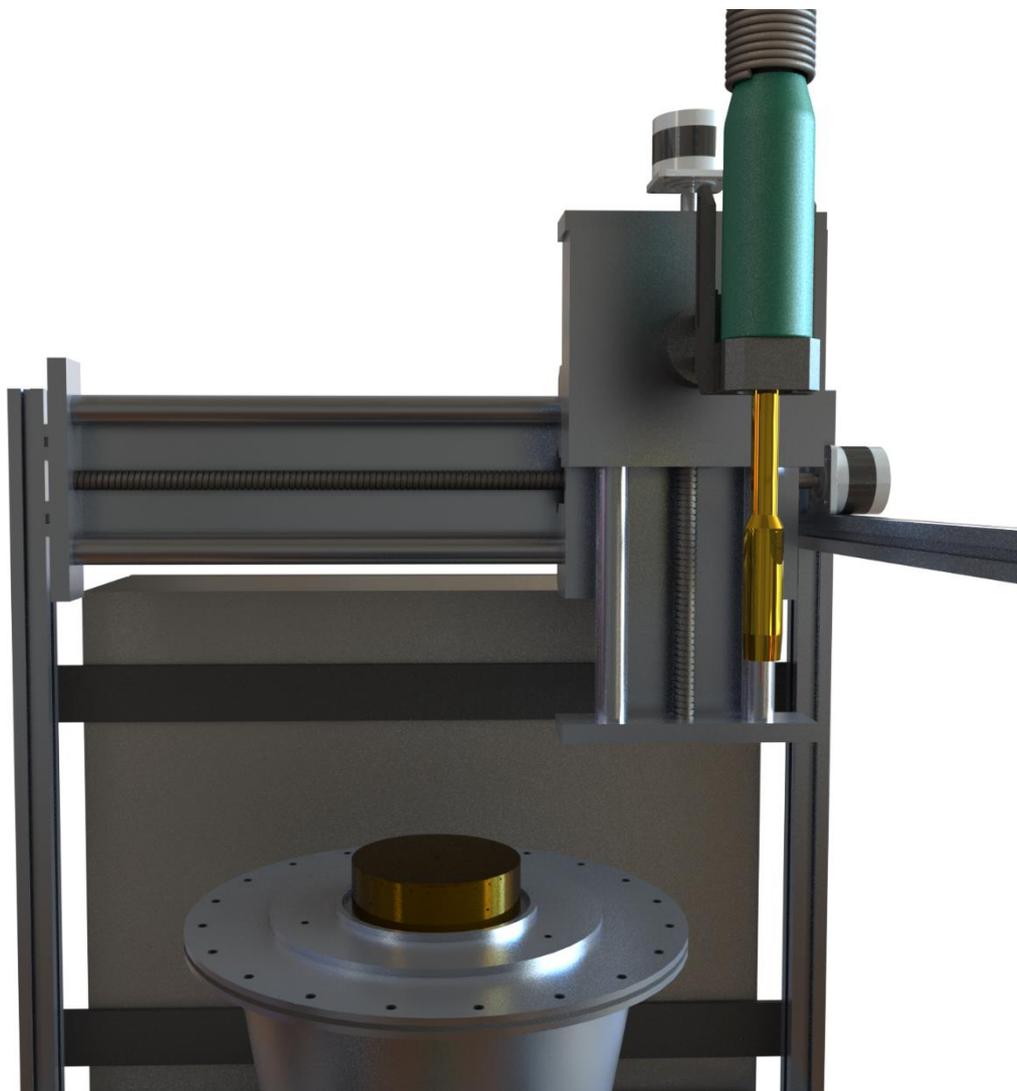


Figura 5.1 Sistema de movimentação da tocha.

A movimentação da mesa (Fig. 5.2) é feita por dois motores que a movimentam por redutores, onde o motor fixado ao redutor do eixo da mesa gira a mesa no eixo X e o motor fixado ao redutor do eixo central gira a mesa no eixo Z.

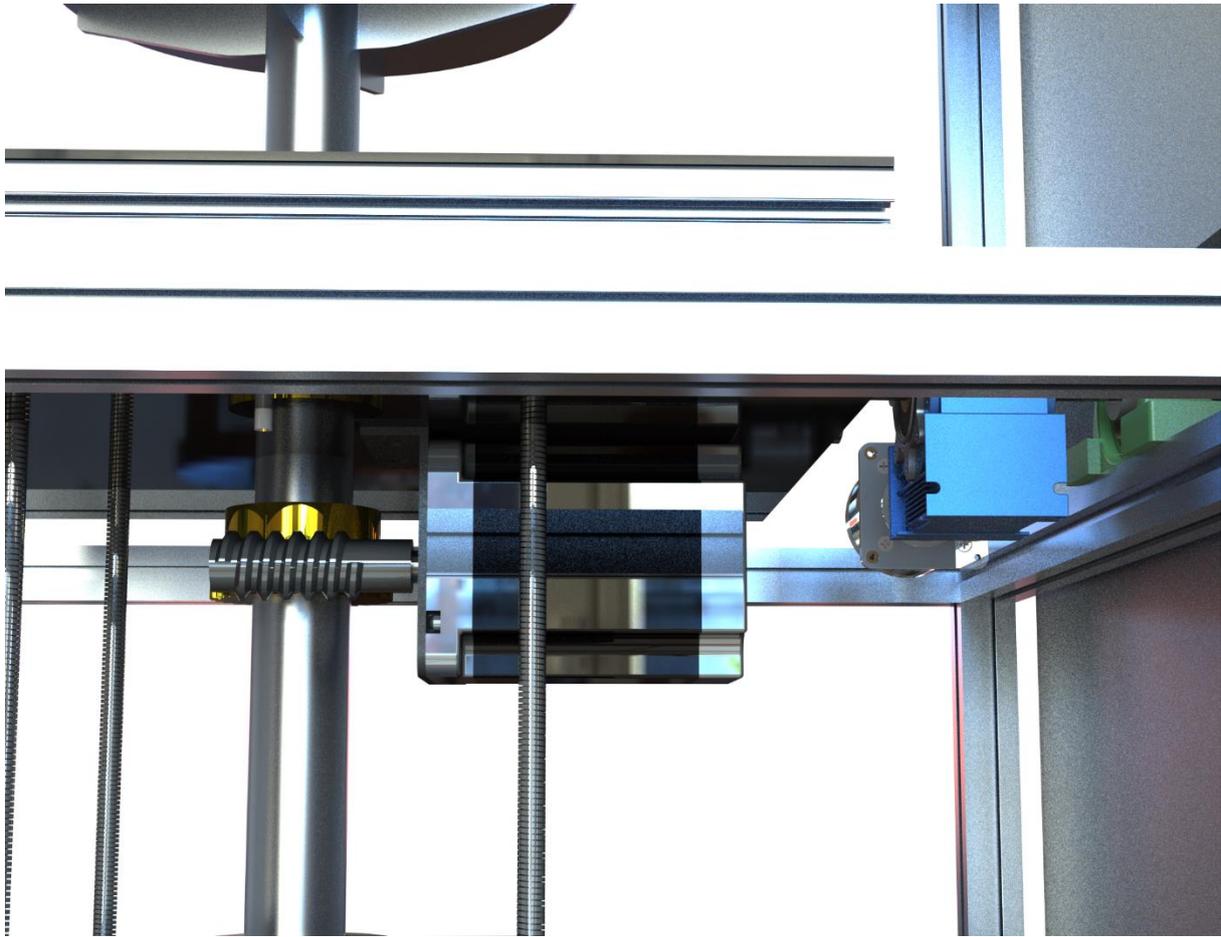


Figura 5.2 Sistema de movimentação da mesa.

5.2 CINEMÁTICA

Para sincronizar a movimentação dos dois sistemas e fazer o ponto na ponta da tocha P_T acompanhar o ponto da peça na mesa onde ocorre a deposição de material P_P , utilizou-se um ponto de referência P_R no centro da mesa de madeira inferior e sucessivas transformações de coordenadas por dois caminhos, sendo um do ponto P_R até o ponto P_T e o outro do ponto P_R até o ponto P_P . A Figura 5.3 mostra os pontos $P_{R,P,T}$ e suas coordenadas associadas. Com as duas transformações, igualam-se os pontos P_T e P_P para obter uma expressão que relaciona as variáveis dos dois sistemas mantendo a sincronia.

Ponto de referência P_R :

$$P_R = \begin{bmatrix} X_{R0} \\ Y_{R0} \\ Z_{R0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Pontos da tocha P_T e da peça P_P :

$$P_T = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad P_P = \begin{bmatrix} X \\ R \\ H \\ 1 \end{bmatrix}$$

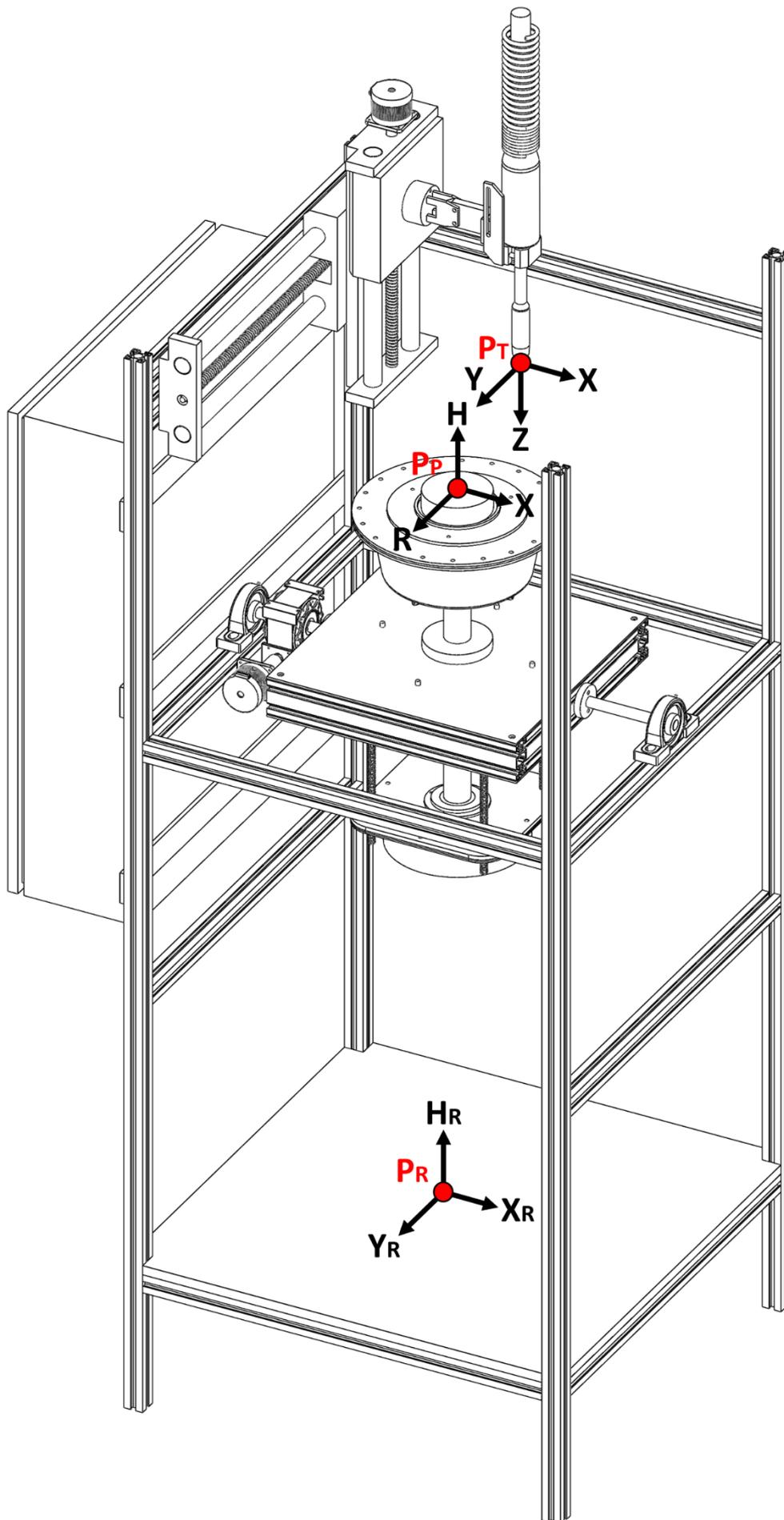


Figura 5.3 Sistemas de coordenadas da bancada.

Transformações da mesa:

- $T_{M_0}^1$ - PR ao centro dos eixos e das escovas (deslocamento Z)

$$T_{M_0}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $T_{M_1}^2$ - Rotação do sistema na coordenada θ . (rotação em X)

$$T_{M_1}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $T_{M_2}^3$ - Centro dos eixos e escovas até o ponto da peça P_P (deslocamento Y, Z)

$$T_{M_2}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & h + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- M - Transformação equivalente da mesa

$$M = T_{M_0}^1 \cdot T_{M_1}^2 \cdot T_{M_2}^3$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 & h + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \cdot r - \sin \theta \cdot (h + d_2) \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \cdot r + \cos \theta \cdot (h + d_2) + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformações da tocha:

- $T_{T_0}^1$ - PR ao centro do carro do fuso Y (deslocamento X, Y, Z)

$$T_{T_0}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & y - d_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $T_{T_1}^2$ - Centro do carro do fuso Y ao centro do carro do fuso Z (deslocamento X, Z)

$$T_{T_1}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -z + d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- $T_{T_2}^3$ - Centro do carro do fuso Z à ponta da tocha P_T (deslocamento X, Z)

$$T_{T_2}^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_8 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- T – Transformação equivalente da tocha

$$T = T_{T_0}^1 \cdot T_{T_1}^2 \cdot T_{T_2}^3$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_3 \\ 0 & 1 & 0 & y - d_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_6 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -z + d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_8 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_3 + d_6 + d_8 \\ 0 & 1 & 0 & y - d_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 + d_7 - d_9 - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ponto da peça P_P em relação ao ponto da referencia P_R :

$$P_P = M \cdot R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & \cos \theta \cdot r - \sin \theta \cdot (h + d_2) \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \cdot r + \cos \theta \cdot (h + d_2) + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$P_P = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \cdot r - \sin \theta \cdot (h + d_2) \\ \sin \theta \cdot r + \cos \theta \cdot (h + d_2) + d_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ponto da tocha P_T em relação ao ponto da referencia P_R :

$$P_T = T \cdot R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d_3 + d_6 + d_8 \\ 0 & 1 & 0 & y - d_4 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 + d_7 - d_9 - z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$P_T = \begin{bmatrix} -d_3 + d_6 + d_8 \\ y - d_4 \\ d_5 + d_7 - d_9 - z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Igualando os pontos:

$$P_P = P_T$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \cos \theta \cdot r - \sin \theta \cdot (h + d_2) \\ \sin \theta \cdot r + \cos \theta \cdot (h + d_2) + d_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_3 + d_6 + d_8 \\ y - d_4 \\ d_5 + d_7 - d_9 - z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_3 + d_6 + d_8 \\ \cos \theta \cdot r - \sin \theta \cdot (h + d_2) + d_4 \\ -\sin \theta \cdot r - \cos \theta \cdot (h + d_2) - d_1 + d_5 + d_7 - d_9 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (35)$$

A Figura 5.4 mostra onde estão as distâncias d_i e seus valores. A distância d_8 depende do posicionamento da tocha, dessa forma, o suporte da tocha deve ter um comprimento que satisfaça:

$$d_8 = d_3 - d_6 = 250,5 - 73 = 177,5 \text{ mm}$$

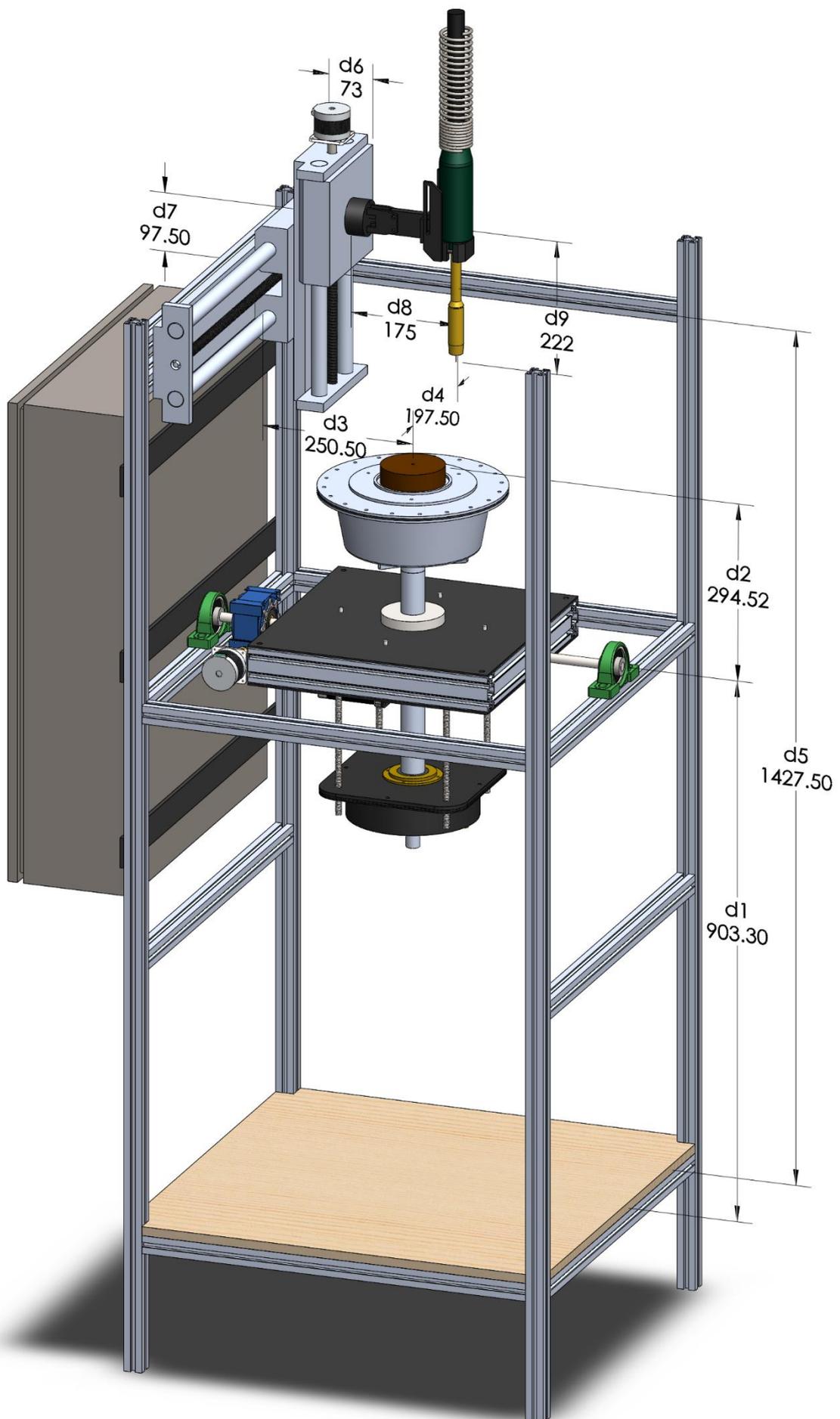


Figura 5.4 Distâncias d_i do sistema de movimentação.

As variáveis do sistema de movimentação são:

- y: Coordenada Y do sistema de movimentação da tocha
- z: Coordenada Z do sistema de movimentação da tocha
- r: Raio da camada atual da peça
- h: Altura da camada atual da peça
- θ : Coordenada θ do sistema de movimentação da mesa
- $\theta_i = \tan^{-1} \frac{r_i - r_{i-1}}{h_i - h_{i-1}}$
- $\theta_0 = 0$
- d_i : Distâncias entre pontos do sistema

Pela Equação 35, a posição zero (Y_0, Z_0), isto é, para r, h e θ iguais a 0 é:

$$Y_0 = d_4 = 197.5 \text{ mm} \quad (36)$$

$$Z_0 = -d_1 - d_2 + d_5 + d_7 - d_9 = 105.18 \text{ mm} \quad (37)$$

5.3 ESPECIFICAÇÃO DA PEÇA

O tamanho máximo da peça será definido pela limitação do tamanho dos fusos. Foi escolhida uma geometria de mesma altura e diâmetro para a peça a fim de manter uma simetria, isto é:

$$h_{max} = 2 \cdot r_{max}$$

Pela Equação 35, as variáveis que definem os deslocamentos ΔY e ΔZ , que são as distâncias do ponto da peça (Y_i, Z_i) ao zero da mesa (Y_0, Z_0), são a altura h, raio r e o ângulo θ da mesa. Portanto, os deslocamentos ΔY_+ e ΔZ_+ , para θ positivo e ΔY_- e ΔZ_- , para θ negativo, são:

$$\Delta Y_+ = Y_{max+} - Y_0 = \cos \theta \cdot r_{max} - \sin \theta \cdot (h_{max} + d_2)$$

$$\Delta Y_- = Y_{max-} - Y_0 = \cos(-\theta) \cdot r_{max} - \sin(-\theta) \cdot (h_{max} + d_2)$$

$$\Delta Z_+ = Z_{max+} - Z_0 = -\sin \theta \cdot r_{max} - \cos \theta \cdot (h_{max} + d_2) + d_2$$

$$\Delta Z_- = Z_{max-} - Z_0 = -\sin(-\theta) \cdot r_{max} - \cos(-\theta) \cdot (h_{max} + d_2) + d_2$$

O fuso Y tem deslocamento ΔY_{max} em relação ao ponto Y_0 limitado em ± 195 mm. O fuso Z tem deslocamento ΔZ_{max} em relação ao ponto Z_0 limitado em -100 a 85 mm. A Tabela 5.1 mostra os tamanhos máximos da peça para diferentes valores dessas variáveis. Em vermelho estão os deslocamentos que estão fora dos limites dos fusos e em verde os deslocamentos dentro dos limites.

Tabela 5.1. Deslocamentos em Y e Z para tamanhos máximos da peça e angulação.

Altura (mm)	Raio (mm)	Ângulo (°)	$\Delta Y+$ (mm)	$\Delta Y-$ (mm)	$\Delta Z+$ (mm)	$\Delta Z-$ (mm)
10	5	20	-99.5	108.9	6.7	10.1
		30	-147.9	156.6	28.3	33.3
		45	-211.8	218.9	75.7	82.7
20	10	20	-98.2	117.0	-4.5	2.4
		30	-148.6	165.9	17.1	27.1
30	15	20	-96.9	125.1	-15.6	-5.3
		30	-149.3	175.3	6.0	21.0
40	20	20	-95.6	133.2	-26.7	-13.0
		30	-149.9	184.6	-5.2	14.8
50	25	20	-94.3	141.3	-37.8	-20.7
		30	-150.6	193.9	-16.3	8.7
60	30	20	-93.1	149.4	-48.9	-28.4
		30	-151.3	203.2	-27.5	2.5
70	35	20	-91.8	157.6	-60.0	-36.0
80	40	20	-90.5	165.7	-71.1	-43.7
90	45	20	-89.2	173.8	-82.2	-51.4
100	50	20	-87.9	181.9	-93.3	-59.1
110	55	20	-86.7	190.0	-104.4	-66.8
100	60	20	-78.6	191.3	-96.7	-55.7
100	65	20	-73.9	196.0	-98.4	-54.0

Pela tabela, com um ângulo θ_{\max} de 45° a peça teria que ser menor que 10 mm. Portanto, esse valor é removido para as próximas linhas, mantendo os ângulos θ_{\max} de 20° e 30°. A limitação para θ_{\max} em 30° é de 50 mm e para θ_{\max} em 20° é de 100 mm.

Escolheu-se trabalhar com a peça de 100 mm de altura h_{\max} , 50 mm de raio r_{\max} e ângulo θ_{\max} de 20°, ou seja, a discretização do perfil da peça por camadas não pode possuir dois pontos que ultrapassem 20°. As últimas duas linhas da Tabela 5.1 mostram que é possível estender o raio r_{\max} a 60 mm mantendo h_{\max} e θ_{\max} . Dessa forma, a peça fabricada estará contida no cilindro da Figura 5.5.

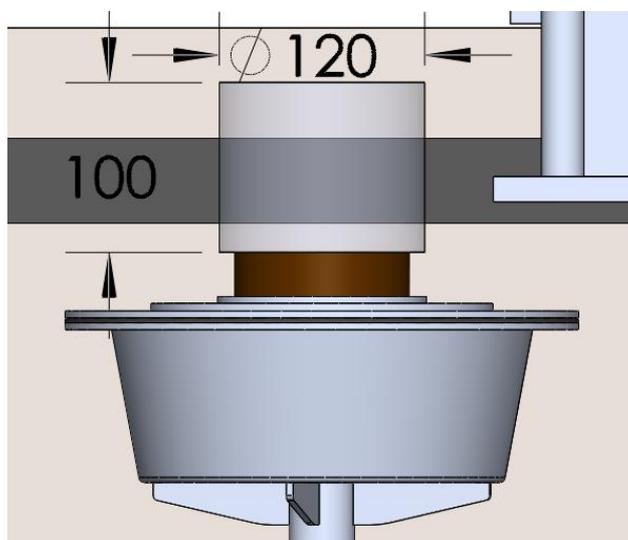


Figura 5.5 Volume que contém a peça para h_{\max} , r_{\max} e θ_{\max} .

Como a peça é feita pela revolução da área no eixo Z, a área de trabalho da tocha é a área de um retângulo de altura h_{\max} e base r_{\max} rotacionado em torno do eixo X em $\pm\theta_{\max}$. A Figura 5.6 mostra essa área em verde para os valores escolhidos.

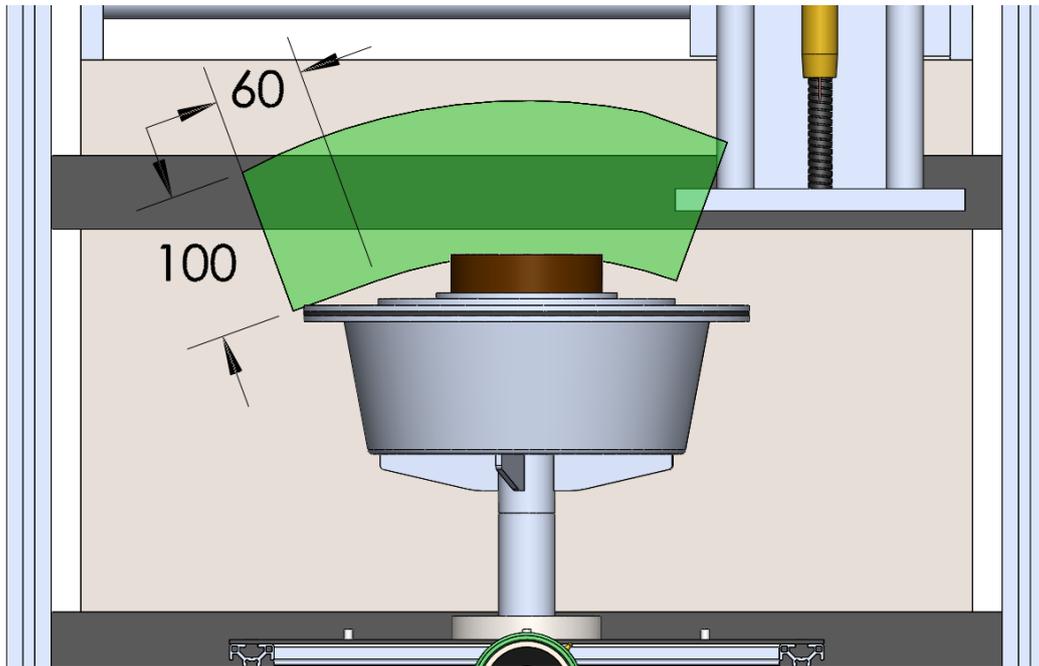


Figura 5.6 Área de trabalho da tocha para h_{\max} , r_{\max} e θ_{\max} .

5.4 SELEÇÃO DOS MOTORES

5.4.1 Motor do Fuso Y

O motor do fuso Y deve ser capaz de acelerar a tocha e o fuso Z para o pior caso, onde a aceleração de Y é máxima. A aceleração máxima foi calculada considerando uma camada com raio r de 10 mm, que é o menor raio possível e que resulta na maior velocidade de translação da tocha. Para uma velocidade de deposição v de 5 mm/s, o tempo da volta T é:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot 10}{5} = 4\pi \text{ s} \quad (38)$$

Considerando a altura de cada camada de 5 mm, o ângulo θ limitado em 20° e a altura h máxima da peça de 100 mm, o maior deslocamento ΔY em uma camada será de um ponto Y_i com a mesa em -20° para um ponto Y_{i+1} com a mesa em 20° e na altura máxima da peça. Pela Equação 35, ΔY é:

$$\Delta Y = Y_{i+1} - Y_i = -\sin(\theta_{i+1}) \cdot (h_{i+1} + d_2) + \sin(\theta_i) \cdot (h_i + d_2)$$

$$\Delta Y = -\sin(20) \cdot (100 + 294.52) + \sin(-20) \cdot (95 + 294.52) = -268.16 \text{ mm}$$

Para o passo p do fuso de 5 mm, a velocidade do motor $\dot{\theta}_y$ é:

$$\dot{\theta}_y = \frac{|\Delta Y| \cdot 2\pi}{p \cdot T} = \frac{268.16 \cdot 2\pi}{5 \cdot 4\pi} = 26.82 \text{ rad/s}$$

O motor deve alcançar essa velocidade no tempo da curva de aceleração. A curva utilizada é trapezoidal com 5% do tempo da volta para aceleração e 95% para movimentação, então a aceleração do motor $\ddot{\theta}_y$ é:

$$\ddot{\theta}_y = \frac{\dot{\theta}_y}{0.05 \cdot T} = \frac{26.82}{0.05 \cdot 4\pi} = 42.69 \text{ rad/s}^2$$

Dessa forma, o torque total T_T necessário para esse motor é:

$$T_T = T_{estático} + T_{dinâmico}$$

$$T_e = \frac{m \cdot g \cdot \mu \cdot p}{2\pi \cdot \eta} = \frac{15 \cdot 9.78 \cdot 0.1 \cdot 0.005}{2\pi \cdot 0.8} = 0.015 \text{ Nm}$$

$$T_d = J_{eq} \cdot \ddot{\theta}_y = \left(J_{fusoY} + m \cdot \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_y = \left(3 \cdot 10^{-5} + 15 \cdot \left(\frac{0.005}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot 42.69 = 0.002 \text{ Nm}$$

$$T_{Ty} = T_e + T_d = 0.015 + 0.002 = 0.017 \text{ Nm}$$

Onde:

- m: Massa deslocada
- g: Aceleração da gravidade em Brasília
- μ : Coeficiente de atrito do fuso
- p: Passo do fuso
- η : Eficiência do fuso
- J_{eq} : Momento de inércia equivalente

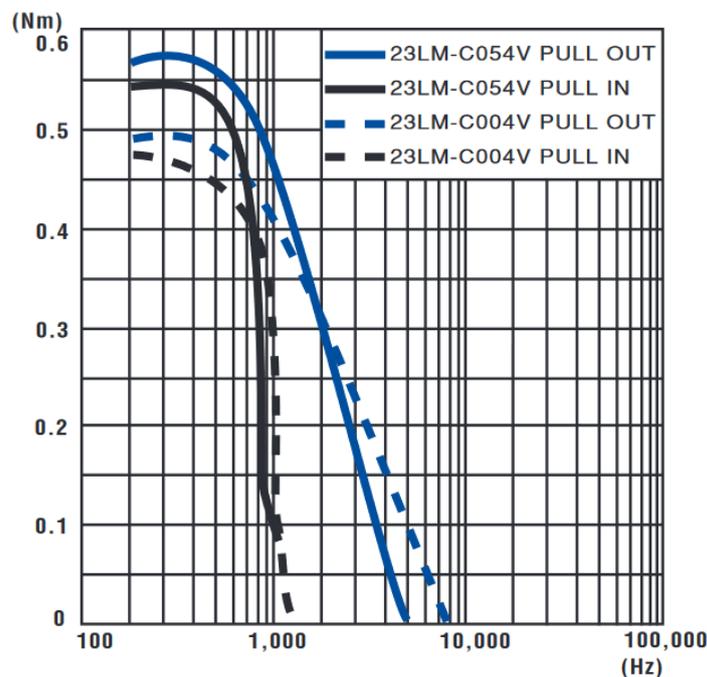


Figura 5.7 Curva de torque para motores Minibea 23LM-C004.

Para os fusos Y e Z, a fixação do motor é para o padrão NEMA 23. A seleção do motor do fuso Y foi feita buscando no catálogo da fabricante Minibea motores NEMA 23 que, em sua curva de torque, fornecem 0.017 Nm na velocidade 26.82 rad/s (854 pulsos/s). O motor

escolhido foi o 23LM-C004-04 de 20 W que estava disponível no GRACO, que fornece em torno de 0.35 Nm na velocidade 854 pulsos/s conforme sua curva de torque pull in na Fig. 5.7 em tracejado. A curva pull in é utilizada nesse caso porque é a curva para partida e parada do motor, enquanto que a curva pull out é utilizada para pequenas acelerações após a partida.

5.4.2 Motor do Fuso Z

O motor do fuso Z deve ser capaz de acelerar a tocha contra a gravidade para o pior caso, onde a aceleração de Z é máxima. Essa aceleração foi calculada da mesma forma que o fuso Y, com o tempo da volta da Equação 38. O maior deslocamento ΔZ em uma camada será de um ponto Z_i com a mesa em -20° para um ponto Z_{i+1} com a mesa em 20° , passando no meio do tempo da volta pelo ponto Z_{i+1} com a mesa em 0° . Pela Equação 35, ΔZ será:

$$\Delta Z = Z_{i+1} - Z_i = -(h_{i+1} + d_2) + \sin(\theta_i) \cdot r + \cos(\theta_i) \cdot (h_i + d_2)$$

$$\Delta Z = -(100 + 294.52) + \sin(-20) \cdot 10 + \cos(-20) \cdot (95 + 294.52) = -31.91 \text{ mm}$$

Resultando na velocidade do motor:

$$\dot{\theta}_z = \frac{|\Delta Z| \cdot 2\pi}{p \cdot T_{1/2}} = \frac{31.91 \cdot 2\pi}{5 \cdot 2\pi} = 6.38 \text{ rad/s}$$

O motor deve alcançar essa velocidade no tempo da curva de aceleração:

$$\ddot{\theta}_z = \frac{\dot{\theta}_z}{0.05 \cdot T_{1/2}} = \frac{6.38}{0.05 \cdot 4\pi} = 10.15 \text{ rad/s}^2$$

Dessa forma, o torque total T_T necessário para esse motor é:

$$T_T = T_{estático} + T_{dinâmico}$$

$$T_e = \frac{m \cdot g \cdot p}{2\pi \cdot \eta} = \frac{10 \cdot 9.78 \cdot 0.005}{2\pi \cdot 0.8} = 0.1 \text{ Nm}$$

$$T_d = J_{eq} \cdot \ddot{\theta}_z = \left(J_{fusoZ} + m \cdot \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot \ddot{\theta}_z = \left(2 \cdot 10^{-5} + 10 \cdot \left(\frac{0.005}{2\pi} \right)^2 \right) \cdot 10.15 = 0.0003 \text{ Nm}$$

$$T_{TZ} = T_e + T_d = 0.1 + 0.0003 = 0.1 \text{ Nm}$$

A seleção do motor do fuso Z também foi feita no catálogo da fabricante Minibea, buscando um motor NEMA 23 que forneça 0.1 Nm na velocidade 6.38 rad/s (203 pulsos/s). O motor escolhido foi o 23PM-C406 de 40 W que estava disponível no GRACO. Esse produto foi descontinuado e não foi encontrado a sua curva de torque, mas há o motor 23KM-C740V, que possui características semelhantes de comprimento, corrente e resistência no catálogo. Em sua curva de torque pull in (Fig. 5.8), o torque para a velocidade de 203 pulsos/s é de 1.1 Nm.

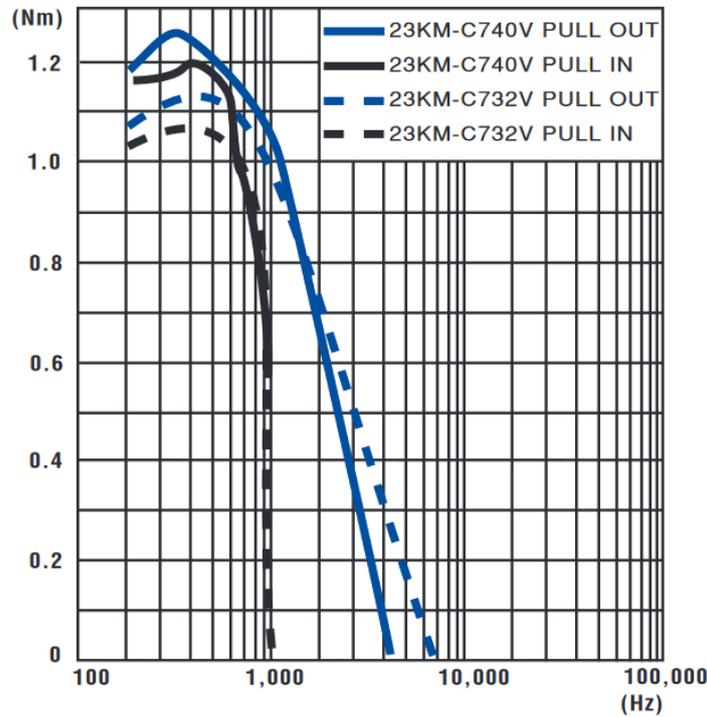


Figura 5.8 Curva de torque para motores Minibea 23KM-C740V (23LM-C006).

5.4.3 Motor do Ângulo θ

O motor do ângulo θ deve ser capaz de acelerar a mesa na maior aceleração utilizada e vencer o torque de desbalanceamento no pior caso, que é para a mesa na posição horizontal com $\theta = 90^\circ$. A aceleração máxima foi calculada da mesma forma que os fusos, com o tempo da volta da Equação 38. O maior deslocamento $\Delta\theta$ em uma camada será de um ponto θ_i com a mesa em -20° para um ponto θ_{i+1} com a mesa em 20° , resultando na velocidade do motor:

$$\dot{\theta}_\theta = \frac{\Delta\theta \cdot 2\pi \cdot k_\theta}{T \cdot 360} = \frac{40 \cdot 2\pi \cdot 30}{4\pi \cdot 360} = 1.67 \text{ rad/s}$$

O motor deve alcançar essa velocidade no tempo da curva de aceleração:

$$\ddot{\theta}_\theta = \frac{\dot{\theta}_\theta}{0.05 \cdot T} = \frac{1.67}{0.05 \cdot 4\pi} = 2.66 \text{ rad/s}^2$$

Dessa forma, o torque total T_T necessário para esse motor é:

$$T_T = \frac{(T_{estático} + T_{dinâmico})}{\eta \cdot k_\theta}$$

$$T_{estático} = m \cdot g \cdot r_{cm} = 45 \cdot 9.78 \cdot 0.016 = 7.04 \text{ Nm}$$

$$T_{dinâmico} = J_{eq} \cdot \ddot{\theta}_\theta = 1.619 \cdot 2.66 = 4.31 \text{ Nm}$$

$$T_{T\theta} = \frac{(T_{estático} + T_{dinâmico})}{\eta \cdot k_\theta} = \frac{7.04 + 4.31}{0.8 \cdot 30} = 0.47 \text{ Nm}$$

A massa m , a distância do centro de massa ao eixo r_{cm} e o momento de inércia J_{eq} foram obtidos pelo modelo do sistema no SOLIDWORKDS utilizando a ferramenta Mass Properties.

No cálculo do torque dinâmico, há o torque giroscópico causado pelas rotações θ e Φ , mas devido às baixas velocidade angulares $\dot{\theta}$ e $\dot{\Phi}$, o cálculo desse torque não foi realizado, pois é esperado um valor relativamente baixo.

A seleção do motor do ângulo θ também foi feita no catálogo da fabricante Minibea, buscando um motor NEMA 23 que forneça 0.47 Nm na velocidade 1.67 rad/s (53 pulsos/s). O motor escolhido foi o 23PM-C004-04 de 20 W que estava disponível no GRACO. Em sua curva de torque (Fig. 5.9), o torque pull in para a velocidade de 53 pulsos/s é de 0.55 Nm.

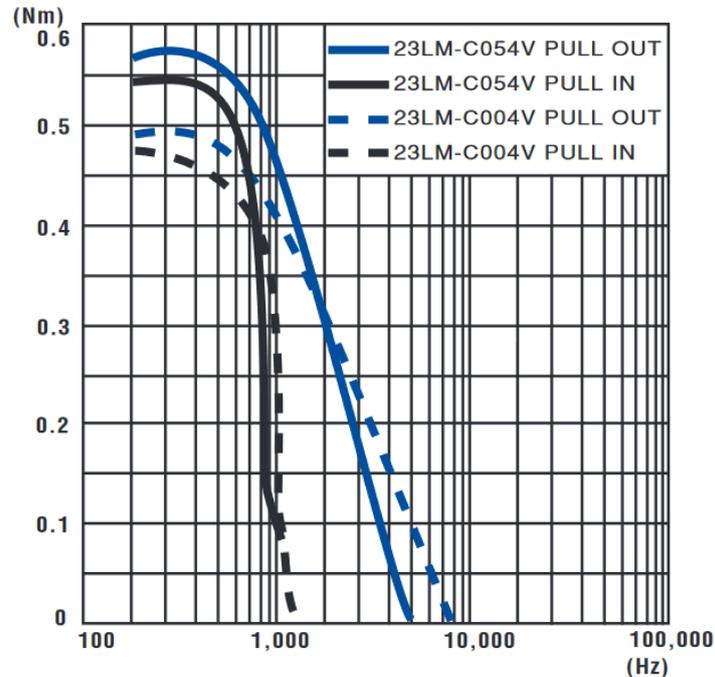


Figura 5.9 Curva de torque para motores Minibea 23LM-C004 (repetida).

5.4.4 Motor do Ângulo Φ

O motor do ângulo Φ deve ser capaz de acelerar a mesa na maior aceleração utilizada e vencer o torque de resistência do retentor. A aceleração máxima foi calculada diretamente pelo tempo da volta da Equação 38.

$$\dot{\theta}_{\Phi} = \frac{2\pi \cdot k_{\Phi}}{T} = \frac{2\pi \cdot 33}{4\pi} = 16.5 \text{ rad/s}$$

O motor deve alcançar essa velocidade no tempo da curva de aceleração:

$$\ddot{\theta}_{\Phi} = \frac{\dot{\theta}_{\theta}}{0.05 \cdot T} = \frac{16.5}{0.05 \cdot 4\pi} = 26.26 \text{ rad/s}^2$$

Dessa forma, o torque total T_{τ} necessário para esse motor é:

$$T_{\tau} = \frac{(T_{estático} + T_{dinâmico})}{\eta \cdot k_{\theta}}$$

$$T_{estático} = m \cdot g \cdot r_{massa} = 0.75 \cdot 9.78 \cdot 0.14 = 1.03 \text{ Nm}$$

$$T_{dinâmico} = J_{eq} \cdot \ddot{\theta}_{\Phi} = 0.05 \cdot 26.26 = 1.31 \text{ Nm}$$

$$T_{T\theta} = \frac{(T_{estático} + T_{dinâmico})}{\eta \cdot k_{\theta}} = \frac{1.03 + 1.13}{0.8 \cdot 33} = 0.08 \text{ Nm}$$

O $T_{\text{estático}}$ foi calculado inclinando o sistema horizontalmente e pendurando blocos padrão de massa em um furo da panela perpendicular à força gravitacional. A massa foi gradativamente aumentada até que o sistema saísse do repouso. A distância r_{massa} é de 140 mm e a massa m encontrada 750 g. O momento de inércia J_{eq} foi obtido pelo modelo do sistema no SOLIDWORKDS utilizando a ferramenta Mass Properties.

O motor utilizado para o ângulo Φ no trabalho anterior é o Berger Lahr VDRM 3910 de 230 W. Em sua curva de torque pull in (Fig. 5.10), o torque para a velocidade de 2.6 Hz é de 3.5 Nm.

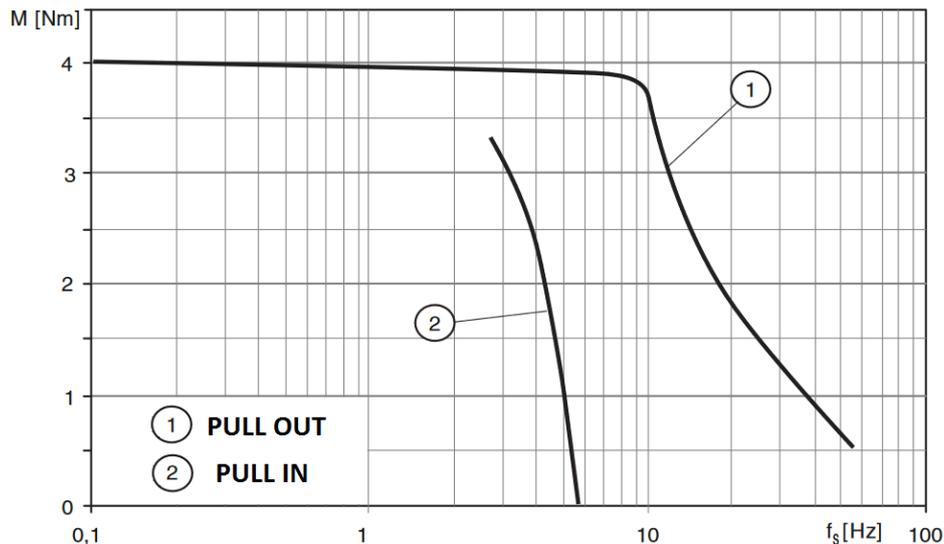


Figura 5.10 Curva de torque para motores Berger Lahr VDRM 3910.

5.6 SELEÇÃO DOS DRIVERS

Conforme a sessão 2.5, após selecionados os motores, devem ser selecionados os drivers que os acionarão. Na concepção anterior o driver SS2000D3i era utilizado para os motores Minibea 23LM-C004-04 e Minibea 23PM-C406 e o driver D900.51 para o motor VRDM 3910. Porém, o driver SS2000D3i requer comunicação serial com o controlador para receber os comandos em texto para interpretá-los e depois acionar o motor, enquanto que o driver D900.51 recebe diretamente os comandos de andar passos por pulsos digitais e aciona o motor. Essa diferença faz com que se perca o sincronismo dos movimentos e, portanto, decidiu-se utilizar apenas um tipo de driver. A escolha foi pelos drivers que recebem os comandos de andar passos por pulsos digitais pela simplicidade de programação e menor atraso na comunicação.

Uma rápida pesquisa de mercado para saber quais os tipos de driver para motor de passo estão disponíveis atualmente mostrou que a maior parte controla o motor pela corrente utilizando um circuito *chopper*, permitindo o acionamento dos motores na configuração bipolar. A Tabela 5.2 mostra as características e os preços dos drivers que atendem as especificações escolhidas, lembrando que para o driver deve fornecer correntes de no mínimo 1 A e 2 A para os motores Minibea 23LM-C004-04 e Minibea 23PM-C406 respectivamente.

Tabela 5.2. Drivers disponíveis no mercado com suas características e preços.

Driver	Corrente (A)	Alimentação (V)	Microstep	Optoisolado	Preço
A4988	1,5	8-35	1/16	Não	R\$ 14,90
DRV8825	2	8,2-45	1/32	Não	R\$ 19,90
TB6560	3	10-35	1/16	Sim	R\$ 47,90
TB6600	5	12-48	1/16	Sim	R\$ 99,90

Em relação ao custo, o driver DRV8825 seria a melhor escolha por atender todas as necessidades do projeto e dos motores, visto que o driver A4988 não possui corrente suficiente para o motor Minibea 23PM-C406. Porém, o driver só consegue operar nessa corrente com ventilação forçada e não possui entradas digitais optoisoladas. Portanto, a escolha foi pelo driver TB6560 que perde no preço e nas opções de microstep, mas possui entradas digitais optoisoladas e não necessita ventilação forçada para operar na corrente desejada, além de ser mais robusto e trabalhar 1 A abaixo da corrente máxima, aumentando sua vida útil.

O driver D900.51 atende a todas especificações de projeto e do motor VRDM 3910, mas foi retirado da bancada para ser utilizado em outro projeto. Uma pesquisa de mercado também foi feita para decidir se seria comprado outro D900.51 ou se havia algum driver com melhor custo benefício. Há poucas opções de driver para motor de 3 fases no mercado, os únicos encontrados no mercado brasileiro foram o próprio D900.51 e o VDB3722MA. Comparando os dois drivers, o VDB3722MA leva vantagem por ser alimentado diretamente com 110-250V AC, sem a necessidade do transformador 220-95V AC utilizado para alimentar o D900.51. Além disso, também tem vantagem por ser envolto por uma caixa metálica e possuir ventilação forçada, aumentando a robustez. Considerando essas vantagens e que o preço dos dois drivers não difere muito, foi escolhido o driver VDB3722MA.

5.7 DRIVER TB6560

Os motores Minibea 23LM-C004-04 e Minibea 23PM-C406 são acionados cada um por um driver (Fig. 5.11) que utiliza o CI TB6560 da Toshiba.

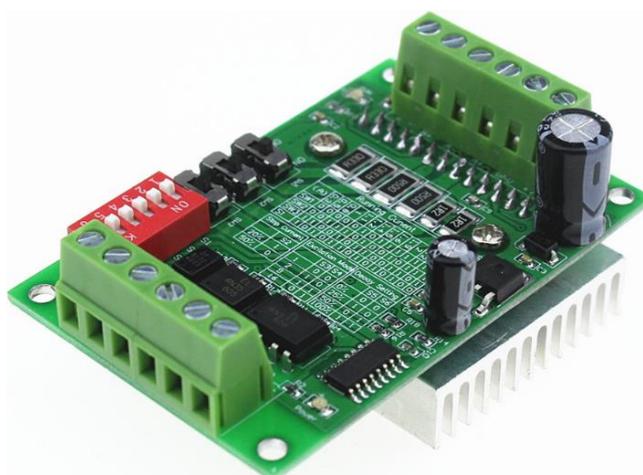


Figura 5.11 Driver TB6560.

Esse driver controla os motores pela corrente utilizando um circuito *chopper* que a cada novo passo aplica uma alta tensão nas bobinas, causando um aumento rápido na corrente. Essa corrente é monitorada pelo circuito e quando ultrapassa um valor máximo especificado, a tensão aplicada é cortada (por isso o nome *chopper*) e a corrente começa a reduzir. Ao atingir um valor mínimo especificado, a tensão é aplicada novamente. Desta forma, a corrente nas bobinas é mantida relativamente constante.

O valor da corrente nas bobinas é escolhido pelos seletores SW1, SW2, SW3 e S1 conforme a Tabela 5.3. A corrente de retenção é determinada pelo S2, podendo ser 50% da corrente operante para a posição 0 ou 20% para a posição 1. Os seletores S3 e S4 indicam o modo de excitação, multiplicando o número de passos por volta por 1 (2-phase), 2 (1-2-phase), 8 (2W1-2-phase) ou 16 (4W1-2-phase) vezes respectivamente para as posições 00, 10, 11 e 01. Os seletores S5 e S6 indicam o modo de decaimento da corrente na ponte, podendo ser 0%, 25%, 50% e 100% para as posições 00, 10, 01 e 11 respectivamente. A Figura 5.12 mostra a parte superior do driver, indicando os seletores e os pinos.

Tabela 5.3. Seleção da corrente pelos seletores do driver TB6560.

A	0.3	0.5	0.8	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.6	1.9	2.0	2.2	2.6	3.0
SW1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
SW2	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
SW3	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
S1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0

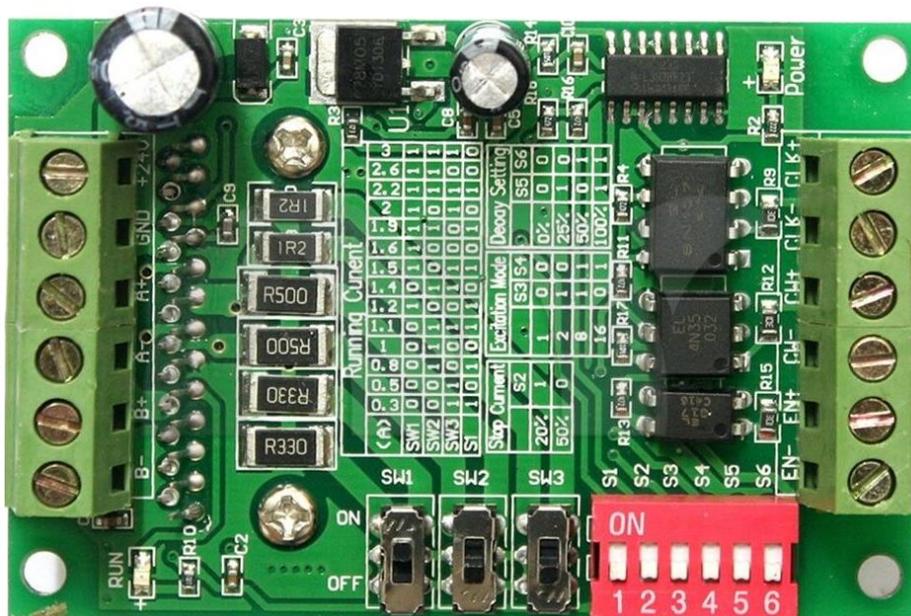


Figura 5.12 Detalhes dos pinos e seletores do driver TB6560.

Os pinos à esquerda da Fig 5.12 são conectados às bobinas e à fonte de alimentação.

- +24V: Positivo da fonte de alimentação DC, podendo receber de 10 a 35V.
- GND: Negativo da fonte de alimentação DC.
- A+: Positivo da fase A do motor.
- A-: Negativo da fase A do motor.

- B+: Positivo da fase B do motor.
- B-: Negativo da fase B do motor.

Os pinos à direita da Fig 5.12 são conectados ao controlador. Esses pinos são optoacoplados e são ativadas com 5 V, podendo ser ativadas com 12 V ou 24 V utilizando resistores de 1 k Ω e 2.4 k Ω respectivamente.

- CLK+, CLK-: Pulso ativado na borda positiva que move o motor em um passo.
- CW+, CW-: Sinal de sentido do motor, sentido anti-horário no nível alto.
- EN+, EN-: Sinal de *enable* do motor, impedindo saída de corrente no nível alto.

5.8 DRIVER VDB3722MA

O motor Berger Lahr VRDM 3910 é acionado pelo driver VDB3722MA (Fig. 5.13).



Figura 5.13 Driver VDB3722MA.

Esse driver, assim como o TB6560, também controla os motores pela corrente utilizando um circuito chopper conforme descrito na sessão 5.5.

O valor da corrente nas bobinas é escolhido pelo um seletor circular Run Im (Tabela 5.4), a quantidade de pulsos por volta é escolhida pelo seletor circular SK (Tabela 5.5) e a corrente de retenção é escolhida pelo seletor circular analógico Stop Im que varia de 20% a 80% da corrente escolhida por Run Im. Outros dois seletores ON/OFF DP1 e DP2 selecionam respectivamente o modo de execução e modo de controle de sentido. Para o modo de execução manual, isto é, recebendo pulsos externos, DP1 deve estar em OFF. Caso esteja em ON, o Driver enviará pulsos automaticamente a 7.5 kHz. Para utilizar o controle de sentido pelo sinal DR e enviar os pulsos por PU, DP1 deve estar em OFF. Caso esteja em ON, o sinal PU será o sinal de pulso no sentido horário e o sinal DR será o sinal de pulso no sentido anti-horário. A Figura 5.14 mostra a parte lateral do driver, indicando os seletores e os pinos.

Tabela 5.4. Seleção da corrente pelo seletor Run Im do driver VDB3722MA.

A	0.7	1.1	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.5	5.0	5.4	5.8	6.2	6.6	7.0
SW1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

Tabela 5.5. Seleção do número de pulsos por volta pelo seletor SK do driver VDB3722MA.

P/rev (x1000)	60	30	20	12	10	6	5	4	3	2	1.2	1	0.8	0.6	0.5	0.4
SW1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

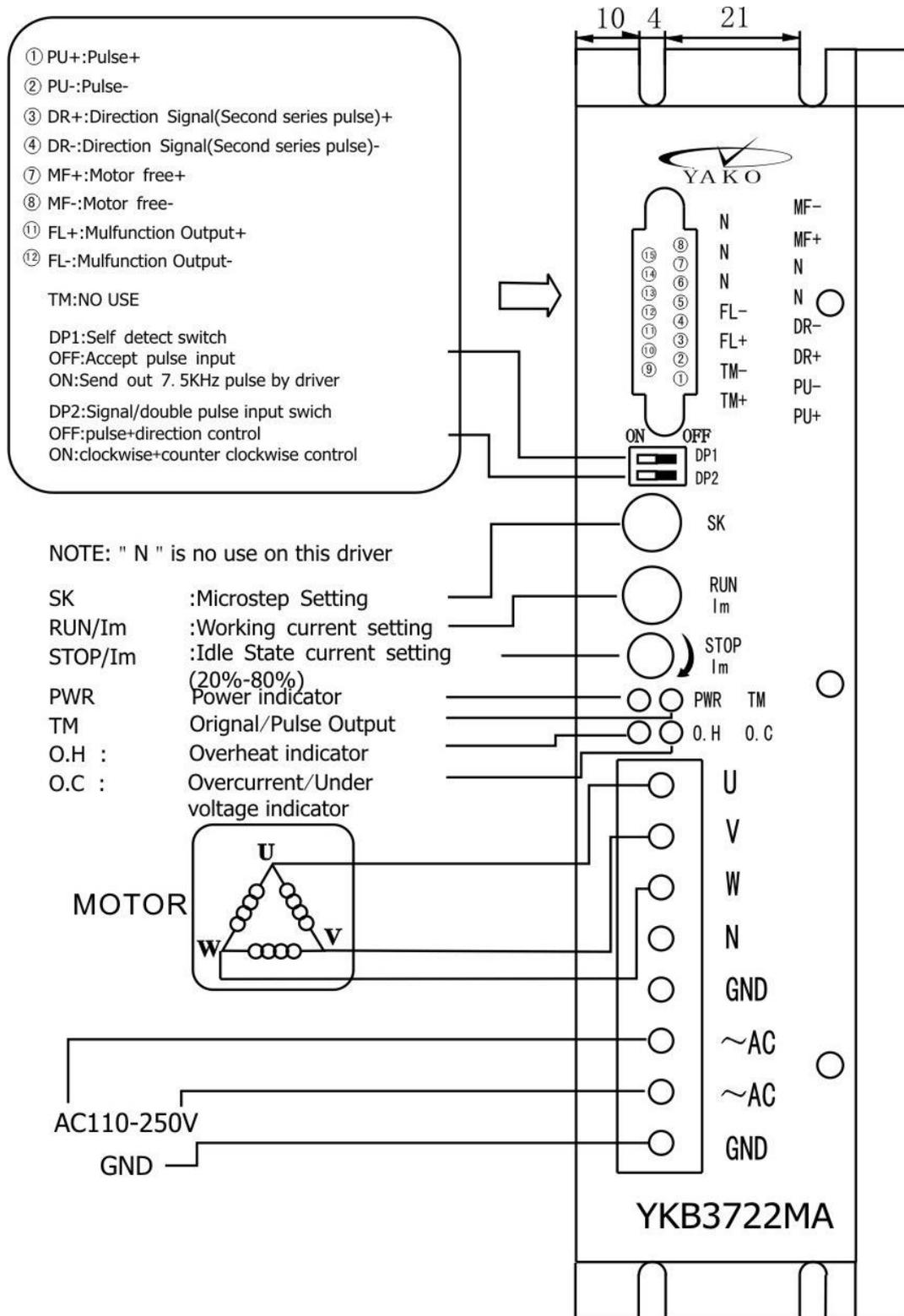


Figura 5.14 Detalhe dos pinos e seletores do Driver VDB3722MA.

A alimentação do driver é feita pelos pinos AC, aceitando alimentações de 110 V a 250 V. Os pinos U, V e W são conectados às fases do motor. O driver possui 4 LEDs de indicação:

- PWR: Indica que o driver está ligado por um LED verde.
- TM: Indica que um pulso está sendo enviado ao motor por um LED verde.
- O.H: Indica superaquecimento (70 °C) do driver por um LED vermelho.
- O.C: Indica corrente acima do especificado (7 A) ou tensão de alimentação inferior ao especificado (110V) por um LED vermelho.

Os pinos na parte superior da Fig 5.14 são conectados ao controlador por um cabo DB15. Esses pinos são optoacoplados e são ativadas com 5 V, podendo ser ativadas com 24 V utilizando resistores de 1 k Ω .

- PU+, PU-: Pulso ativado na borda positiva que move o motor em um passo. Caso o seletor DP2 estiver ON, move o motor em um passo no sentido horário.
- DR+, DR-: Sinal sentido do motor. Caso o seletor DP2 estiver ON, move o motor em um passo no sentido anti-horário.
- MF+, MF-: Sinal de liberação do motor, impedindo saída de corrente no nível alto.
- FL+, FL-: Sinal de status do driver, indicando funcionamento normal no nível alto.

6. SISTEMA DE SOLDAGEM

6.1 DESCRIÇÃO

O sistema de solda é feito com o equipamento de soldagem MIGATRONIC, Figura 6.1, a máquina que atua sobre a operação de soldagem é a COMMANDER BDH MIG. Na máquina é realizado todo o controle sobre a operação de soldagem. Serão indicados para a máquina os parâmetros desejados para uma desejada tarefa, e essa irá gerenciar a operação para que ocorra da maneira esperada.



Figura 6.1 Máquina de solda BDH 320.

O painel de controle da COMMANDER, Figura 6.2, apresenta basicamente duas seções, olhando a tela pela frente, uma seção a esquerda que contém as funções principais, e uma seção a direita, a qual pode ser omitida, que contém as funções secundárias.



Figura 6.2 Painel de Controle BDH 320.

Para a seção com as funções principais, temos algumas setas de controle e displays digitais que substituem os convencionais botões das fontes de soldagem, os quais podem ser observados na Figura 6.2. Na direita de cada display existem indicadores relacionados aos parâmetros principais de soldagem. Os quatro parâmetros principais são a velocidade de alimentação do arame durante soldagem MIG/MAG, o nível da corrente de soldagem, a tensão de soldagem e o valor de ajuste para a soldagem MIG/MAG sinérgica.

Ao ligar a máquina, um teste automático é carregado, o qual a duração é apresentada no display. Quando os símbolos de corrente e de velocidade de arame são acionados, a máquina está pronta para ser utilizada. Além disso, quando a máquina é ligada ela irá funcionar baseada em um conjunto de parâmetros que estão gravados em sua memória. Existem 10 tipos de programas gravados na máquina ao todo e o programa desejado pode ser selecionado pela tela PROG no painel de controle.

Existem alguns indicadores importantes no painel da máquina, por exemplo, o indicador de tensão é aceso por razões de segurança, em caso de existir alguma tensão no eletrodo ou na tocha. Também existe o indicador de superaquecimento, o qual é aceso em caso de a soldagem ser interrompida por causa de superaquecimento da máquina.

Em caso da seleção de soldagem no modo MIG/MAG, na parte esquerda da tela é apresentado a informação de velocidade de alimentação do arame, já na parte direita está a tensão. Ambos os parâmetros podem ser ajustados pelas teclas de controle. A velocidade do arame pode ser ajustada entre 1 e 24 m/min e a tensão entre 0 e 50 V.

6.2 ROBOT INTERFACE

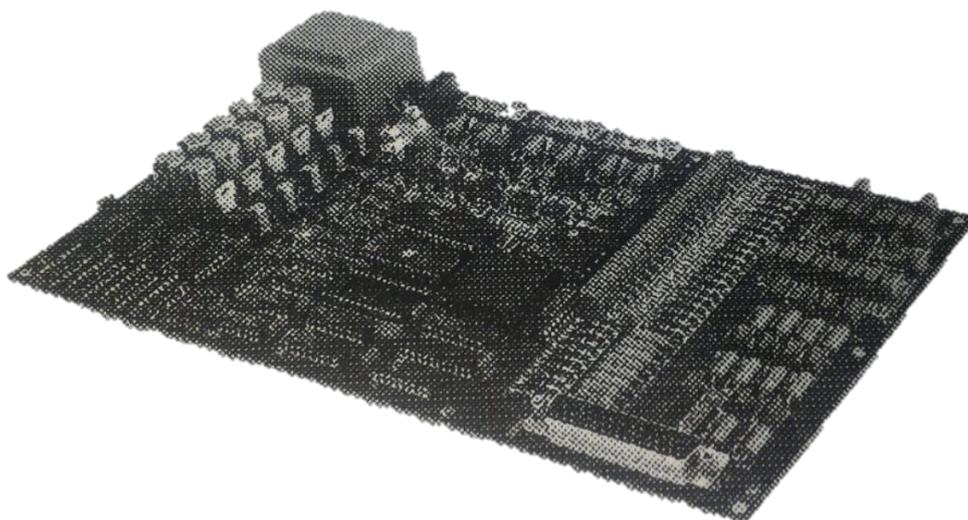


Figura 6.3 ROBOT INTERFACE.

Apesar de todo o controle poder ser feito diretamente na interface da máquina no modo manual, optou-se pela utilização do ROBOT INTERFACE para realizar esse controle. Para

ativar o controle via ROBOT INTERFACE é necessário pressionar a tecla AUTO e a seta para cima central do lado esquerdo do painel simultaneamente.

O ROBOT INTERFACE, Figura 6.3, é uma unidade de interface que permite a conexão de diversos robôs de solda, fontes de soldagem e computadores. O ROBOT INTERFACE permite que tanto um computador quanto um robô possam gerenciar o controle do sistema de soldagem, permitindo assim o controle sobre os parâmetros da fonte de solda, como por exemplo, corrente e tensão.

O ROBOT INTERFACE é uma placa situada dentro de uma caixa de metal dentro do gabinete do COMMANDER BDH MIG. A conexão com o computador de controle do BDH é feita via RS232, já a conexão com o robô de solda é feita utilizando um cabo de 50 pinos DB-50. Também existe um conector de 25 pinos DB-25 que pode ser conectado a um computador.

A placa contém três canais seriais RS232. Os canais são denominados por BOX, PC e AUX. A porta BOX é conectada ao computador de controle do BDH, já a porta PC pode ser conectada a algum computador com o software apropriado. Os canais seriais operam a uma velocidade de 9600 bit/sec e não possuem sinais de handshake.



Figura 6.4 Cabos necessários para o ROBOT INTERFACE

Existem na placa 20 portas de entrada de sinais digitais de 24 VDC. As portas são projetadas para serem conectadas a saídas de tipo relé. Existem também 8 saídas de sinal digital na placa, sendo esses transistores com coletor aberto.

Para os sinais analógicos, existem 4 entradas e 2 saídas, sendo que a tensão tanto de entrada quanto de saída varia de 0 a 10 V.

A alimentação da placa é feita via uma fonte interna a cabine BDH de 24 V AC. Porém, também é necessário uma alimentação de 24 V DC para poder suprir os sinais digitais.

Para a integração da placa ROBERT INTERFACE com a placa de aquisição NI, é necessário a utilização de um circuito de condicionamento, pois os sinais digitais da placa

ROBERT INTERFACE são de 24 V, enquanto os da placa NI são de 5 V. O circuito consiste na utilização de relés de 24V/5V juntamente a diodos de proteção, de maneira semelhante ao caso do acionamento das ventoinhas e bombas.

Para a aplicação deste trabalho, foram utilizados os sinais mencionados na Tabela 7.2.

Welding Start: O sinal welding start inicia o processo de soldagem.

Gas on: O sinal Gas on controla a liberação de gás pela válvula.

Program Number 0..3: Os sinais Program Number, de 0 a 3, selecionam o programa que está na memória da máquina de soldagem.

Sequence Number 0..2: Os sinais Sequence Number, de 0 a 2, selecionam a sequência do processo de solda.

Arc Detect: O sinal arc detect indica o sinal de arco de solda.

Main Error: O sinal de main error é ativado quando algum dos outros três sinais de erro é ativado.

Wire Speed: O sinal de wire speed indica a velocidade de alimentação do arame.

Volt Control: O sinal de Volt Control indica a tensão da operação.

Welding Voltage: O sinal welding voltage é a leitura da tensão durante o processo de solda.

Welding Current: O sinal welding current é a leitura da corrente durante o processo de solda.

7. INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS

7.1 DESCRIÇÃO

Os sistemas de movimentação, arrefecimento e soldagem são integrados por um computador de mesa por meio do software LabVIEW. A Figura 7.1 apresenta a topologia do sistema com cada grupo de dispositivos separados por cores.

- Verde: Parte central do sistema de integração, composta pelo computador e a placa de aquisição NI PCI-6229, que se comunica com o computador por uma porta PCI. A placa de aquisição se comunica com todos os sistemas por meio de suas portas digitais e analógicas.
- Azul: Sistema de movimentação, composto pelo arduino, drivers e motores. O arduino se comunica com o computador por uma porta USB. Os drivers recebem sinais de orientação e habilitação dos motores por meio da placa de aquisição.
- Laranja: Sistema de soldagem, composto pela Robot Interface, fonte de soldagem Commander BDH 320 e tocha da solda. A Robot Interface se comunica com o computador por meio da placa de aquisição.
- Amarelo: Sistema de arrefecimento, composto pela ventoinha e pela bomba hidráulica. Esses são acionados por meio de relés controlados por portas digitais da placa de aquisição.
- Roxo: Sistema de sensoriamento, composto pelos sensores de temperatura, sensores de fim de curso e comandos gerais da bancada. Esses se comunicam com o computador por meio da placa de aquisição.

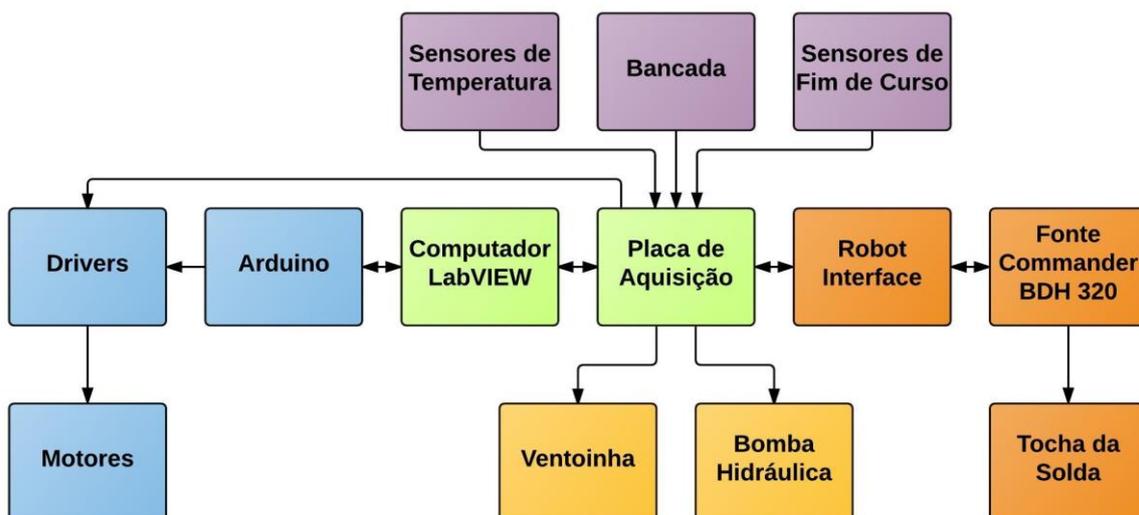


Figura 7.1 Topologia da integração dos sistemas.

7.2 PLACA DE AQUISIÇÃO NI PCI-6229

A placa de aquisição faz a comunicação do computador com os dispositivos do sistema por meio do envio e recebimento de sinais digitais e analógicos. A placa utilizada nesse projeto é a NI PCI-6229 da National Instruments (Fig 7.2) e possui 48 entradas/saídas digitais (32 se utilizados os dois contadores), 32 entradas analógicas (16 no modo diferencial) de 16 bits, 4 saídas analógicas de 16 bits e 2 contadores de 32 bits. As portas digitais operam nas tensões de 0 a 5 V e as portas analógicas nas tensões de -10 a 10 V.

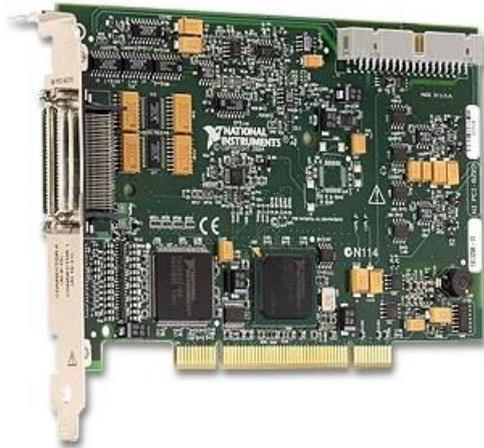


Figura 7.2 Placa de aquisição NI PCI-6229.

A comunicação da placa com o computador é feita por uma porta PCI. Os dispositivos são ligados à placa utilizando os acessórios bloco conector CB-68LP (Fig. 7.3) e cabo SH68-C68-S (Fig. 7.4). Esses acessórios são vendidos também pela National Instruments. A descrição de cada pino e seu número correspondente pode ser vista na Fig. 7.5.



Figura 7.3 Bloco conector CB-68LP.



Figura 7.4 Cabo SH68-C68-S.

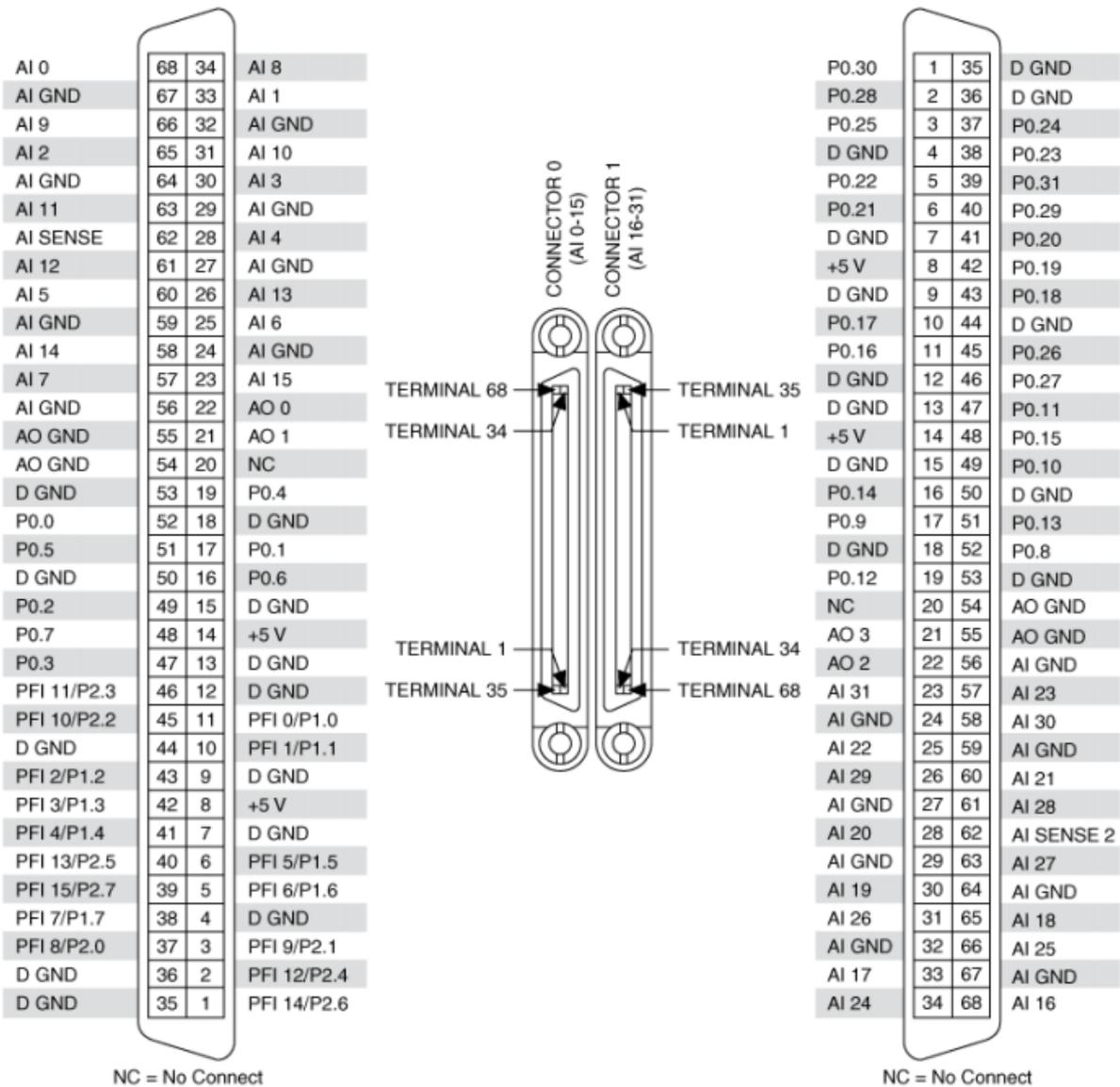


Figura 7.5 Descrição dos pinos da placa NI PCI-6229.

As conexões dos sinais do sistema nos pinos da placa de aquisição estão relacionadas na Tabela 7.1 para o conector 0 e na Tabela 7.2 para o conector 1. Os sinais de referência digital, entrada e saída analógica são conectados a qualquer porta D GND, AI GND e AO GND respectivamente indicadas na Fig. 7.5.

Tabela 7.1. Conexões dos sinais do sistema no conector 0 da placa de aquisição.

Sinal	Porta	Pino	Tipo
TB6560 Y CW+	P0.0	52	Output
TB6560 Z CW+	P0.1	17	Output
TB6560 θ CW+	P0.2	49	Output
VD3722MA Φ CW+	P0.3	47	Output
Relé Bomba	P0.4	19	Output
Relé Ventoinha	P0.5	51	Output
Parada de Emergência	P0.6	16	Input
Reset Arduino	P0.7	48	Output
Fim de Curso Y-	P1.0	11	Input
Fim de Curso Y+	P1.1	10	Input
Fim de Curso Z-	P1.2	43	Input
Fim de Curso Z+	P1.3	42	Input
TB6560 Y EN+	P1.4	41	Output
TB6560 Z EN+	P1.5	6	Output
TB6560 θ EN+	P1.6	5	Output
LM35 Tambiente	AI0	68	Input
LM35 Tsaída	AI1	33	Input
LM35 Ttrocador	AI2	65	Input
LM35 Tentrada	AI3	30	Input

Tabela 7.2. Conexões dos sinais da Robot Interface no conector 1 da placa de aquisição.

Sinal	Porta	Pino	Tipo
Welding Start	P0.8	52	Output
Gas On	P0.9	17	Output
Program Number 0	P0.10	49	Output
Program Number 1	P0.11	47	Output
Program Number 2	P0.12	19	Output
Program Number 3	P0.13	51	Output
Sequence Number 0	P0.14	16	Output
Sequence Number 1	P0.15	48	Output
Sequence Number 2	P0.16	11	Output
Arc Detect	P0.17	10	Input
Main Error	P0.18	43	Input
Wire Speed	AO0	60	Output
Volt Control	AO1	25	Output
Welding Voltage	AI4	57	Input
Welding Current	AI5	34	Input

7.3 PROGRAMA ARDUINO

Os drivers utilizados no sistema são do tipo que recebem os comandos de andar passos por pulsos digitais. Portanto, para controlar os motores é necessária a geração de um trem de pulsos digitais. A placa de aquisição NI 6229 possui 2 contadores de uso geral que possibilitam a geração desses pulsos. Porém, os dois contadores são utilizados para gerar um pulso com duração finita, resultando em 8 contadores necessários para controlar os 4 motores. Outra forma de gerar os pulsos seria diretamente pelo LabVIEW, mas como a execução das tarefas do programa é determinada pelo sistema operacional, haveria perda de precisão por não se conseguir manter a regularidade dos períodos dos pulsos. Decidiu-se então utilizar um sistema dedicado para a geração dos trens de pulsos digitais.

O microcontrolador Arduino UNO (Fig. 7.6) foi escolhido devido ao seu abixo custo, alta velocidade de processamento, facilidade de comunicação e por possuir software open source para programação em linguagem C.



Figura 7.6 Microcontrolador Arduino UNO.

A Tabela 7.3 mostra como devem ser ligados os sinais dos drivers nas portas do Arduino, lembrando que o GND deve ser o mesmo da placa de aquisição.

Tabela 7.3. Conexões do Arduino com os drivers.

Driver	Motor	Sinal	Porta
TB6560	Y	CLK+	13
	Z	CLK+	12
	θ	CLK+	11
	Y, Z, θ	CLK-	GND
VD3722MA	ϕ	PU+	10
		PU-	GND

A Figura 7.7 mostra o fluxograma do código do Arduino, que se inicia fazendo o setup da porta serial e das portas digitais 13, 12, 11 e 10. O código completo está no Apêndice A. Após a inicialização, é verificado se há algum dado no buffer de entrada serial em loop. Quando houver dado, é feita a leitura do dado que é enviado no formato "RPM_Y RPM_Z RPM _{θ} RPM _{ϕ} T;" e salvos os valores das velocidades em RPM no vetor freq[4] e do tempo T em segundos na variável tempo. Todos esses valores são recebidos multiplicados por 1000000 e devem ser divididos pelo mesmo valor. Isto é feito para reduzir a perda de informação, porque a

transmissão é feita utilizando valores inteiros. Com esses dados é possível calcular o número de pulsos que cada motor deve dar e o período dos pulsos em microsegundos por:

$$N = \text{Número de Pulsos} = \frac{\text{PassosPorVolta} \cdot \text{tempo} \cdot \text{freq}}{60}$$

$$\text{Período} = \frac{1000000}{2} \cdot \frac{60}{\text{PassosPorVolta} \cdot \text{freq}}$$

É feita uma verificação para o caso de velocidade igual a zero para evitar overflow na divisão por zero. Nesse caso, o período e o número de pulsos recebem valor 1 para evitar problemas em cálculos, mas o motor não receberá pulsos no laço de acionamento. Os motores são então ordenados pelo número de pulsos e as relações entre os números de pulsos do motor mais rápido e os motores mais lentos são calculadas.

O acionamento dos motores é feito por um laço for que conta os pulsos do motor com maior número de pulsos, onde em cada iteração é gerado um pulso com o período calculado e verificado pelas relações dos pulsos se os motores mais lentos devem receber um pulso nessa iteração. Ao término do laço for, é enviado o sinal DONE para o computador e volta-se ao começo do programa.

Para reduzir o torque de partida e não acelerar os motores instantaneamente, é utilizado um perfil trapezoidal de aceleração que acelera o motor a uma taxa constante durante 5% do tempo T e mantém o motor na velocidade v pelos 95% restantes de T.

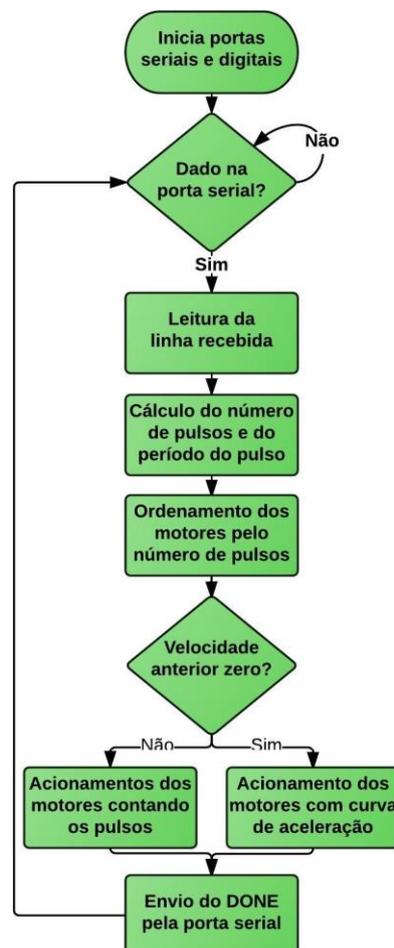


Figura 7.7 Fluxograma do código do Arduino.

7.4 PROGRAMA LABVIEW

Conectado a todos dispositivos por meio da placa de aquisição e do Arduino, o computador faz a lógica de controle da bancada utilizando o software LabVIEW. A Figura 7.8 apresenta o painel frontal da VI principal “Main.vi” que funciona como a interface homem-máquina.

Os LEDs verdes maiores indicam em que etapa o programa está, os LEDs verdes menores indicam os estados dos sensores de fim de curso, ventoinha, bomba e sinais Arc Detect e Main Error lidos pela Robot Interface. O LED vermelho é o botão de parada de emergência, que pode ser pressionado tanto por essa interface quanto pelo botão físico da bancada. Há indicadores numéricos para as temperaturas, tensão e corrente da solda lidas pela Robot Interface. Há controles para indicar o endereço do arquivo texto com o código, a porta utilizada para comunicação com o Arduino, a velocidade linear do processo de soldagem e sinais enviados pela Robot Interface de velocidade do arame e tensão da solda. Um indicador de texto apresenta o código lido enumerando as linhas. Um gráfico XY mostra o perfil da peça conforme ela é depositada. Botões retangulares são utilizados para dar início ao programa, levar a tocha à posição zero da mesa e iniciar o processo de deposição.

Na etapa de zeramento da posição, o bloco Ajuste do Zeramento deve ser utilizado para o ajuste fino do zeramento apertando os botões na direção desejada e ao final apertar o botão vermelho no centro para indicar ao sistema que o zeramento foi concluído.

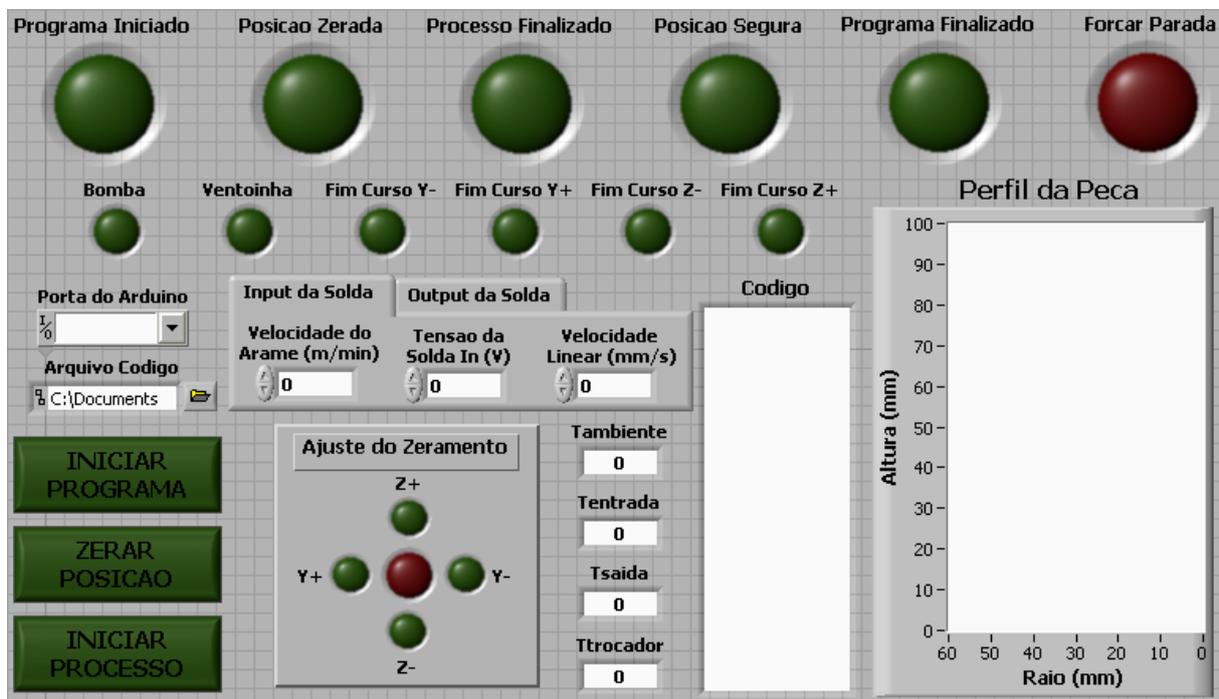


Figura 7.8 Painel frontal da VI principal do programa “Main.vi”.

O programa principal foi dividido em diversas VI para facilitar a organização e o entendimento. O diagrama de blocos da VI principal “Main.vi” (Fig. 7.9) contém outras 10 Vis para executar tarefas específicas. Quatro tarefas são executadas em paralelo:

Na parte inferior do diagrama há um laço while que faz a atualização das variáveis do programa. Na parte superior está o processo principal responsável pela fabricação da peça.

No centro há a VI “Fim de Curso.vi” que lê os sensores de fim de curso dos motores Y e Z e controla os sinais EN dos seus drivers. Ainda no centro, a VI “Parada de Emergencia.vi” lê o botão de emergência e quando for pressionado ou o botão físico ou o botão no painel frontal ou o sinal Main Error da Robot Interface. Em caso de emergência, os sinais de travamento dos motores são acionados, a bomba e a ventoinha desligadas, Arduino resetado e sinais Welding Start e Gas On desligados.

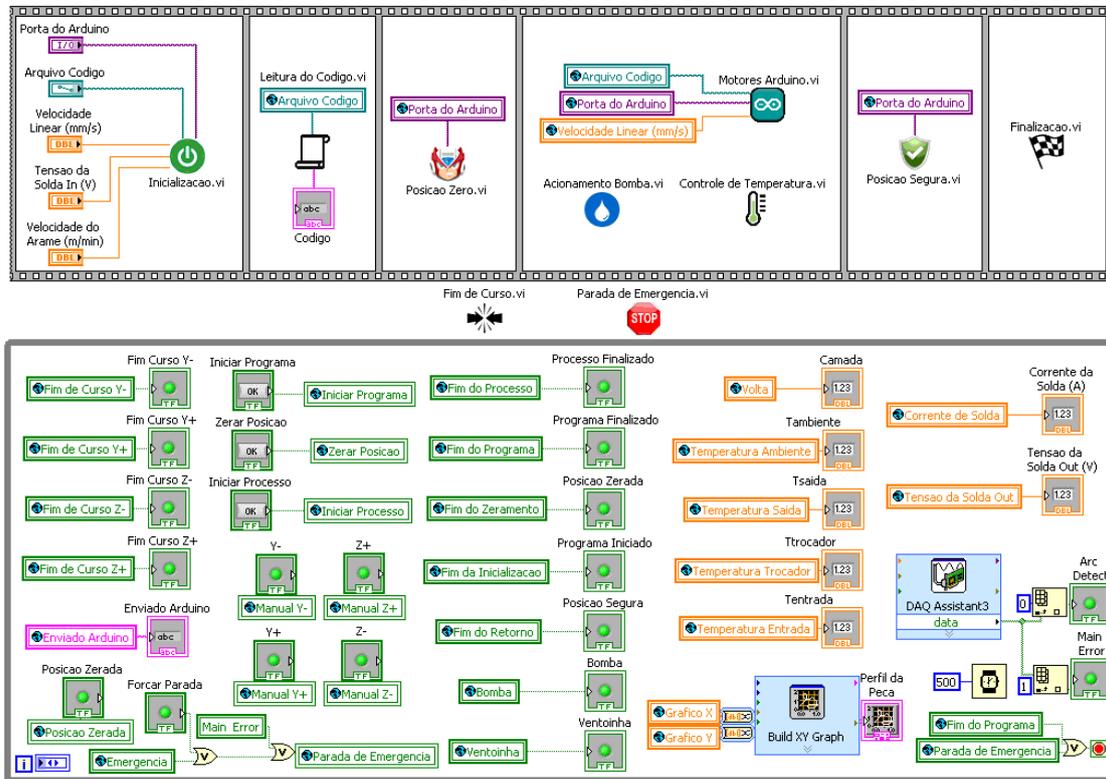


Figura 7.9 Diagrama de blocos da VI principal do programa “Main.vi”.

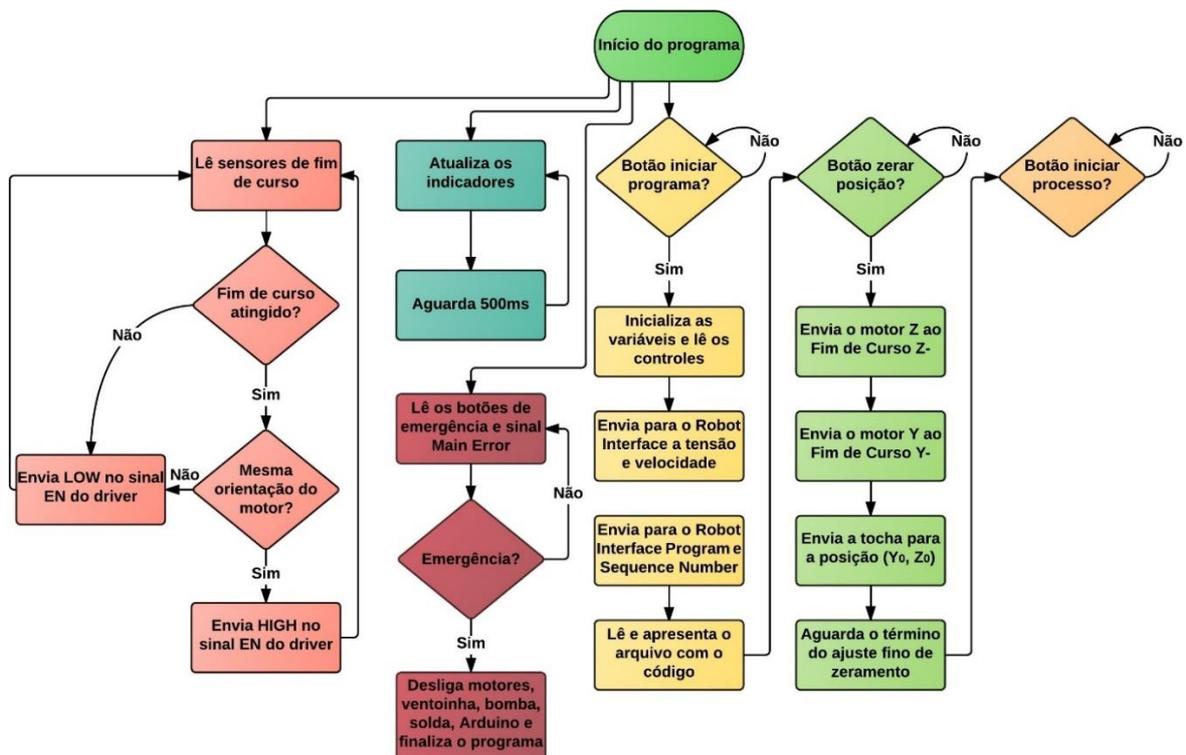


Figura 7.10 Fluxograma do código do LabVIEW – Parte 1.

As Figuras 7.10 e 7.11 mostram o fluxograma da execução do programa. O fluxograma foi dividido em duas imagens para facilitar a apresentação. O bloco laranja “Botão iniciar processo?” no final da primeira imagem e no início da segunda imagem marca a divisão.

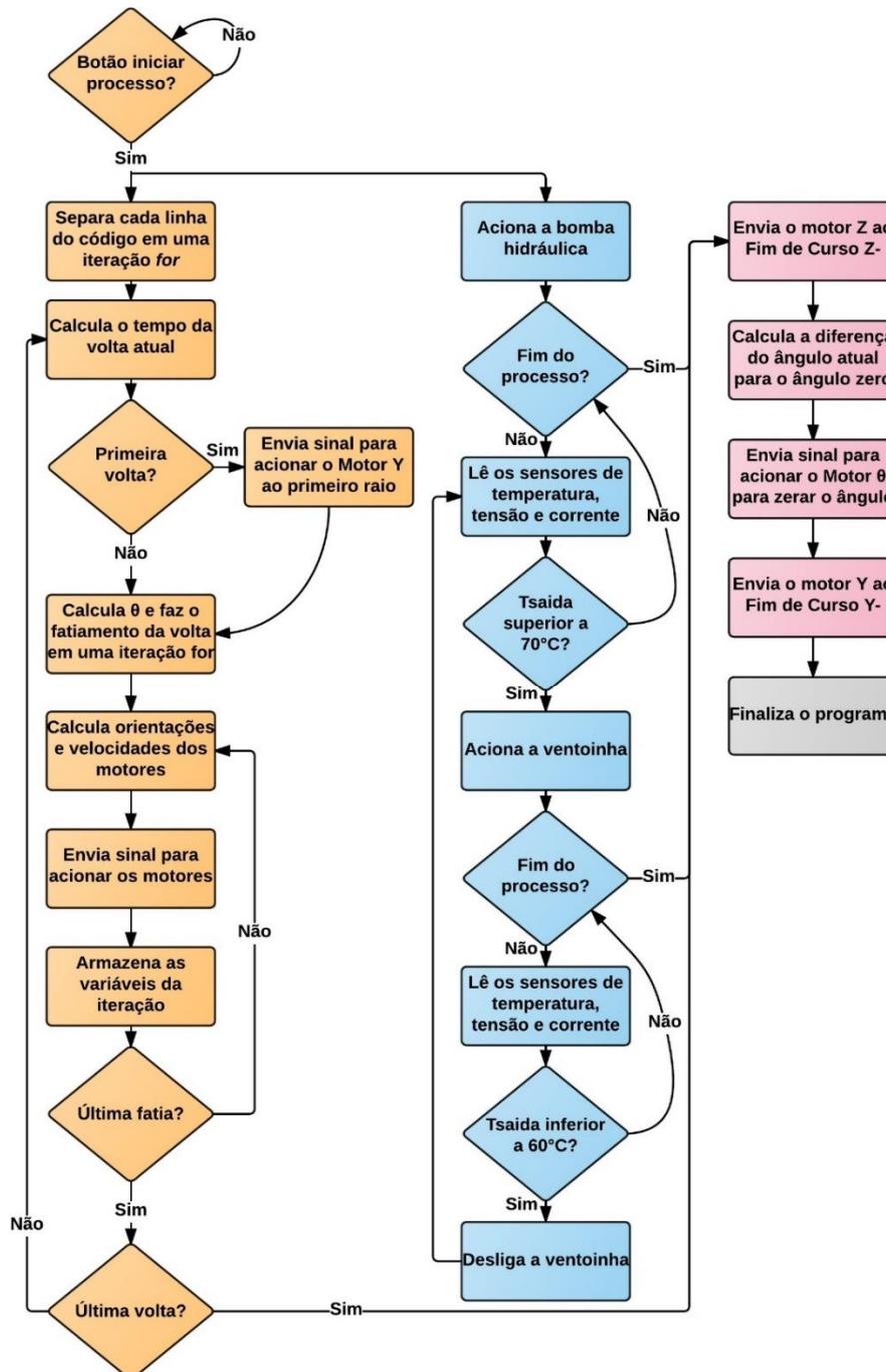


Figura 7.11 Fluxograma do código do LabVIEW – Parte 2.

Seguindo o fluxograma, o programa se inicia e as quatro tarefas em paralelo são executadas. A tarefa em ciano atualiza os indicadores do painel frontal a cada 500 ms enquanto o programa estiver rodando, o diagrama de blocos está na parte inferior da Figura 7.9. A tarefa em cor salmão corresponde à VI “Fim de Curso.vi” (Fig 7.12), que a cada 100 ms lê os sensores de fim de curso e escreve HIGH na porta EN dos drivers dos motores Y e Z caso o motor tente se mover na mesma orientação do fim de curso atingido ou caso o botão de emergência esteja pressionado e LOW caso contrário. A expressão para a saída EN é:

$$EN = (\text{Fim de Curso}^\pm \text{ AND } \text{Orientação}^\pm) \text{ OR } (\text{Parada de Emergência})$$

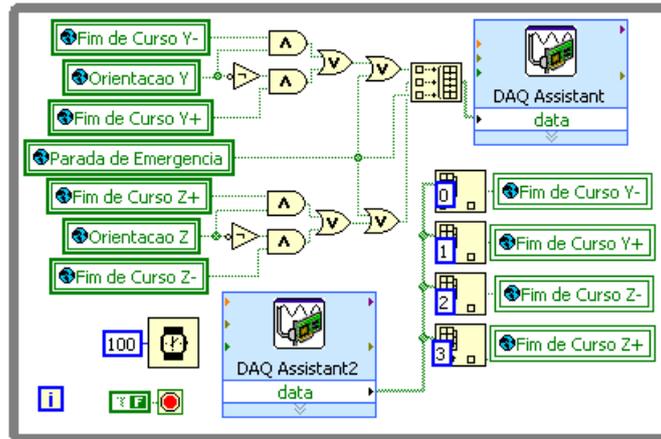


Figura 7.12 Diagrama de blocos da VI “Fim de Curso.vi”.

A tarefa em vermelho corresponde à VI “Parada de Emergencia.vi” (Fig 7.13), que a cada 100 ms lê o botão de parada de emergência e caso o sinal Parada de Emergência ocorra, aciona os sinais ENABLE dos motores, RESET do Arduino, desliga a bomba e ventoinha e pára o processo de soldagem. A expressão para o sinal Parada de Emergência é:

$$\text{Parada de Emergencia} = \text{Emergência OR Forçar Parada OR Main Error}$$

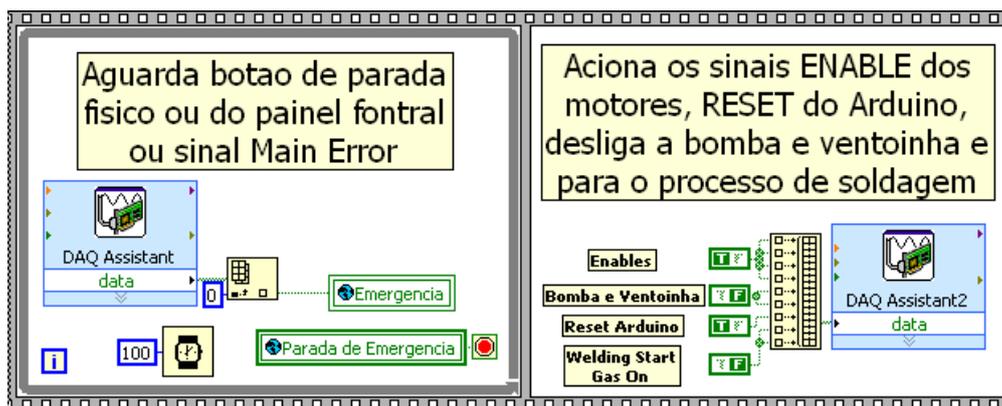


Figura 7.13 Diagrama de blocos da VI “Parada de Emergencia.vi”.

A tarefa em amarelo corresponde aos dois primeiros blocos do processo principal na parte superior da Fig 7.9. No primeiro bloco, a VI “Inicializacao.vi” (Fig 7.14) é iniciada recebendo os valores dos controles do painel principal Velocidade Linear, Porta do Arduino, Arquivo Codigo, Velocidade do Arame e Tensão da Solda In.

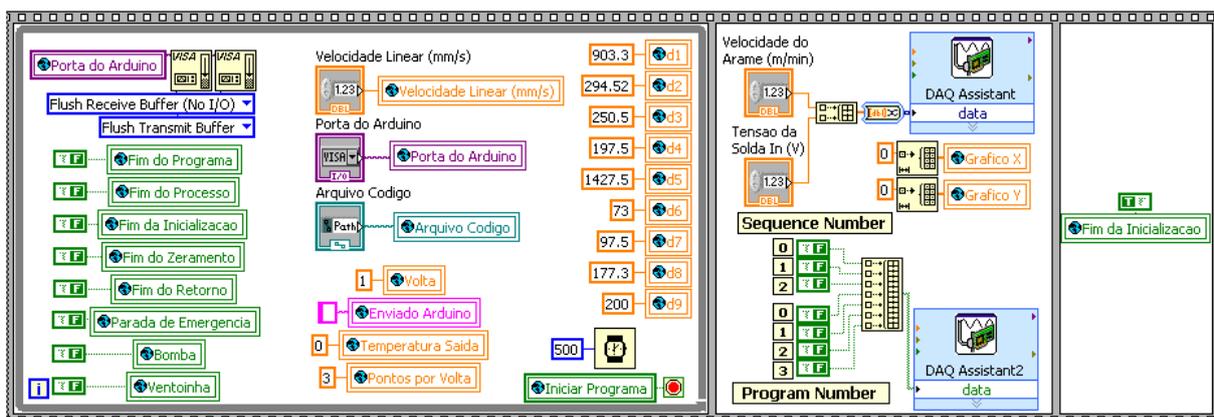


Figura 7.14 Diagrama de blocos da VI “Inicializacao.vi”.

A VI aguarda o botão Iniciar Programa ser pressionado no painel frontal para iniciar as variáveis, enviar os parâmetros da solda para a Robot Interface, escolher o Program e Sequence Number e continuar o programa. Nesse bloco devem ser inseridos os valores das distâncias d_i da bancada para os cálculos das coordenadas. Lembre-se de colocar um valor um pouco menor em d_9 para garantir que a tocha não encostará na mesa. Essa distância será corrigida no ajuste do zeramento. Ao final, é enviado Verdadeiro para a variável Fim da Inicializacao, que acenderá seu LED no painel frontal.

No segundo bloco, é feita a leitura do código e sua apresentação no painel frontal pela VI “Leitura do Codigo.vi” (Fig. 7.15), que quebra o código em linhas e o apresenta com o número da linha na frente.

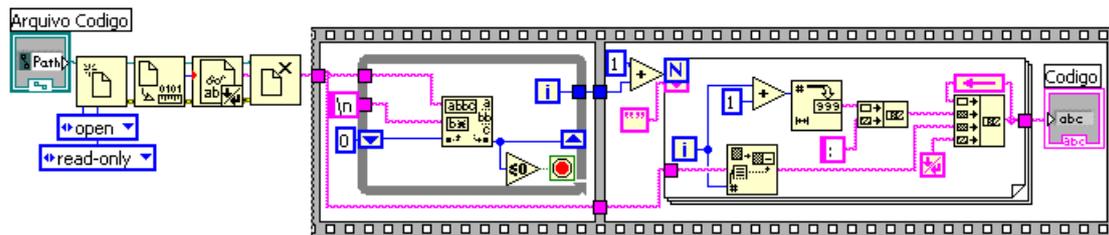


Figura 7.15 Diagrama de blocos da VI “Leitura do Codigo.vi”.

A tarefa em verde corresponde ao terceiro bloco do processo principal. A VI “Posicao Zero.vi” (Fig. 7.16, 7.17 e 7.18) aguarda o botão Zerar Posicao ser pressionado no painel frontal para iniciar.

São enviados ao Arduino sinais para movimentar os motores Z e Y por distâncias maiores que as dimensões de seus fusos para que os eles batam nos fins de cursos negativos e as coordenadas Z e Y da tocha sejam zeradas.

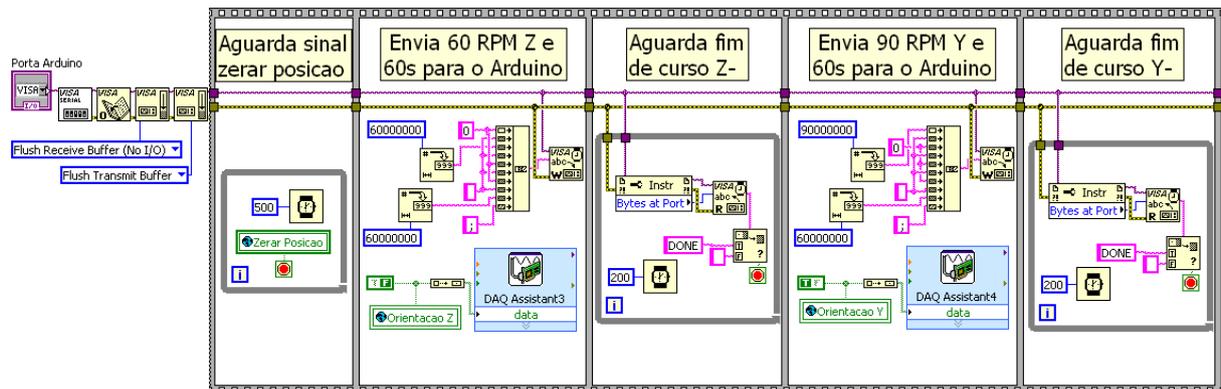


Figura 7.16 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 1.

Na sequência, calcula-se as coordenadas Z e Y para mover a tocha à posição zero da mesa (Y_0 , Z_0) utilizando as Equações 17 e 18. Esses valores são enviados ao Arduino calculando-se o tempo para fazer esse deslocamento a 60 RPM. Após enviados os sinais, aguarda-se o recebimento do sinal DONE.

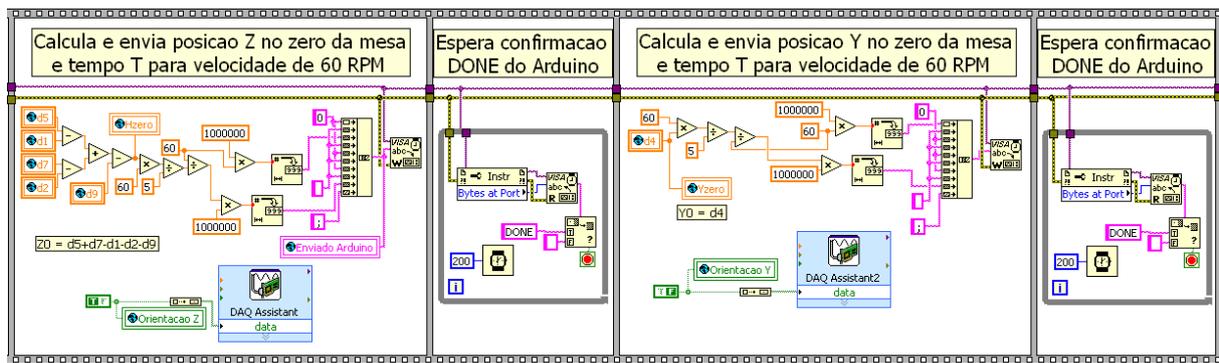


Figura 7.17 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 2.

Ao final, é feito o ajuste manual do zeramento utilizando os botões do painel frontal. Cada vez que um botão for apertado, é enviado ao Arduino o movimento de 1 mm na direção desejada a 12 RPM. Quando o botão vermelho de fim de ajuste for apertado no painel frontal, o laço while acaba e é enviado Verdadeiro para a variável Fim do Zeramento, que acenderá seu LED no painel frontal.

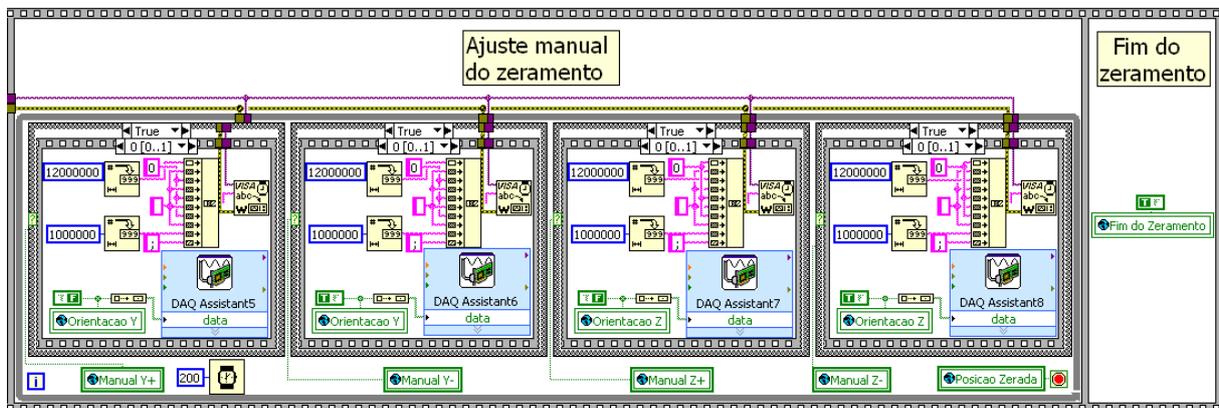


Figura 7.18 Diagrama de blocos da VI “Posicao Zero.vi” – Parte 3.

A tarefa em laranja é executada em paralelo com a tarefa em azul e correspondem ao quarto bloco do processo principal. Na tarefa em azul, a VI “Acionamento Bomba.vi” possui apenas uma escrita de sinal HIGH para o relé da bomba e a VI “Controle de Temperatura.vi” (Fig. 7.19) faz a leitura de 100 valores a cada segundo para cada um dos 4 sensores de temperatura e armazena em suas variáveis a média aritmética dessas 100 leituras. As leituras de tensão e corrente de solda também são feitas nesse bloco apenas por simplicidade de implementação.

O relé que aciona a ventoinha é controlado pela temperatura de saída pelo controle liga-desliga com histerese implementado com um flip-flop SR. Os limites de temperatura são de 60°C e 70°C. Desta forma, quando a temperatura de saída ultrapassar 70°C, a ventoinha é acionada e só será desligada quando a temperatura de saída estiver menor que 60°C, evitando flutuações de acionamento em torno da temperatura limite.

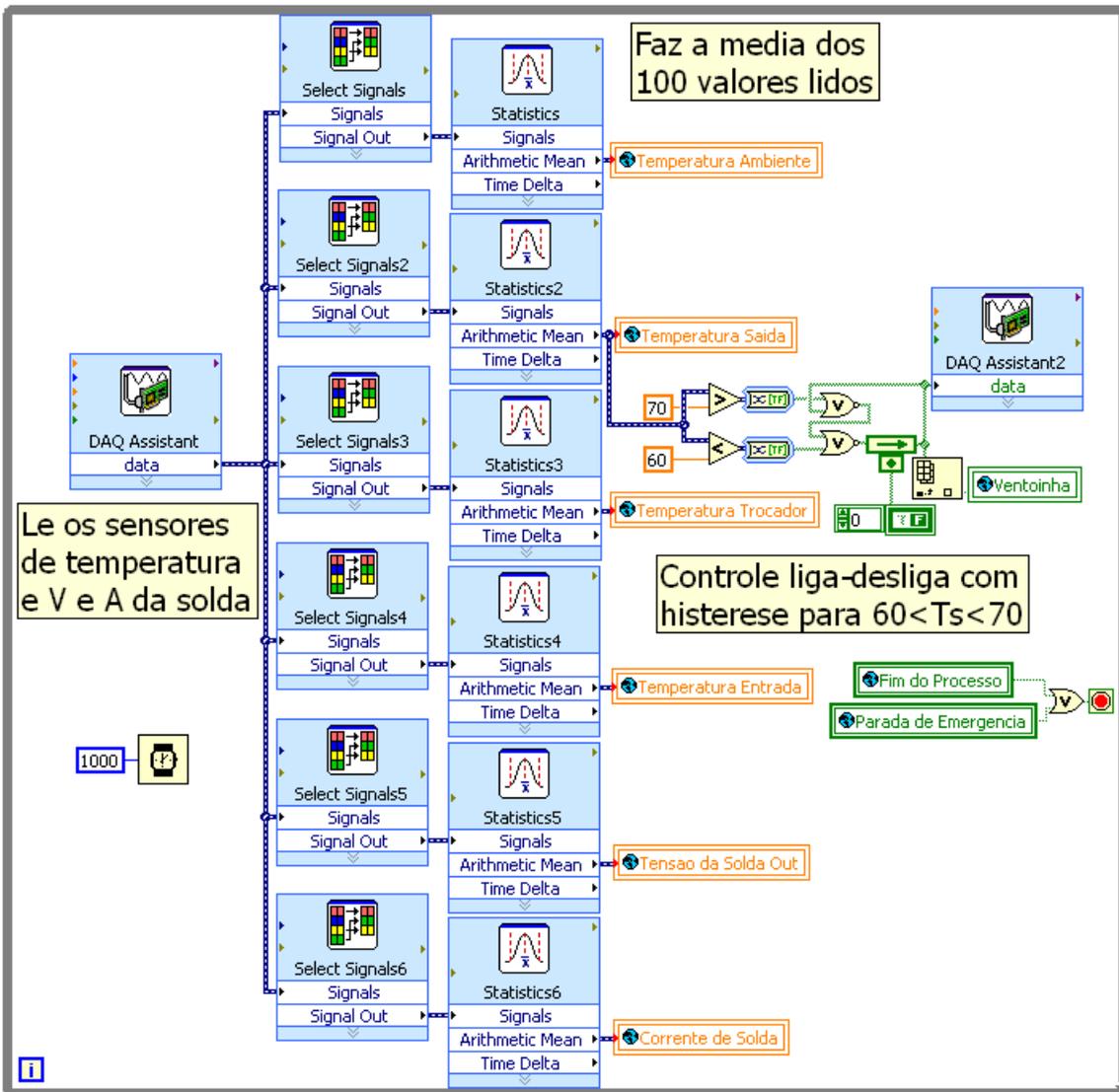


Figura 7.19 Diagrama de blocos da VI “Controle de Temperatura.vi”.

Na tarefa em laranja, a VI “Motores Arduino.vi” (Fig. 7.20, 7.21 e 7.22) separa cada linha do código em uma iteração de um laço for, onde são calculadas as coordenadas iniciais e finais de cada camada e enviadas as velocidades e tempo da volta da camada atual para o Arduino.

Dentro de cada laço for, há outro laço for para o fatiamento dos pontos dentro de uma volta, definido na inicialização pela variável Pontos por Volta. Quanto mais pontos forem utilizados por volta, melhor vai ser a linearização dos termos não lineares seno e cosseno da cinemática do sistema.

Antes de iniciar o laço for, as variáveis Y, Z e Ângulo anterior recebem as coordenadas Y, Z e θ correspondentes ao zero da mesa para que a movimentação seja feita em relação a esse ponto e não ao zero da tocha. Dentro do laço for, aguarda-se o botão Iniciar Processo ser pressionado no painel frontal caso esteja na primeira iteração. O tempo da volta atual é então calculado utilizando o raio da camada atual e a Velocidade Linear por:

$$T = \frac{r \cdot 2\pi}{v}$$

Na sequência, caso esteja na primeira iteração, a tocha estará no zero da mesa e deve ser movimentada no eixo Y para o raio r da primeira camada. Isso é necessário porque o laço for calcula os deslocamentos em relação à camada anterior, ou seja, se na primeira iteração a tocha estiver no zero da mesa, a primeira camada teria formato de uma espiral do centro da mesa $(0,0)$ até (r_1, h_1) . Partindo do ponto $(r_1, 0)$ até (r_1, h_1) , obtém-se a primeira camada com raio constante. Pela Equação 35, esse deslocamento em Y é:

$$\Delta y = y_1 - y_0 = \cos 0 \cdot r - \sin 0 \cdot h + d_4 - y_0 = r + d_4 - y_0$$

O tempo desse deslocamento é arbitrário, pois somente o motor Y é acionado e não é necessário sincronizar os movimentos. A velocidade de 60 RPM foi escolhida, desta forma:

$$T = \frac{\Delta y \cdot 60}{RPM \cdot 5} = \frac{(r + d_4 - y_0) \cdot 60}{5 \cdot 60}$$

Os termos não são simplificados para melhor entendimento no diagrama de blocos. Lembre-se que a velocidade e o tempo são multiplicados por 1000000 e serão divididos pelo mesmo valor no Arduino em todas as transmissões para reduzir a perda de informação, pois a transmissão é feita utilizando valores inteiros. Após a transmissão, aguarda-se o recebimento do sinal DONE.

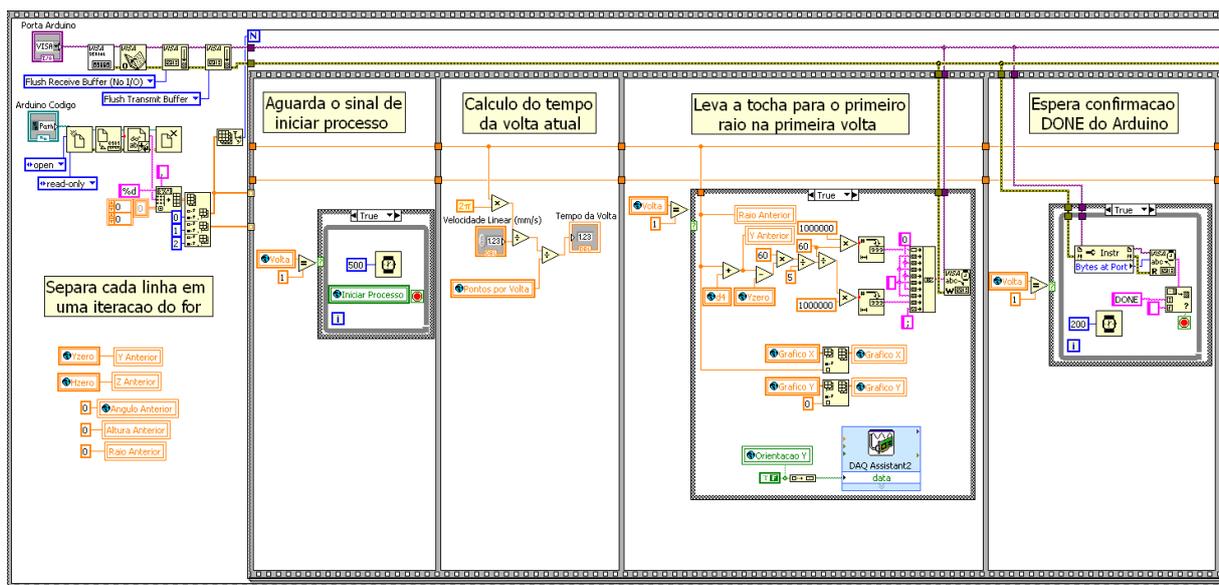


Figura 7.20 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 1.

Os próximos passos são executados para todas as iterações, inclusive para a primeira. O ângulo θ_i é calculado e é feito o fatiamento da volta. O incremento de cada variável por iteração do for interno é calculado dividindo Δr , Δh e $\Delta \theta$ por Pontos por Volta. Ao entrar no for interno, a movimentação se iniciará. Portanto, os sinais Welding Start e Gas On são enviados pela Robot Interface. Com os valores da iteração anterior $(r_{i-1}, h_{i-1}$ e $\theta_{i-1})$ e dos incrementos, calcula-se os valores r_i , h_i e θ_i e com eles os valores Y_i e Z_i pela Equação 35.

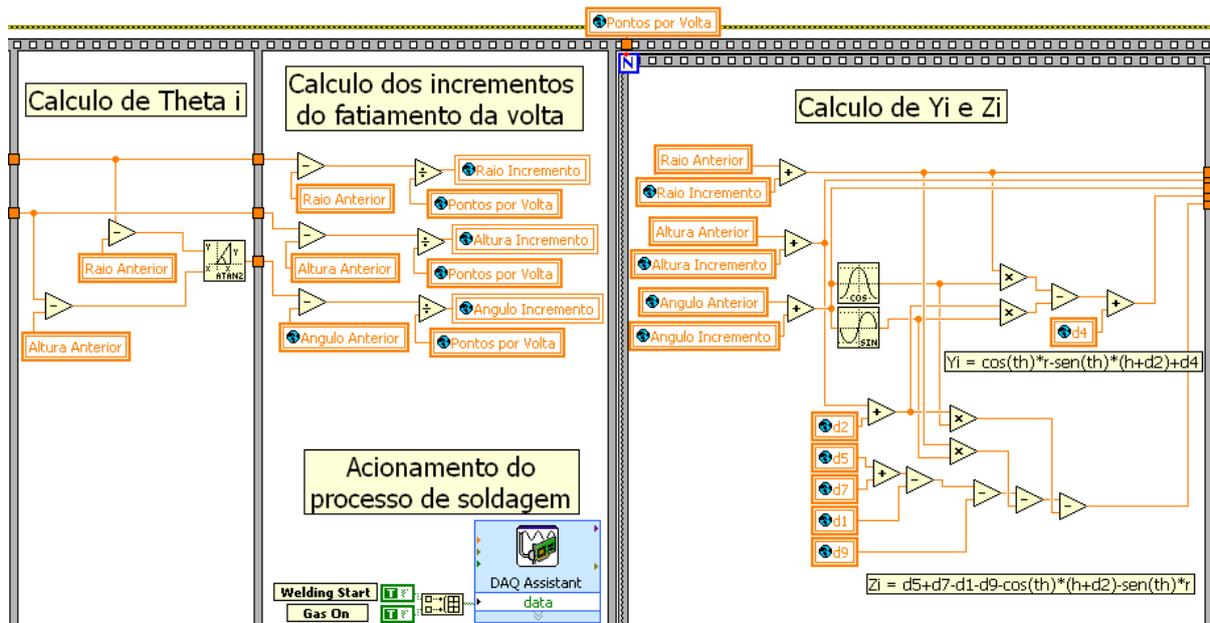


Figura 7.21 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 2.

Com os valores Y_i e Z_i , os deslocamentos ΔY , ΔZ são calculados. São feitas duas verificações com esses valores. A primeira verifica se o valor é zero e em caso Verdadeiro é enviado ao próximo bloco, em caso Falso o valor é transformado em velocidade e enviado ao próximo bloco. A segunda verifica se o valor é positivo ou negativo para definir a orientação do motor, que é escrita na porta CW dos seus drivers. A velocidade do motor Φ é calculada diretamente com o tempo da volta e a redução da engrenagem, sua orientação é mantida a mesma durante todo o processo. Os valores calculados são multiplicados por 100000 e enviados ao Arduino. Após receber o sinal DONE, as variáveis são salvas para serem utilizadas na próxima iteração como valores anteriores.

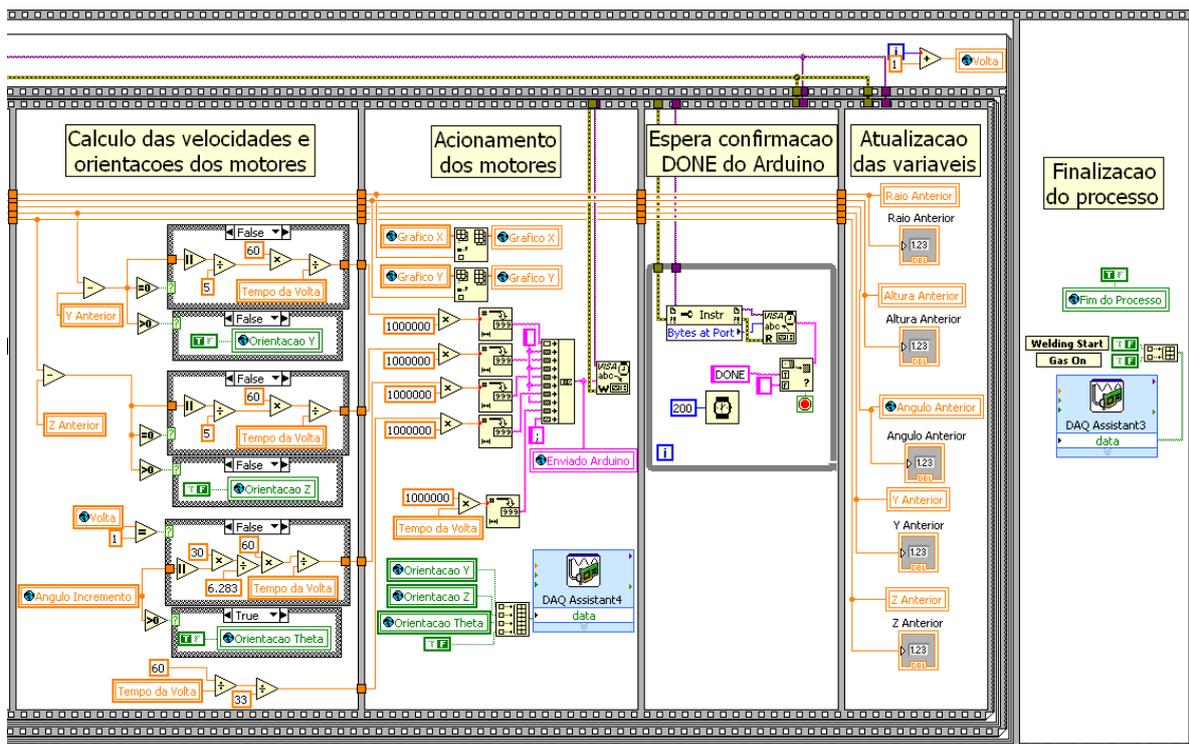


Figura 7.22 Diagrama de blocos da VI “Motores Arduino.vi” – Parte 3.

Após todas iterações, é enviado Verdadeiro para a variável Fim do Processo, que acenderá seu LED no painel frontal.

A tarefa em rosa corresponde ao penúltimo bloco do processo principal. A VI “Posicao Segura.vi” (Fig 7.23) retorna a tocha para a posição segura no zero de suas coordenadas Y e Z, retornando também a mesa para a posição inicial zerando sua coordenada θ .

Para evitar travamentos e colisões, primeiro a tocha é zerada na coordenada Z pelo mesmo processo utilizado no começo do zeramento da posição, em seguida é zerada a coordenada θ utilizando seu último valor anterior negativado e, por fim, é zerada a coordenada Y da tocha. Ao final, é enviado Verdadeiro para a variável Fim do Retorno, que acenderá seu LED no painel frontal.

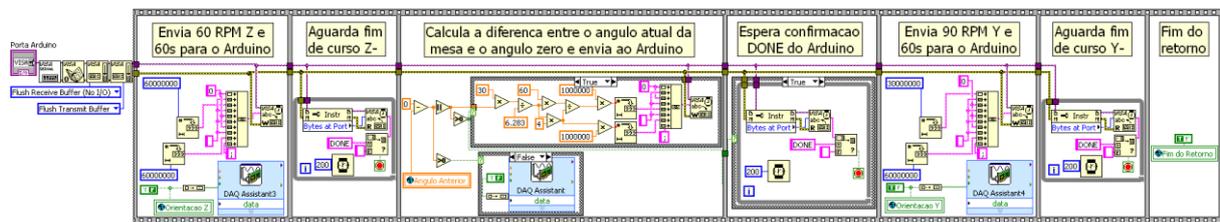


Figura 7.23 Diagrama de blocos da VI “Posicao Segura.vi”.

A tarefa em cinza corresponde ao último bloco do processo principal, que o finaliza executando a VI “Finalizacao.vi”. Essa VI apenas desliga a bomba e a ventoinha e envia Verdadeiro para a variável Fim do Programa, que acenderá seu LED no painel frontal.

8. TESTES E DISCUSSÃO

Os primeiros testes realizados foram sobre o sistema de arrefecimento, de maneira a verificar se os problemas de vazamento continuavam a existir. As primeiras observações foram que a bomba não estava funcionando corretamente, havia um vazamento na mesma, além da existência de pequenos vazamentos nas conexões de saída e entrada do reservatório com a tubulação. Com isso, foram tomadas as devidas providências, ocorrendo a troca da bomba e uma melhor vedação de diversos pontos do sistema. A nova bomba utilizada pode ser observada na Figura 8.1.

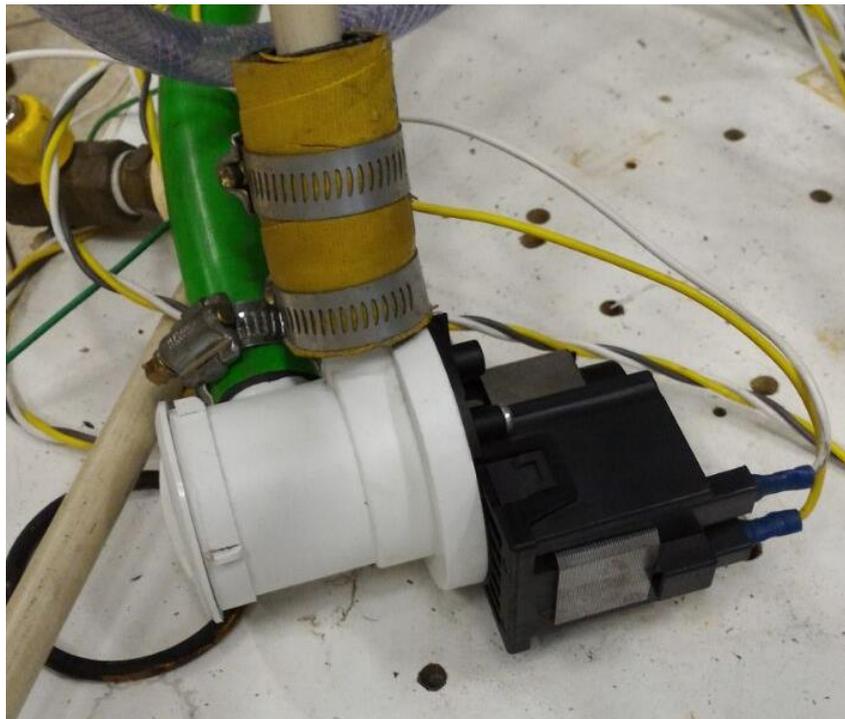


Figura 8.1 Nova bomba instalada no sistema de arrefecimento

Os testes seguintes foram realizados sobre o sistema de movimentação da mesa, analisando o movimento dos motores em Y, Z e θ . O motor do ângulo ϕ não pode ser testado inicialmente, pelo aguardo de seu novo driver de acionamento para então possível realização dos testes.

Os resultados dos testes iniciais foram promissores, os motores respondiam conforme o esperado. Porém, notou-se algumas complicações para alguns casos. Por exemplo, existem algumas regiões no fuso Z, provavelmente devido a um certo grau de empenamento do fuso, em que ocorre um pequeno deslizamento da carga pelo fuso.

Também foi possível notar que a tocha não alcançava exatamente o centro da mesa ao ser comandada para ir para o ponto zero, conforme a Fig. 8.2. Isso se deve as distâncias ainda existentes nos fins de curso em relação a mesa e a parede do fuso, além de ser bem improvável de que a tocha seja posicionada perfeitamente sobre o suporte. Para solucionar esse problema, foi implementado um modo manual de movimentação dos eixos, para ajustar os erros existentes no zeramento.

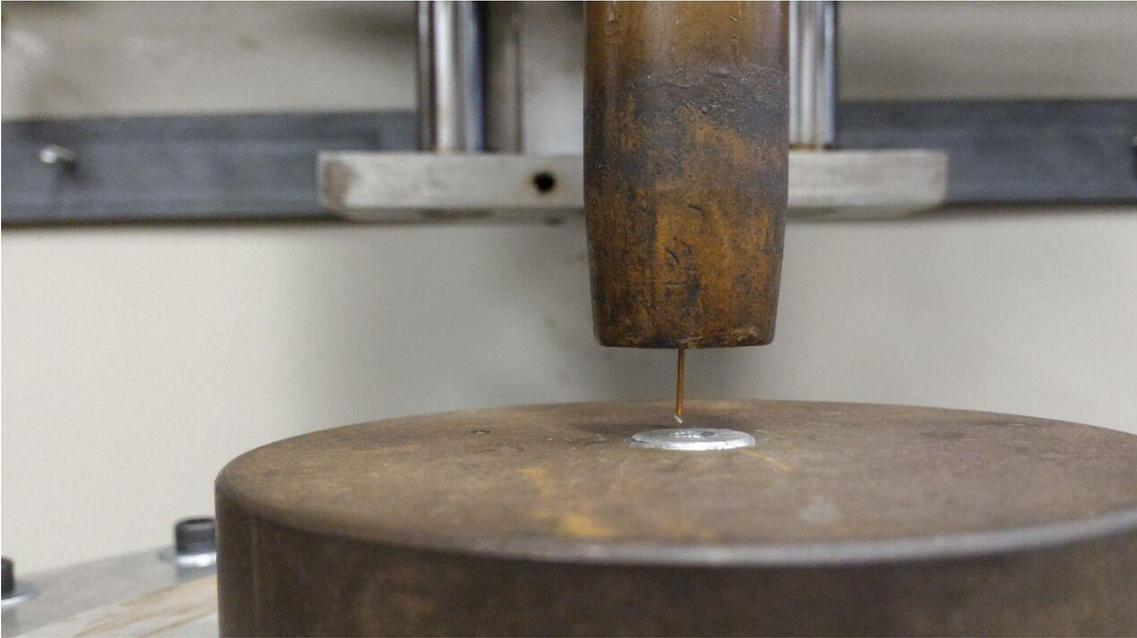


Figura 8.2 Ajuste do zeramento da tocha

Outro problema notado inicialmente é o fato de que a movimentação em Y e Z não acompanhavam corretamente a movimentação em θ . Esse fato ocorria devido a não linearidade dos senos e cossenos envolvidos nos cálculos das movimentações de Y e Z, junto ao fato de que a volta era composta de 1 só ponto pela mesma. A correção desse problema se deu ao dividir a volta em vários pedaços, pois quanto maior o número de pontos pela volta, menor é o efeito da não linearidade. Dividindo a volta em 10 pedaços, notou-se uma melhora expressiva do problema.

Outro fator importante notado durante a execução dos testes de movimentação, foi o fato de que na movimentação em θ , o motor utilizado não suportava superar ângulos acima de 45° , por causa do alto torque gerado pelo desbalanceamento do centro de massa em relação ao eixo de rotação. Esse desbalanceamento pode ser corrigido diminuindo o peso do sistema abaixo do eixo de rotação ou aumentando a distância d_2 . Porém, quanto maior for a distância d_2 maior é a limitação do tamanho da peça. E a área de trabalho do robô já é bastante limitada, devido não somente a essa distância d_2 , como também ao tamanho pequeno dos fusos. Esses fatores limitam as dimensões da peça para 60 mm de raio e 100 mm de altura.

Um problema importante notado foi a existência de uma folga no redutor conectado ao motor θ . Essa folga gera uma grande interferência na movimentação em θ para alguns casos. Com isso, foram analisadas algumas maneiras para tentar solucionar esse problema.

Uma solução é utilizar uma mola de torção no eixo para manter os dentes das engrenagens do redutor sempre em contato. Na seção 5.4.3, o torque máximo para esse eixo foi calculado em 11.35 Nm antes da redução, então a mola deve manter o eixo tensionado acima desse valor durante toda a movimentação. Uma solução mais simples é utilizar uma polia presa ao eixo e uma massa pendurada para torcê-la e gerar esse torque (Fig. 8.3). Essa

solução, além de mais simples de implementar, mantém um torque constante no eixo, ao contrário da mola.

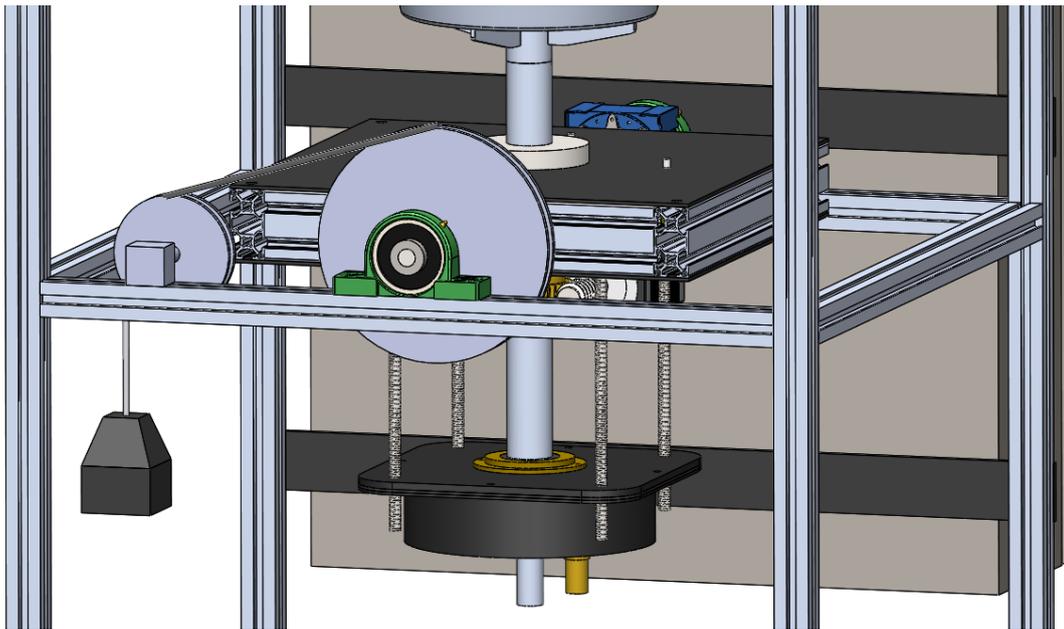


Figura 8.3 Sistema de travamento da folga do redutor.

Para uma polia com 100 mm de raio, a massa pendurada deve ser:

$$m = \frac{11.35}{0.1 \cdot 9.78} = 11.6 \text{ kg}$$

Notou-se também, que nos casos em que a aceleração teve um valor um pouco maior, houve certa dificuldade de movimentação dos motores. Ao realizar um estudo mais detalhado, notou-se que existem casos que a aceleração adquire valores altos, e conseqüentemente, certos motores não suportariam o alto torque gerado. Com isso, observou-se a necessidade de se implementar uma curva de aceleração nos motores, a qual diminui drasticamente o torque necessitado pelos motores para os casos mais críticos, solucionando esse problema.

Infelizmente, não foi possível realizar testes utilizando a máquina de solda devido à ausência do cabo DB-50, o qual fazia a conexão do ROBOT INTERFACE com o computador.

Os testes finais foram feitos utilizando o funcionamento do sistema quase que por completo, com a única exceção da seção de soldagem. Os resultados dos últimos testes foram agradáveis. O sistema de movimentação dos motores estava funcionando corretamente, e o sistema de arrefecimento aparentemente também. Porém, devido a ausência de soldagem, não há como saber a eficiência do sistema de arrefecimento, já que não há aquecimento do sistema.

Foi adicionado um recurso no LabVIEW para poder visualizar o perfil da peça sendo construída, conforme a Figura 8.4.

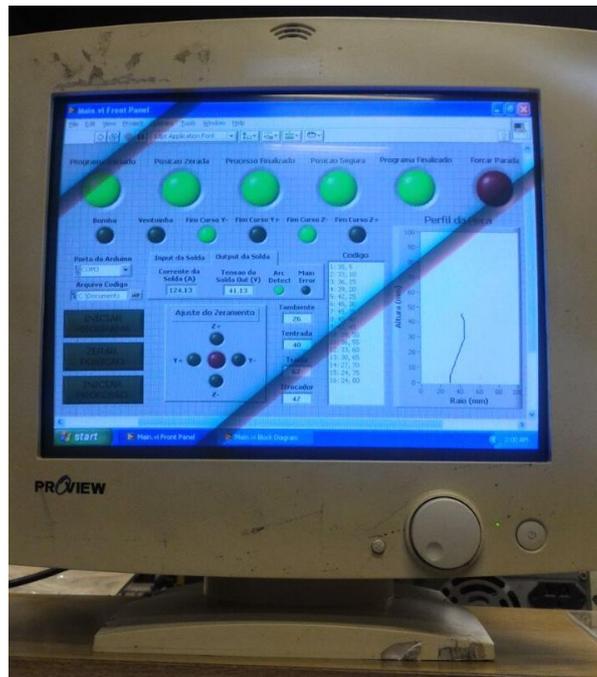


Figura 8.4 Painel do LABVIEW com perfil da peça

Entretanto, alguns problemas ainda são pertinentes, e para o funcionamento completo e correto do sistema, esses devem ser resolvidos. Um dos problemas é o fato de que o Arduino, em algumas ocasiões, perde as informações que deveriam ser lidas, e o sistema fica travado em alguma das voltas durante sua execução. Outro problema, também relacionado ao Arduino, é o fato de que as voltas são divididas em vários pontos, e devido aos atrasos de transmissão e de processamento do Arduino, existe um tempo de atraso entre cada pedaço de volta. Esse atraso não deveria ocorrer, pois o processo deveria permanecer contínuo durante toda a sua execução, para melhor precisão do processo de soldagem.

Outro problema existente é a leitura digital da vazão pelo hidrômetro, o qual pode ser visto na Figura 8.5. O hidrômetro envia a informação de vazão por meio de pulsos digitais, assim, a vazão é determinada pela frequência desses pulsos. Para a leitura desse sinal é necessário utilizar os dois contadores da placa NI, porém, os canais digitais já estão sendo utilizados por outros dispositivos, impossibilitando, assim, o uso digital do hidrômetro. Contudo, a leitura visual da vazão no hidrômetro ainda é possível.



Figura 8.5 Hidrômetro digital.

9. CONCLUSÃO

Com este trabalho, foi possível utilizar diversos dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de maneira integrada com o objetivo de produzir um sistema mecatrônico. O trabalho envolveu a concepção e projeto mecânico do sistema, controle do sistema de movimentação e arrefecimento e integração do projeto como um todo.

Viu-se que é possível realizar a movimentação da tocha pelos eixos Y e Z com simples motores de passo, os quais são relativamente fáceis de se obter e utilizar, se comparado a outros tipos de motores. Além disso, foi possível compreender melhor o processo de escolha dos motores e drivers a serem utilizados. Tendo em vista que existe uma grande variedade de possíveis escolhas.

Também foi possível observar que o LABVIEW é um software poderoso para realizar o controle de um processo como o desse trabalho, pois esse possui uma vasta gama de ferramentas poderosas que podem ser utilizadas, além de possuir uma grande facilidade em se comunicar com o sistema, que nesse caso, foi feito utilizando a placa de aquisição NI6229.

Notou-se também que o Arduino, ou até mesmo um micro controlador menos potente, é capaz de realizar o acionamento de diversos motores simultaneamente. Utilizar o Arduino para realizar essa tarefa foi uma alternativa simples e barata diante dos problemas.

Além disso, viu-se como são feitos os diversos processos de fabricação e montagem de peças, as quais foram utilizadas no projeto, em diversos momentos várias escolhas tiveram que ser feitas de maneira a deixar o projeto mais simples e barato de se construir.

Notou-se também a importância de realizar diversos testes para cada etapa do projeto, isso facilita o encontro de problemas e conseqüentemente a possível solução dos mesmos. Além disso, é de extrema importância a devida documentação sobre os procedimentos realizados no projeto. Isso para facilitar o progresso de trabalhos futuros e pela organização em si do trabalho.

Propostas para trabalhos futuros:

- Implementação do sistema de contrapeso para resolver a folga do redutor.
- Aumento da área de trabalho pela extensão dos fusos.
- Adição do movimento da tocha em X, para a fabricação de peças com novas geometrias.
- Implementação do sistema de solda com a ROBOT INTERFACE no sistema.
- Mudar a forma de acionamento dos motores, devido aos problemas do Arduino já mencionados anteriormente.
- Estudo da capacidade da bancada.
- Estudo sobre a eficiência do sistema de arrefecimento.
- Selecionar um motor mais apropriado para o movimento em θ .
- Reduzir o tamanho do eixo da panela, de maneira reduzir o desbalanceamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MONTERO, M.; ROUNDY, S.; ODELL, D.; AHN, S.; WRIGHT, P, K. **Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments**. University of California.; Gyeongsang National University.
- [2] Tecnologia FDM. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- [3] MIG Welding: The Basics for Mild Steel. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/mig-welding-the-basics-for-mild-steel>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- [4] Gas metal arc welding. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_metal_arc_welding>. Acesso em: 23 jun. 2016.
- [5] SENAI-SP. Apostila: **Robótica**. São Paulo, 2003.
- [6] SENAI-ES. Apostila: **Noções básicas de elementos de máquinas**. Espírito Santo, 1996.
- [7] FORTES, C. Apostila: **Soldagem MIG/MAG**. São Paulo, 2005.
- [8] 3D Printing basics free beginners guide. Disponível em: <<http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- [9] HIBELLER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- [10] SOARES, L. R. Notas de Aula: **Instrumentação de Controle**. UnB - 2016.
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS (Org.), **Aprenda LabVIEW**. Austin, 2011.
- [12] CAMPOS, R. F. E. **Desenvolvimento e Implementação em LabVIEW de Monitoramento e Controle dos Sistemas de Arrefecimento e Movimentação de uma Bancada Experimental para Soldagem 3D**. 105 f. Trabalho de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- [13] FRAGA, F. F. (2013). **Estudo Numérico e Experimental dos Processos de Transferência de Calor em Prototipagem Rápida por Soldagem a Arco**. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM – 059 A/13, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.
- [14] RODRIGUES, R. S., (2012). **Integração dos Sistemas de Controle de Movimento e de Arrefecimento de uma Bancada Experimental para Soldagem 3D**. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Publicação FT.TG-nº 12, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 64p.
- [15] FAMAK (Org.), **Catálogo de perfis modulares e acessórios**. Brasil, 2015.
- [16] Heat exchanger. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_exchanger>. Acesso em: 23 jun. 2016.

- [17] SHIGLEY, J. E., **Elementos de Máquinas**, Vol. 2, 3ed., LTC, Rio de Janeiro, 1984.
- [18] RIBEIRO, Fernando, NORRISH, John, MCMASTER, R.S. **Practical Case Of Rapid Prototyping Using Gas Metal Arc Welding**. Cranfield University, 2000.
- [19] WYLEN, G. J. V.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- [20] NIKU, S. B. **Introdução à robótica: análise, controle, aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, 2013.
- [21] O-ring. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/O-ring>>. Acesso em: 23 jun. 2016.
- [22] WHITE, F.M. **Fluid Mechanics**. 7. Ed. McGraw-Hill, New York, 2011.

ANEXO A – TABELAS E CURVAS DE FLUIDOS

Material	Condition	ε		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	±60
	Stainless, new	0.000007	0.002	±50
	Commercial, new	0.00015	0.046	±30
	Riveted	0.01	3.0	±70
	Rusted	0.007	2.0	±50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	±50
	Wrought, new	0.00015	0.046	±20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	±40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	±50
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	±50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	±60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	±60
	Rough	0.007	2.0	±50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	±60
Wood	Stave	0.0016	0.5	±40

Figura A.1 Tabela de rugosidade absoluta por material [22].

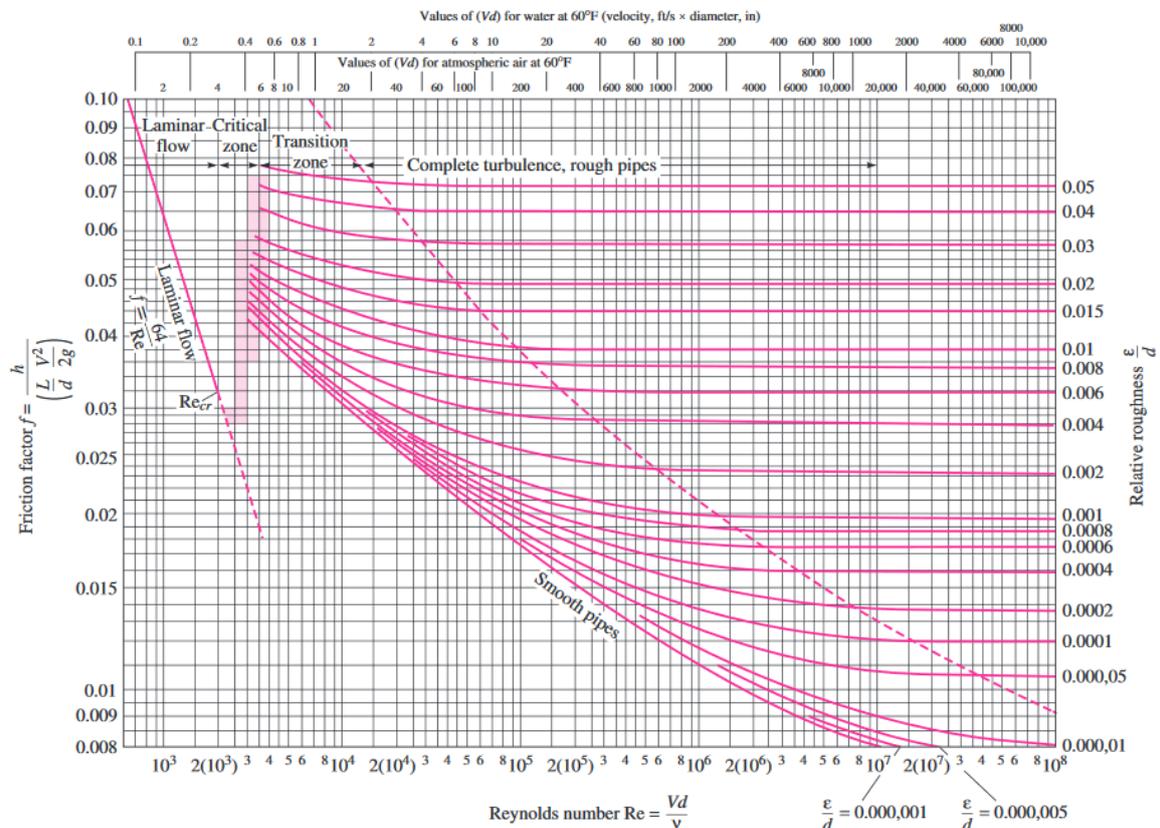


Figura A.2 Tabela de Moody [22].

b/a	$f Re_{D_h}$	$D_{eq}/D_h = 1/\zeta$
0.0	64.0	1.000
0.00001	70.09	0.913
0.0001	71.78	0.892
0.001	74.68	0.857
0.01	80.11	0.799
0.05	86.27	0.742
0.1	89.37	0.716
0.2	92.35	0.693
0.4	94.71	0.676
0.6	95.59	0.670
0.8	95.92	0.667
1.0	96.0	0.667

Figura A.3 Coeficientes de atrito para anéis concêntricos [22].

	Nominal diameter, in									
	Screwed					Flanged				
	$\frac{1}{2}$	1	2	4	1	2	4	8	20	
Valves (fully open):										
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5	
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03	
Swing check	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0	
Elbows:										
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29						
45° long radius					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14	
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21	
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10	
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20	
180° long radius					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10	
Tees:										
Line flow	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07	
Branch flow	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41	

Figura A.4 Coeficientes de resistência para válvulas, joelhos e têes [22].

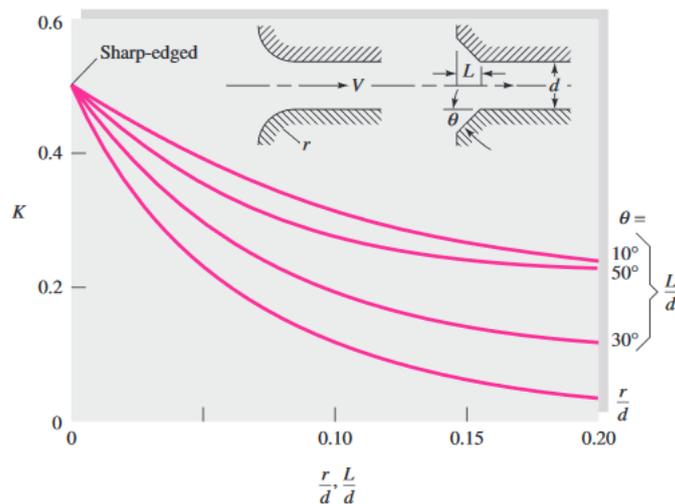


Figura A.5 Coeficientes de resistência de entrada e saída [22].

APÊNDICE A – CÓDIGO DO ARDUINO

```
#define fastWrite(_pin_, _state_) ( _pin_ < 8 ? (_state_ ? PORTD |= 1 << _pin_ : PORTD &= ~(1 << _pin_)) :  
(_state_ ? PORTB |= 1 << (_pin_ -8) : PORTB &= ~(1 << (_pin_ -8) )))
```

```
//define numero de passos por volta para todos motores  
float passo = 400;
```

```
float delayLento = 0;  
float delayMedioLento = 0;  
float delayMedioRapido = 0;  
float delayRapido = 0;  
float pulsoLento = 0;  
float pulsoMedioLento = 0;  
float pulsoMedioRapido = 0;  
float pulsoRapido = 0;  
float relacaoRMR = 0;  
float relacaoRMRaux = 0;  
float relacaoRML = 0;  
float relacaoRMLaux = 0;  
float relacaoRL = 0;  
float relacaoRLaux = 0;  
float delayA = 0;  
float pulsoA = 0;  
float delayB = 0;  
float pulsoB = 0;  
float delayC = 0;  
float pulsoC = 0;  
float delayD = 0;  
float pulsoD = 0;  
int mA = 0; //porta para motor mais lento  
int mB = 0; //porta para motor medio lento  
int mC = 0; //porta para motor medio rapido  
int mD = 0; //porta para motor mais rapido
```

```
void setup() {  
  pinMode(13, OUTPUT); //motor do raio R  
  pinMode(12, OUTPUT); //motor da altura H  
  pinMode(11, OUTPUT); //motor do angulo Theta  
  pinMode(10, OUTPUT); //motor do angulo Beta  
  Serial.begin(9600);  
}
```

```
char dado[100]=""; //string que recebe a linha  
char aux[30]=""; //string para armazenar cada numero
```

```
void loop() {  
  int i=0;  
  int j=0;  
  int k=0;  
  int fim=0;  
  int leu=0;  
  float freq[4]={0,0,0,0}; //frequencia de cada motor em rpm  
  float tempo=0; //tempo de acionamentos dos motores
```

```
/*  
*****LEITURA DA LINHA PELA PORTA SERIAL*****  
*/
```

```
//ESPERA DADOS NO BUFFER DE ENTRADA  
if (Serial.available()>0) {  
  while (fim==0) {  
    if (Serial.available()>0){  
      dado[i] = (char)Serial.read();  
      if (dado[i]!=';'){  
        dado[i]='\0';  
        fim=1;  
      }  
    }  
  }  
}
```

```

    }
    i++;
  }
}

//VERIFICA SE O DADO TEM TAMANHO ACEITAVEL
if (strlen(dado)>10) {
  for (i=0;i<4;i++) {
    while (dado[j]!=' ') {
      aux[k]=dado[j];
      k++;
      j++;
    }
    j++;
    aux[k]='\0';
    k=0;
    freq[i]=atof(aux);
  }
  while (dado[j]!='\0') {
    aux[k]=dado[j];
    k++;
    j++;
  }
  aux[k]='\0';
  tempo=atof(aux);
  leu=1;
}
}

/*****SE UMA LINHA FOI LIDA, CALCULA E ACIONA OS MOTORES*****/
/*****SE UMA LINHA FOI LIDA, CALCULA E ACIONA OS MOTORES*****/
/*****SE UMA LINHA FOI LIDA, CALCULA E ACIONA OS MOTORES*****/

freq[0]=freq[0]/1000000;
freq[1]=freq[1]/1000000;
freq[2]=freq[2]/1000000;
freq[3]=freq[3]/1000000;
tempo=tempo/1000000;

if (leu==1) {

  //CALCULO DOS DELAYS ENTRE OS PULSOS E NÚMERO DE PULSOS
  if (freq[0]==0) {
    delayA=1E14;
    pulsoA=1;
  }
  else {
    delayA=0.7*(1000000/2)/(passo*freq[0]/60);
    pulsoA=passo*tempo*freq[0]/60;
  }

  delayB=0.7*(1000000/2)/(passo*freq[1]/60);
  pulsoB=passo*tempo*freq[1]/60;

  if (freq[2]==0) {
    delayC=1E13;
    pulsoC=1;
  }
  else {
    delayC=0.7*(1000000/2)/(passo*freq[2]/60);
    pulsoC=passo*tempo*freq[2]/60;
  }

  if (freq[3]==0) {
    delayD=1E12;
    pulsoD=1;
  }
  else {
    delayD=0.7*(1000000/2)/(passo*freq[3]/60);
    pulsoD=passo*tempo*freq[3]/60;
  }
}

```

```
}
```

```
/*  
*****ORDENAMENTO DOS MOTORES POR VELOCIDADES*****  
*/
```

```
//MOTOR A MENOR VELOCIDADE  
if (delayA>delayB && delayA>delayC && delayA>delayD) {  
  delayLento=delayA;  
  pulsoLento=pulsoA;  
  mA=13;  
  if (delayB>delayC && delayB>delayD) { //B 2 MENOR  
    delayMedioLento=delayB;  
    pulsoMedioLento=pulsoB;  
    mB=12;  
    if (delayC>delayD) { //C 3 MENOR (1234)  
      delayMedioRapido=delayC;  
      pulsoMedioRapido=pulsoC;  
      mC=11;  
      delayRapido=delayD;  
      pulsoRapido=pulsoD;  
      mD=10;  
    }  
    else { //D 3 MENOR (1243)  
      delayMedioRapido=delayD;  
      pulsoMedioRapido=pulsoD;  
      mC=10;  
      delayRapido=delayC;  
      pulsoRapido=pulsoC;  
      mD=11;  
    }  
  }  
  else { //B 3 ou 4 MENOR  
    if (delayC>delayB && delayC>delayD) { //C 2 MENOR  
      delayMedioLento=delayC;  
      pulsoMedioLento=pulsoC;  
      mB=11;  
      if (delayB>delayD) { //B 3 MENOR (1324)  
        delayMedioRapido=delayB;  
        pulsoMedioRapido=pulsoB;  
        mC=12;  
        delayRapido=delayD;  
        pulsoRapido=pulsoD;  
        mD=10;  
      }  
      else { //D 3 MENOR (1342)  
        delayMedioRapido=delayD;  
        pulsoMedioRapido=pulsoD;  
        mC=10;  
        delayRapido=delayB;  
        pulsoRapido=pulsoB;  
        mD=12;  
      }  
    }  
    else { //D 2 MENOR  
      delayMedioLento=delayD;  
      pulsoMedioLento=pulsoD;  
      mB=10;  
      if (delayB>delayC) { //B 3 MENOR (1423)  
        delayMedioRapido=delayB;  
        pulsoMedioRapido=pulsoB;  
        mC=12;  
        delayRapido=delayC;  
        pulsoRapido=pulsoC;  
        mD=11;  
      }  
      else { //C 3 MENOR (1432)  
        delayMedioRapido=delayC;  
        pulsoMedioRapido=pulsoC;  
      }  
    }  
  }  
}
```

```

    mC=11;
    delayRapido=delayB;
    pulsoRapido=pulsoB;
    mD=12;
  }
}
}
}

//MOTOR B MENOR VELOCIDADE
if (delayB>delayA && delayB>delayC && delayB>delayD) {
  delayLento=delayB;
  pulsoLento=pulsoB;
  mA=12;
  if (delayA>delayC && delayA>delayD) { //A 2 MENOR
    delayMedioLento=delayA;
    pulsoMedioLento=pulsoA;
    mB=13;
    if (delayC>delayD) { //C 3 MENOR (2134)
      delayMedioRapido=delayC;
      pulsoMedioRapido=pulsoC;
      mC=11;
      delayRapido=delayD;
      pulsoRapido=pulsoD;
      mD=10;
    }
  }
  else { //D 3 MENOR (2143)
    delayMedioRapido=delayD;
    pulsoMedioRapido=pulsoD;
    mC=10;
    delayRapido=delayC;
    pulsoRapido=pulsoC;
    mD=11;
  }
}
else { //A 3 ou 4 MENOR
  if (delayC>delayA && delayC>delayD) { //C 2 MENOR
    delayMedioLento=delayC;
    pulsoMedioLento=pulsoC;
    mB=11;
    if (delayA>delayD) { //A 3 MENOR (2314)
      delayMedioRapido=delayA;
      pulsoMedioRapido=pulsoA;
      mC=13;
      delayRapido=delayD;
      pulsoRapido=pulsoD;
      mD=10;
    }
  }
  else { //D 3 MENOR (2341)
    delayMedioRapido=delayD;
    pulsoMedioRapido=pulsoD;
    mC=10;
    delayRapido=delayA;
    pulsoRapido=pulsoA;
    mD=13;
  }
}
else { //D 2 MENOR
  delayMedioLento=delayD;
  pulsoMedioLento=pulsoD;
  mB=10;
  if (delayA>delayC) { //A 3 MENOR (2413)
    delayMedioRapido=delayA;
    pulsoMedioRapido=pulsoA;
    mC=13;
    delayRapido=delayC;
    pulsoRapido=pulsoC;
    mD=11;
  }
  else { //C 3 MENOR (2431)

```

```

    delayMedioRapido=delayC;
    pulsoMedioRapido=pulsoC;
    mC=11;
    delayRapido=delayA;
    pulsoRapido=pulsoA;
    mD=13;
}
}
}
}

//MOTOR C MENOR VELOCIDADE
if (delayC>delayA && delayC>delayB && delayC>delayD) {
    delayLento=delayC;
    pulsoLento=pulsoC;
    mA=11;
    if (delayA>delayB && delayA>delayD) { //A 2 MENOR
        delayMedioLento=delayA;
        pulsoMedioLento=pulsoA;
        mB=13;
        if (delayB>delayD) { //B 3 MENOR (3124)
            delayMedioRapido=delayB;
            pulsoMedioRapido=pulsoB;
            mC=12;
            delayRapido=delayD;
            pulsoRapido=pulsoD;
            mD=10;
        }
        else { //D 3 MENOR (3142)
            delayMedioRapido=delayD;
            pulsoMedioRapido=pulsoD;
            mC=10;
            delayRapido=delayB;
            pulsoRapido=pulsoB;
            mD=12;
        }
    }
    else { //A 3 ou 4 MENOR
        if (delayB>delayA && delayB>delayD) { //B 2 MENOR
            delayMedioLento=delayB;
            pulsoMedioLento=pulsoB;
            mB=12;
            if (delayA>delayD) { //A 3 MENOR (3214)
                delayMedioRapido=delayA;
                pulsoMedioRapido=pulsoA;
                mC=13;
                delayRapido=delayD;
                pulsoRapido=pulsoD;
                mD=10;
            }
            else { //D 3 MENOR (3241)
                delayMedioRapido=delayD;
                pulsoMedioRapido=pulsoD;
                mC=10;
                delayRapido=delayA;
                pulsoRapido=pulsoA;
                mD=13;
            }
        }
        else { //D 2 MENOR
            delayMedioLento=delayD;
            pulsoMedioLento=pulsoD;
            mB=10;
            if (delayA>delayB) { //A 3 MENOR (3412)
                delayMedioRapido=delayA;
                pulsoMedioRapido=pulsoA;
                mC=13;
                delayRapido=delayB;
                pulsoRapido=pulsoB;
                mD=12;
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else { //B 3 MENOR (3421)
        delayMedioRapido=delayB;
        pulsoMedioRapido=pulsoB;
        mC=12;
        delayRapido=delayA;
        pulsoRapido=pulsoA;
        mD=13;
    }
}
}
}

//MOTOR D MENOR VELOCIDADE
if (delayD>delayA && delayD>delayB && delayD>delayC) {
    delayLento=delayD;
    pulsoLento=pulsoD;
    mA=10;
    if (delayA>delayB && delayA>delayC) { //A 2 MENOR
        delayMedioLento=delayA;
        pulsoMedioLento=pulsoA;
        mB=13;
        if (delayB>delayC) { //B 3 MENOR (4123)
            delayMedioRapido=delayB;
            pulsoMedioRapido=pulsoB;
            mC=12;
            delayRapido=delayC;
            pulsoRapido=pulsoC;
            mD=11;
        }
        else { //C 3 MENOR (4132)
            delayMedioRapido=delayC;
            pulsoMedioRapido=pulsoC;
            mC=11;
            delayRapido=delayB;
            pulsoRapido=pulsoB;
            mD=12;
        }
    }
    else { //A 3 ou 4 MENOR
        if (delayB>delayA && delayB>delayC) { //B 2 MENOR
            delayMedioLento=delayB;
            pulsoMedioLento=pulsoB;
            mB=12;
            if (delayA>delayC) { //A 3 MENOR (4213)
                delayMedioRapido=delayA;
                pulsoMedioRapido=pulsoA;
                mC=13;
                delayRapido=delayC;
                pulsoRapido=pulsoC;
                mD=11;
            }
            else { //C 3 MENOR (4231)
                delayMedioRapido=delayC;
                pulsoMedioRapido=pulsoC;
                mC=11;
                delayRapido=delayA;
                pulsoRapido=pulsoA;
                mD=13;
            }
        }
        else { //C 2 MENOR
            delayMedioLento=delayC;
            pulsoMedioLento=pulsoC;
            mB=11;
            if (delayA>delayB) { //A 3 MENOR (4312)
                delayMedioRapido=delayA;
                pulsoMedioRapido=pulsoA;
                mC=13;
                delayRapido=delayB;
            }
        }
    }
}

```

```

        pulsoRapido=pulsoB;
        mD=12;
    }
    else { //B 3 MENOR (4321)
        delayMedioRapido=delayB;
        pulsoMedioRapido=pulsoB;
        mC=12;
        delayRapido=delayA;
        pulsoRapido=pulsoA;
        mD=13;
    }
}
}
}

/*****
/*****ACIONAMENTO DOS MOTORES*****/
/*****/

//RELACOES ENTRE OS PULSOS
relacaoRMR = pulsoRapido/pulsoMedioRapido;
relacaoRML = pulsoRapido/pulsoMedioLento;
relacaoRL = pulsoRapido/pulsoLento;
relacaoRMRaux=relacaoRMR;
relacaoRMLaux=relacaoRML;
relacaoRLaux=relacaoRL;

//LACO PARA O MOTOR COM MAIS PULSOS
for (float x=0;x<pulsoRapido;x++) {
    fastWrite(mD, HIGH);
    delayMicroseconds(delayRapido);
    fastWrite(mD, LOW);
    delayMicroseconds(delayRapido);
    if ((relacaoRMRaux/x < 1) && (freq[3]!=0)) {
        fastWrite(mC, HIGH);
        fastWrite(mC, LOW);
        relacaoRMRaux+=relacaoRMR;
    }
    if ((relacaoRMLaux/x < 1) && (freq[2]!=0) && (freq[3]!=0)) {
        fastWrite(mB, HIGH);
        fastWrite(mB, LOW);
        relacaoRMLaux+=relacaoRML;
    }
    if ((relacaoRLaux/x < 1) && (freq[0]!=0) && (freq[2]!=0) && (freq[3]!=0)) {
        fastWrite(mA, HIGH);
        fastWrite(mA, LOW);
        relacaoRLaux+=relacaoRL;
    }
}
}

//CONFIRMACAO DE LINHA EXECUTADA
Serial.println("DONE");

}

}

```