



Carlos Henrique Sincak

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DE UMA
MÁQUINA CNC COM PLATAFORMA LIVRE - ARDUINO**

Horizontina

2015

Carlos Henrique Sincak

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DE UMA
MÁQUINA CNC COM PLATAFORMA LIVRE - ARDUINO**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2015

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Projeto, construção e funcionamento de uma máquina CNC com plataforma
livre - Arduino”**

Elaborada por:

Carlos Henrique Sincak

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 24/11/2015
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Esp. Felipe Dal Piva Ely
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Me. Valtair de Jesus Alves
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2015**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus. Aos pais, avós e demais familiares pelo incentivo e apoio. Aos colegas, amigos e professores que tiveram papel fundamental na elaboração do presente trabalho.

“Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui, nunca desista de seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser vitoriosa. ”

Albert Einstein

RESUMO

Frente à evolução tecnológica mundial é impossível imaginar um processo de fabricação rápido e com qualidade excepcional sem considerar a existência de uma máquina CNC nesse processo, sem a necessidade de grande intervenção humana. Diante disso, este trabalho tem por objetivo projetar, construir e testar uma CNC com plataforma livre - Arduino. Para atendimento dos objetivos propostos foi elaborada uma metodologia baseada na divisão das tarefas pertinentes à elaboração do projeto, integrando componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos em um só equipamento e demonstrando a possibilidade de automação dos processos de fabricação, com a utilização de componentes acessíveis. A partir da construção da máquina CNC com plataforma livre – Arduino foi possível a realização de testes, onde se obteve resultados satisfatórios. Na construção foram utilizados componentes disponíveis na Instituição de Ensino Faculdade Horizontina. O controle eletrônico do equipamento foi efetuado com a utilização de três pontes H, um microcontrolador e um computador pessoal para a realização da interface homem-máquina durante o processo de programação. Realizou-se testes nos componentes do equipamento e, após a montagem e programação, foi efetuada a simulação de um processo de fabricação, utilizando-se uma caneta no local da ferramenta. Os resultados obtidos demonstram a eficiência da máquina CNC durante a realização das tarefas programadas. Pôde-se concluir que o projeto, a construção e os testes realizados no equipamento obtiveram êxito, pois a programação efetuada resultou em um produto final. A mudança na programação pode ser efetuada facilmente, sendo possível a utilização da máquina CNC pelos estudantes, integrando os conhecimentos teóricos e práticos e enriquecendo os laboratórios disponibilizados pela Instituição.

Palavras-chaves:

CNC; Arduino; Projeto.

ABSTRACT

In front the global technological evolution is impossible to imagine a rapid manufacturing and exceptional quality process without considering the existence of a CNC machine in the process, without the need for major human intervention. This study aims to design, build and test a CNC with free platform - Arduino. To meet the proposed objectives was developed a methodology based on the division of tasks relevant to project design by integrating mechanical, electrical and electronic components in one box and demonstrating the possibility of automation of manufacturing processes with the use of accessible components. From the construction of CNC machine with free platform - Arduino was possible to carry out tests which yielded satisfactory results. They were used in the construction components available in the Instituição de Ensino Faculdade Horizontina. The electronic control equipment was made with the use of three H bridges, a microcontroller and a personal computer to perform the human-machine interface during the programming process. Tests were conducted on the equipment components and, after assembly and programming simulation of a manufacturing process using a pen in place of the tool. The results demonstrate the CNC machine efficiency in carrying out programmed tasks. It could be concluded that the design, construction and testing equipment were successful because the programming resulted in a final product. The change in programming can be performed easily with the possible use of CNC machine by students, integrating theoretical and practical knowledge and enriching laboratories made available by the Institution.

Keywords:

CNC ; Arduino ; Project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de movimentação CNC.	15
Figura 2: Tipos de Servomotores.	17
Figura 3: Funcionamento do “Encoder”	19
Figura 4: Fuso de esferas recirculantes.	20
Figura 5: Acoplamentos flexíveis.	22
Figura 6: Sistema de controle aberto.	23
Figura 7: Sistema de controle fechado.	23
Figura 8: Placa Microcontroladora Arduino Diecimila.	24
Figura 9: Ponte H.	25
Figura 10: Modelagem 3D do Fuso de esferas recirculantes.	26
Figura 11: Modelagem 3D do Fuso trapezoidal.	26
Figura 12: (A) Estrutura eixo Z; (B) Estrutura eixo Y.	28
Figura 13: (A) Flange de acoplamento Eixo Y e Z; (B) Guias dos barramentos.	29
Figura 14: Montagem final.	29
Figura 15: (A) Cabos de rede; (B) Botões fim de curso.	32
Figura 16: Circuito Elétrico das Pontes H.	33
Figura 17: (A) Furos alongados para alinhamento; (B) Guias de apoio eixo X.	38
Figura 18: (A) Ponte H danificada; (B) Ponte H confeccionada.	39
Figura 19: Componentes mecânicos da Máquina CNC didática.	40
Figura 20: (A) Deformação em X; (B) Deslocamento em X; (C) Tensão em X.	41
Figura 21: (A) Deformação em Y; (B) Deslocamento em Y; (C) Tensão em Y.	42
Figura 22: (A) Deformação em Z; (B) Deslocamento em Z; (C) Tensão em Z.	42
Figura 23: Ligação Elétrica.	43
Figura 24: Esquema Elétrico.	44
Figura 25: Desenho efetuado na Máquina CNC.	46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. JUSTIFICATIVA	11
1.2. OBJETIVOS.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1. HISTÓRIA DAS MÁQUINAS CNC.....	13
2.2. COMPONENTES DA MÁQUINA CNC	14
2.2.1. Motores de Acionamento	15
2.2.2. Sensor de posição	18
2.2.3. Sensor de velocidade	19
2.2.4. Fusos	20
2.2.5. Guias	21
2.2.6. Acoplamentos	21
2.3. SISTEMAS DE CONTROLE	22
2.3.1. Sistema de controle aberto	22
2.3.2. Sistema de controle fechado	23
2.4. O ARDUINO.....	23
2.5. DRIVERS.....	24
3. METODOLOGIA	26
3.1. PROJETO MECÂNICO	26
3.1.1. Análise estrutural	30
3.1.2. Processos de fabricação	30
3.2. PROJETO ELÉTRICO.....	31
3.2.1. Motores de acionamento	31
3.2.2. Fonte de alimentação	31

3.2.3. Planejamento elétrico	31
3.3. HARDWARE.....	32
3.3.1. Ponte H	32
3.3.2. Microcontrolador	33
3.3.3. Computador	34
3.4. SOFTWARE	34
3.5. TESTES EXPERIMENTAIS.....	34
3.5.1. Teste de funcionamento	34
3.5.2. Teste de movimentação	35
3.5.3. Simulação de um processo de corte	35
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE PROBLEMAS.....	37
4.1.1. Problemas mecânicos e estruturais	37
4.1.2. Problemas elétricos e eletrônicos	38
4.2. ANÁLISE VISUAL	40
4.2.1. Identificação dos componentes	40
4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL.....	41
4.4. ESQUEMA ELÉTRICO DE LIGAÇÃO	42
4.5. ANÁLISE DOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	44
4.5.1. Análise do Teste de funcionamento	44
4.5.2. Análise do teste de movimentação	45
4.5.3. Análise da simulação de um processo de corte	45
5. CONCLUSÕES	47
6. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
8. APÊNDICE A – PROGRAMA	50
9. APÊNDICE B – ANÁLISE ESTÁTICA	52
9.1. EIXO X.....	52
9.2. EIXO Y	53
9.3. EIXO Z	54
10. ANEXO A – DIMENÇÃO E TERMINAIS DE LIGAÇÃO DOS SERVOMOTORES	57

11.ANEXO B – ESQUEMA ELÉTRICO DAS PONTES H	58
12.ANEXO C – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA ROBOCORE BLACK BOARD	59

1. INTRODUÇÃO

Diante da crescente busca por diferenciais competitivos é imprescindível que as indústrias busquem tecnologias que proporcionem o aumento de produtividade levando em consideração o bem estar de seus colaboradores. Atividades que proporcionam riscos físicos são um exemplo típico da importância da intervenção de tecnologias capazes de efetuarem as operações automaticamente, com um simples toque em um botão.

Diante da busca por diferenciais competitivos surgiram as máquinas automatizadas, denominadas máquinas com controle numérico computadorizado ou, simplesmente máquinas CNC. As máquinas CNC são capazes de desempenhar operações, anteriormente desenvolvidas com a intervenção direta do operador, obtendo-se maior precisão e menor suscetibilidade à ocorrência de problemas de não conformidade dos componentes fabricados (BIGATON, 2000).

As máquinas CNC são largamente utilizadas, principalmente, na indústria metalmeccânica, em processo que demandam grande velocidade de produção e complexidade de fabricação, combinados com tolerâncias dimensionais rígidas.

Os sistemas baseados em comandos numéricos nasceram na década de 50 nos Estados Unidos da América, tendo seus estudos patrocinados pela Força Aérea Americana, com o intuito da produção de componentes para aeronaves. Desde então, a evolução das máquinas CNC tem acompanhado a necessidade pela busca de rápida produção, eliminação de erros e qualidade, fatores vitais em um cenário industrial competitivo como nos dias atuais (BIGATON, 2000).

Este trabalho descreve os passos seguidos para a concretização do projeto, construção e testes de uma máquina CNC com plataforma livre - Arduino. Este dispositivo possui aplicações práticas voltadas à realização de diversas operações por parte dos estudantes de Engenharia, complementando assim os laboratórios disponibilizados pela Instituição de Ensino Faculdade Horizontina.

1.1. JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se pela relevância do tema no desenvolvimento de novas tecnologias que abandonam os processos de fabricação baseados na intervenção humana direta, contribuindo assim para o enriquecimento tecnológico e incentivando a pesquisa acerca do desenvolvimento de equipamentos automatizados.

Cabe frisar a vasta gama de aplicações das máquinas CNC, não só na indústria metalmeccânica, mas também na utilização dos conceitos para automatização de tarefas diárias que facilitam a vida humana.

Neste sentido, cabe salientar a importância do desenvolvimento de estudos que possibilitem seu uso posterior em atividades voltadas à programação e controle de máquinas automatizadas, cruzando a teoria com a prática, o que é fundamental no aprendizado e formação de profissionais capacitados.

1.2. OBJETIVOS

Considerando a necessidade de automação em processos de fabricação, o presente trabalho tem por objetivo projetar, construir e testar uma CNC com plataforma livre - Arduino. Para atingir o objetivo principal os seguintes objetivos específicos foram seguidos:

- 1- Apresentação do funcionamento de uma máquina CNC;
- 2- Apresentação dos componentes de uma máquina CNC;
- 3- Elaboração do projeto mecânico de uma máquina CNC;
- 4- Elaboração do sistema eletrônico para controle da máquina CNC;
- 5- Construção de uma máquina CNC;
- 6- Realização de testes na máquina CNC.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Machado (1986), uma máquina equipada com um sistema CNC é capaz de realizar a sequência de operações através de comandos numéricos previamente programados. Esses comandos representam o sistema de coordenadas (x, y, z) e são capazes de executar a fabricação de qualquer perfil geométrico. Com isso é possível o desenvolvimento de máquinas com grande precisão e repetibilidade, eliminando quase totalmente a intervenção humana durante o processo de fabricação.

De acordo com Santos (2001), anteriormente à automação de máquinas-ferramenta, os equipamentos convencionais dependiam exclusivamente da destreza de seus operadores, deixando de lado fatores ergonômicos como saúde e cansaço e refletindo negativamente sobre a quantidade, e principalmente, a qualidade dos produtos, além da grande quantidade de peças descartadas por apresentarem não conformidade com os padrões estabelecidos em projeto.

É impossível imaginar um processo de fabricação industrial rápido e com qualidade excepcional sem considerar a existência de uma máquina CNC nesse processo. O avanço tecnológico tem proporcionado a produção de equipamentos com precisão cada vez mais elevada possibilitando às máquinas CNC a fabricação de perfis geométricos com tolerância na ordem de milésimos de milímetros.

2.1. HISTÓRIA DAS MÁQUINAS CNC

Com a crescente necessidade de rapidez na fabricação e a busca por qualidade, visando a maior precisão geométrica, o homem passou a procurar soluções que eliminassem os erros causados por máquinas que necessitam de operação manual, surgindo então a tecnologia denominada CNC (Comando Numérico Computadorizado). O CNC permite que através de programas previamente desenvolvidos seja possível o controle de motores, que acoplados às máquinas, realizam o trabalho de movimentação dos componentes da máquina-ferramenta (BIGATON, 2000).

De acordo com Bigaton (2000) tudo teve início em 1950 quando já se dizia que a cibernética revolucionaria as máquina-ferramentas, porém ainda não se tinha ideia de como.

No conceito de Comando Numérico devemos entender o termo numérico como significando por meio ou através de números. Este conceito surgiu em meados de 1950 nos Estados Unidos da América com a colaboração da Parsons Corporation,

desenvolvedor de tecnologias para o exército americano, e da Força Aérea dos Estados Unidos, tendo como resultado o desenvolvimento de um sistema aplicado às máquinas-ferramenta para controle da posição de seus fusos através dos dados fornecidos por um computador. Entre 1955 e 1957 a Força Aérea dos Estados Unidos utilizou em suas oficinas máquinas CNC, porém, a aplicação em empresas era inviável, pois os custos eram altos e não existia experiência ou mão de obra qualificada (BIGATON, 2000).

Atualmente, nota-se grande difusão dos equipamentos CNC em indústrias, pois devido ao grande avanço tecnológico foi possível a obtenção de máquinas confiáveis, de fácil operação e custo relativamente baixo diante dos benefícios provenientes da utilização destes equipamentos a médio e longo prazo.

2.2. COMPONENTES DA MÁQUINA CNC

Os sistemas que transformam os comandos numéricos enviados pelo controlador detêm grande parte da responsabilidade pela correta execução do trabalho, possibilitando assim maior precisão e controle do processo executado pela máquina CNC. Dentre esses componentes se encontram os mecanismos de movimentação que consistem de motores, responsáveis pela transformação dos sinais elétricos em movimentos de rotação, e os fusos de rosca, responsáveis pela transformação dos movimentos circulares em movimentos lineares transmitidos à porca e conseqüentemente à mesa ou ferramenta móvel da máquina (SUH et al, 2008).

Segundo Suh et al (2008), a palavra servo teve origem do latim “*servus*” que significa algo ou alguém que realiza fielmente o comando. O CNC realiza a rotação do servomotor transmitindo esta rotação para o fuso de precisão (Figura 1 A) fazendo com que a mesa e a peça de trabalho se movimentem linearmente.

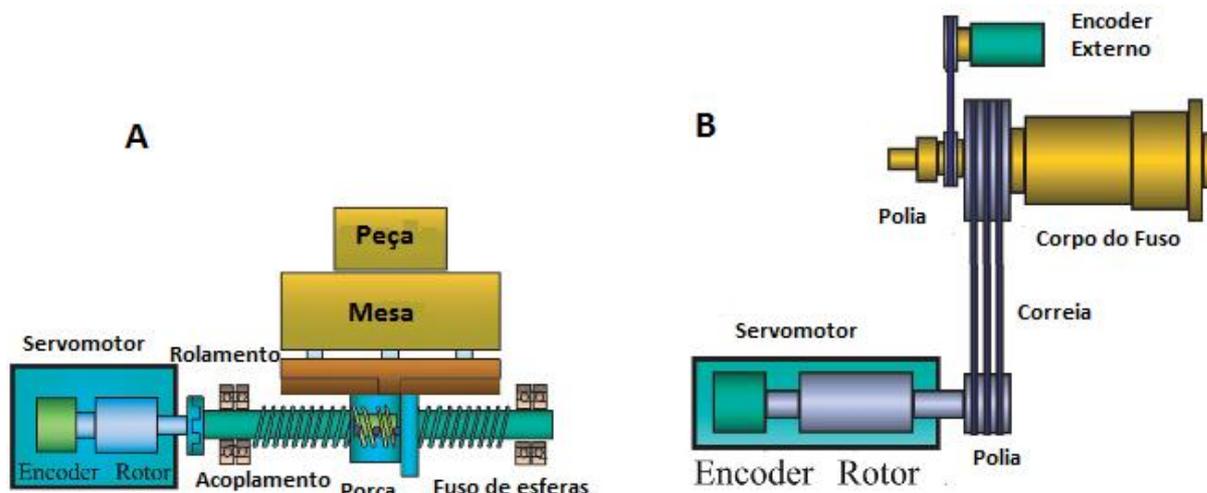


Figura 1: Sistema de movimentação CNC. Fonte: Suh et al (2008)

De acordo com Suh et al (2008) algumas máquinas CNC utilizam engrenagens ou correias para amplificar a rotação do fuso realizando usinagem em alta velocidade (Figura 1 B), porém tem se utilizado o acoplamento direto ao eixo do servomotor, possibilitando velocidades de rotação de até 10000 rpm.

2.2.1. Motores de Acionamento

Para Suh et al (2008) o termo motor de acionamento é utilizado para indicar tanto os servomotores, que movimentam as partes da máquina nos eixos de trabalho (x,y,z) quanto os motores responsáveis por executar a rotação da ferramenta ou peça em seu próprio eixo.

Devido aos elevados esforços provenientes da remoção gradual de material da peça de trabalho, é imprescindível que os motores de acionamento tenham elevado binário, ou seja, alto torque e proporcionem elevada rotação quando necessário. Portanto os motores necessitam de alto torque, grande aceleração, resposta rápida a baixas velocidades e, simultaneamente, a capacidade de controle de rotação e posição (SUH et al, 2008).

Segundo Suh et al (2008) os motores de acionamento precisam atender algumas características:

- 1- Capacidade de se adequar à carga de trabalho;
- 2- Capacidade de responder rapidamente a uma instrução;
- 3- Ter boa capacidade de aceleração e desaceleração;
- 4- Ter ampla gama de velocidades;
- 5- Capacidade de controlar a velocidade quando assim solicitado;

- 6- Capacidade de operação por longos períodos de tempo;
- 7- Capacidade de acelerar, desacelerar e parar frequentemente e rapidamente;
- 8- Ter elevado torque em todas as faixas de rotação;
- 9- Ter atrito reduzido em suas partes internas e ter precisão de rotação;
- 10- Capacidade de gerar binário (torque) suficiente para parar repentinamente;
- 11- Ser confiável e possuir uma longa vida útil;
- 12- Ter baixo custo de manutenção.

De acordo com Albert (2004), atualmente os fabricantes de máquinas CNC utilizam três diferentes tipos de motores de acionamento para movimentação dos eixos:

- 1- Motores de passos;
- 2- Servomotores DC (corrente contínua);
- 3- Servomotores AC (corrente alternada).

Os motores de passo, como o próprio nome sugere, trabalham dividindo a rotação em escala angular, onde um passo corresponde a um determinado ângulo de rotação possibilitando assim o trabalho em circuito aberto sem receber feedback do posicionamento. Isto pode afetar negativamente a precisão dimensional da peça a ser fabricada. Também é difícil encontrarmos motores de passo que compreendem alta rotação e alto torque simultaneamente, pois nos motores de passo essas duas características são inversamente proporcionais (ALBERT, 2004).

Segundo Albert (2004), os motores de passo possuem um rotor de imã permanente com o estator posicionado em volta do rotor e fixo na carcaça. O estator é enrolado de modo que o motor possua um elevado número de polos, geralmente superior a 200. Os polos são geralmente dispostos em grupos de quatro. No momento em que um polo é energizado o rotor se alinha com esse polo e permanece no lugar até o momento em que o próximo polo é energizado, o rotor passa para a nova posição. Este movimento de passos entre os polos deu origem ao nome do motor de passos.

Os motores de passo devem ter um controle rígido sobre a aceleração e desaceleração elevadas, pois o torque disponibilizado pelo motor nunca deve ultrapassar o limite, caso contrário, isso afetaria a dinâmica do movimento

interrompendo o funcionamento do motor ou reduzindo significativamente a precisão (ALBERT, 2004).

Os motores de passo podem ser controlados através de um sistema denominado micropassos. Em vez de executar a energização polo a polo o sistema de micropassos equilibra as forças entre dois polos adjacentes executando uma mudança cuidadosa de posição entre os polos e conseqüentemente girando suavemente o eixo. Esse sistema funciona para a redução de oscilações, porém o torque é drasticamente reduzido (ALBERT, 2004).

Ao contrário dos motores de passo os servomotores (Figura 2) trabalham em um circuito fechado sendo combinados a um codificador (“*encoder*”) que recebe a informação de posicionamento da máquina corrigindo-a constantemente durante a realização de uma operação. A única desvantagem que os servomotores apresentam em comparação com os motores de passo está voltada ao seu alto custo de aquisição. (ALBERT, 2004)

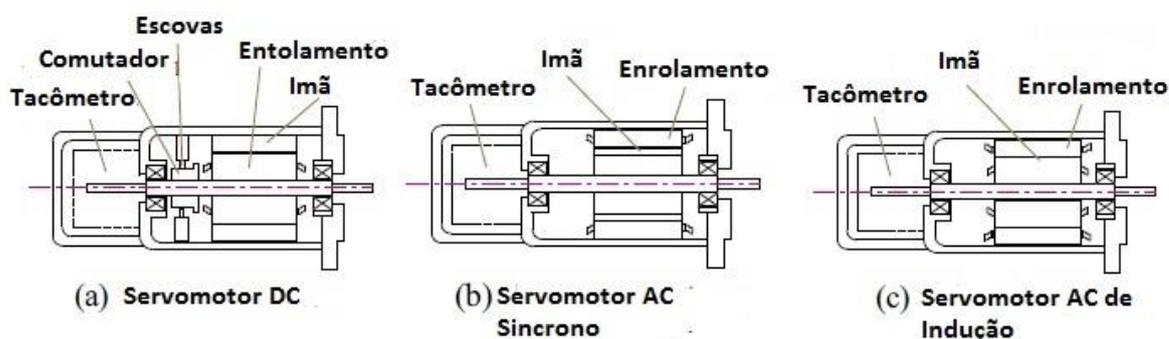


Figura 2: Tipos de Servomotores. Fonte: Suh et al (2008)

De acordo com Suh et al (2008), os servomotores AC podem ser classificados como síncronos e de indução dependendo de suas características de construção.

Nos servomotores DC, o estator é constituído por uma estrutura cilíndrica que desempenha o papel da geração do fluxo magnético no interior do motor através de ímãs fixados à carcaça. O rotor consiste em um enrolamento de fios responsáveis pela geração do campo magnético no momento em que a corrente contínua circula através das escovas. O servomotor DC possui na parte de trás, acoplado ao rotor, um pequeno enrolamento responsável pela geração de uma diferença de potencial utilizada na medição da velocidade pelo sistema controlador (SUH et al, 2008).

Para Suh et al (2008), os servomotores DC possuem ampla faixa de rotação e o torque gerado no eixo é diretamente proporcional à quantidade de corrente disponibilizada pela fonte.

Os servomotores AC síncronos, ao contrário dos servomotores DC, possuem um rotor constituído por um ímã permanente e uma bobina constituída em volta do rotor e fixada na carcaça do motor, eliminando a necessidade das escovas de contato, pois a corrente não flui pelo rotor. Além disso, os servomotores AC não possuem limitação de velocidade máxima devido às faíscas geradas pelas escovas e, por não possuírem as mesmas, podem trabalhar por longos períodos de tempo sem necessidade de manutenção. Como nos servomotores DC, os servomotores AC também possuem o mesmo sistema de detecção de velocidade acoplado ao eixo (SUH et al, 2008).

Nos servomotores AC de indução, o rotor é constituído por um núcleo de enrolamentos de material condutor formando uma bobina, outro enrolamento posicionado em volta do rotor e fixado na carcaça do motor gera uma corrente induzida no enrolamento do motor quando ocorre a passagem de corrente alternada (SUH et al, 2008).

2.2.2. Sensor de posição

Para controle da posição do equipamento é necessária a incorporação de um dispositivo denominado sensor de posição. Cada eixo da máquina deve possuir um sensor de posição acoplado.

De acordo com Suh et al (2008), o dispositivo que detecta a posição atual dos eixos da máquina é chamado de “*encoder*” ou codificador e geralmente é fixado diretamente ao eixo do motor, na parte contrária ao acoplamento com o fuso.

O “*encoder*” (Figura 3) é constituído por um disco com rasgos calibrados em torno de sua circunferência, um emissor de luz em um dos lados do disco e um receptor óptico no outro lado do disco. No momento em que a luz passa por um dos rasgos existentes no disco o receptor óptico a identifica e envia o sinal diretamente ao sistema de controle. Segundo Suh et al (2008), o “*encoder*” pode ser classificado como absoluto ou incremental de acordo com seu funcionamento.

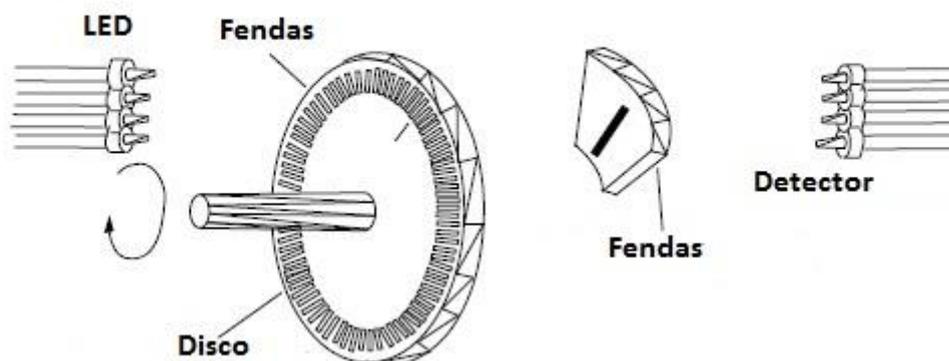


Figura 3: Funcionamento do “Encoder”. Fonte: Suh et al (2008)

O “*encoder*” do tipo incremental é de construção simples e relativamente barato, além de possuir facilidade na transmissão dos sinais, pois sua ligação é efetuada através de poucos fios. O número de pulsos de saída do “*encoder*” incremental não indica a posição absoluta da máquina, porém indica o ângulo de rotação do eixo (SUH et al, 2008).

Já o “*encoder*” do tipo absoluto possui as fendas existentes no disco que fornecem um código binário de bit de modo que a parte mais externa do disco é definida como o bit mais baixo. As fendas são dispostas em círculos concêntricos que tendem a encontrar o centro do disco. Deste modo os dados de posição são enviados ao controlador em forma de código binário, sendo possível a interrupção da eletricidade sem que o sistema perca a posição atual do eixo. O “*encoder*” absoluto apresenta um custo elevado que aumenta de acordo com a sua quantidade de bits, pois em comparação com o “*encoder*” incremental, possui maior complexidade de construção e maior número de fios para transmissão dos sinais (SUH et al, 2008).

2.2.3. Sensor de velocidade

Apesar de ser possível o controle de velocidade através dos sensores de posição, é utilizado, acoplado ao eixo do motor, um dispositivo denominado sensor de velocidade ou tacômetro. O tacômetro tem seu funcionamento baseado em um pequeno gerador que provoca uma baixa diferença de potencial entre seus terminais, essa diferença de potencial é lida e interpretada pelo sistema de controle que calcula a velocidade de acordo com a intensidade da diferença de potencial.

De acordo com Suh et al (2008), o tacômetro tem um funcionamento semelhante ao dínamo pois gera corrente contínua. O tacômetro é constituído por um

estator de imã permanente e um rotor com enrolamentos de material condutor, quando o rotor entra em rotação gera uma corrente contínua que é conduzida ao exterior do motor através de escovas, obtendo-se assim valores de tensão proporcionais à rotação.

2.2.4. Fusos

Os fusos possuem um papel de fundamental importância em um sistema CNC, pois são responsáveis pela conversão do movimento de rotação do motor em movimentos de translação linear suaves e com precisão. É inadmissível que um fuso tenha folgas elevadas, o que ocasionaria ruídos e falta de precisão da máquina.

Um fuso (Figura 4) pode ser descrito como uma barra cilíndrica rosqueada, sendo comparado a um parafuso e porca de fixação. Quando o parafuso é rosqueado a porca efetua um movimento linear derivado do movimento circular que se efetua ao rosquear.



Figura 4: Fuso de esferas recirculantes. Fonte: Santos (2001)

Segundo Santos (2001), o fuso de esferas foi desenvolvido para aumentar a precisão do sistema porca parafuso, minimizando folgas e obtendo elevado desempenho. O fuso de esferas substitui o fuso trapezoidal, muito utilizado na movimentação dos componentes em máquinas-ferramenta.

De acordo com Santos (2001), os fusos trapezoidais trabalham acoplados a uma porca trapezoidal e possibilitam o alcance de uma precisão de 0,01 mm, sendo esta uma precisão significativamente apurada, porém os fusos de esferas

recirculantes são capazes de realizar a mesma tarefa que os fusos trapezoidais, tendo inúmeras vantagens, por exemplo a precisão de 0,001 mm.

Dentre as demais vantagens provenientes da utilização dos fusos de esferas recirculantes Santos (2001) explana que os fusos trapezoidais possuem um rendimento mecânico de no máximo 50% enquanto que os fusos de esferas apresentam rendimento mecânico de até 98%, além de possuírem uma vida útil mais longa, necessitam de menor potência de acionamento, atrito reduzido, construção simples, possibilitam maior velocidade de translação, apresentam menor aquecimento e devido ao seu alto rendimento não possibilitam o auto bloqueio.

2.2.5. Guias

Apesar do alto rendimento e das inúmeras vantagens do fuso de esferas recirculantes não seria possível a sua utilização sem a utilização das guias lineares ou barramentos de deslizamento.

De acordo com Nascimento (2011), os barramentos e guias representam elementos de vital importância nas máquinas, tanto CNC quanto convencionais, pois detêm grande responsabilidade sobre fatores como folgas excessivas e vibrações que diminuem a precisão do equipamento. Os barramentos e guias possuem a responsabilidade de sustentar os carros da máquina e orientar seu deslocamento de modo que as folgas sejam mínimas e o deslocamento ocorra de forma suave e sem vibrações excessivas, para tanto, os barramentos são constituídos de barras rígidas conexiados em aço de alta resistência às deformações.

2.2.6. Acoplamentos

De modo a minimizar os efeitos provocados pelo desalinhamento de eixos foram criados os acoplamentos. O acoplamento é utilizado na junção do eixo do fuso de esferas com o eixo do motor de acionamento, pois o centro de seus eixos deve ser exatamente coincidente. Entretanto, na prática, é impossível a junção de dois eixos alinhados perfeitamente, para tanto, foram concebidos os acoplamentos flexíveis (Figura 5) que minimizam as vibrações provenientes do desalinhamento de dois eixos em rotação facilitando a junção do fuso ao motor de acionamento (SUH et al, 2008).



Figura 5: Acoplamentos flexíveis. Fonte: Suh et al, 2008

2.3. SISTEMAS DE CONTROLE

De acordo com Suh et al (2008) os sistemas de controle das máquinas CNC são compostos por três malhas de controle independentes para cada eixo da máquina:

- 1- Sistema de controle de posição;
- 2- Sistema de controle de velocidade;
- 3- Sistema de controle de corrente.

Os sistemas de controle compreendem os sensores de posição (encoder), os sensores de velocidade (tacômetro) e o sistema de controle que recebe as informações de posição e velocidade e controla a corrente fornecida aos servomotores, visando manter o avanço constante quando o equipamento percebe a redução de velocidade durante a realização do processo (SUH et al, 2008).

Existem basicamente dois tipos de sistemas de controle, o sistema de controle aberto e o sistema de controle fechado (THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2009).

2.3.1. Sistema de controle aberto

No sistema de controle aberto (Figura 6) não é possível a obtenção de dados em tempo real sobre o posicionamento da máquina durante o processo, impossibilitando a tomada de ações de correção pelo sistema de controle caso algo inesperado aconteça. Esse sistema é normalmente empregado somente nos casos em que o processo se mostra constante e previsível, contudo, o processo de fabricação utilizando-se uma máquina-ferramenta CNC não é constante, pois as forças à que a máquina é sujeitada variam de acordo com o andamento do processo, acarretando na necessidade de correções constantes de posição, força e velocidade. O sistema de controle aberto não requer a utilização de sensores de posição e

velocidade, sendo que sua aplicação ocorre geralmente acompanhada da utilização de motores de passos (THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2009).

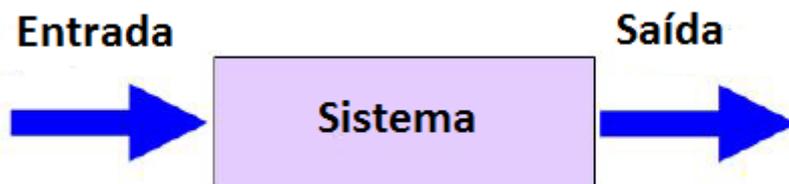


Figura 6: Sistema de controle aberto. Fonte: The Hong Kong Polytechnic University, 2009

2.3.2. Sistema de controle fechado

No sistema de controle fechado (Figura 7) dados de posicionamento e velocidade são enviados constantemente ao sistema de controle, o qual executa constantes ações de correção em tempo real. Esse sistema é mais preciso do que o sistema de controle aberto nos casos em que o processo sofre mudanças em seu andamento, por exemplo alterações de velocidades. Atualmente, quase todas as máquinas CNC dispõem desse sistema (THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2009).



Figura 7: Sistema de controle fechado. Fonte: The Hong Kong Polytechnic University, 2009

2.4. O ARDUINO

O Aduino (Figura 8) é um microcontrolador que permite a interação com o ambiente externo por intermédio da utilização de sensores e atuadores. Basicamente, o Arduino funciona como um computador que possibilita a programação e processamento de entradas e saídas ente o dispositivo e os componentes externos

conectados a ele. Este sistema é denominado computação física, ou seja, possibilita a interação com o ambiente que o cerca através de hardware e software (McROBERTS, 2011).



Figura 8: Placa Microcontroladora Arduino Diecimila. Fonte: Arduino

O microcontrolador Arduino pode ser usado no desenvolvimento de objetos interativos independentes ou conectado a um computador, enviando e recebendo dados constantemente de acordo com a programação. Ele possibilita uma infinidade de aplicações, sendo possível sua utilização no controle de LED's, displays, botões, interruptores, acionamento de motores, sensores, ou qualquer outro dispositivo que emita dados e possibilite seu controle (McROBERTS, 2011).

A placa do Arduino é composta por um microprocessador, um cristal ou oscilador e um regulador linear de 5 volts. O mesmo pode ser conectado a um computador para envio ou recuperação de dados, facilitando assim sua programação (McROBERTS, 2011).

O hardware e o software do Arduino são de código aberto, sendo possível a utilização do projeto por qualquer pessoa e para qualquer propósito. Desta forma existem muitas placas idênticas ao Arduino que mantêm as mesmas funcionalidades, sendo totalmente compatíveis com o software do Arduino (McROBERTS, 2011).

2.5. DRIVERS

Um dos circuitos mais importantes na elaboração de um sistema automatizado é a ponte H. A ponte H (Figura 9) é utilizada no controle de motores de

corrente contínua a partir dos sinais gerados por um microcontrolador. Devido à disposição dos seus componentes torna-se extremamente fácil a inversão de polaridade do motor invertendo-se facilmente a rotação, além de possuir grande importância na utilização com circuitos digitais, pois os sinais de saída dos microcontroladores não suportam a corrente e a tensão exigidas para o acionamento de motores, portanto, é necessária uma unidade de potência que possa alimentar o motor convenientemente (PATSKO, 2006).

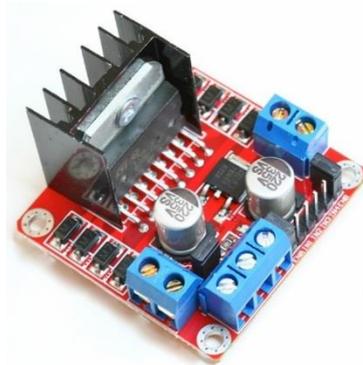


Figura 9: Ponte H

Para que não seja necessária a realização de inversão de rotação de motores DC, utiliza-se a ponte H para realizar automaticamente essa inversão de acordo com o comando enviado pelo microcontrolador. A ponte H possui construção relativamente simples e barata, sendo que sua composição é baseada em chaves eletrônicas, relés e transistores (PATSKO, 2006).

3. METODOLOGIA

O projeto, a construção e os testes da máquina CNC com plataforma livre – Arduino seguiram uma metodologia dividida em três fases distintas. Primeiramente, a metodologia baseou-se na fase de projeto mecânico, onde são descritos os requisitos e caminhos utilizados para a obtenção do projeto final da máquina CNC, posteriormente, são descritos os componentes elétricos e os sistemas eletrônicos utilizados e, por fim, são descritos os testes realizados com a máquina CNC.

3.1. PROJETO MECÂNICO

Inicialmente, através do software solidworks, a modelagem 3D de dois fusos de esferas recirculares e um fuso trapezoidal foram realizadas com comprimento de 300 mm, 400 mm e 1000 mm respectivamente, pois havia a disponibilidade dos mesmos na instituição. Também, foram modelados os mancais. A Figura 10 mostra o modelamento de um dos fusos de esfera recirculares e a Figura 11 mostra o modelamento do fuso trapezoidal.

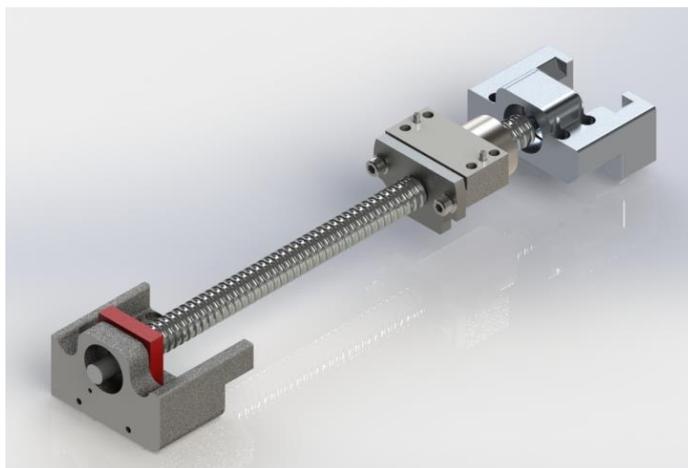


Figura 10: Modelagem 3D do Fuso de esferas recirculantes.

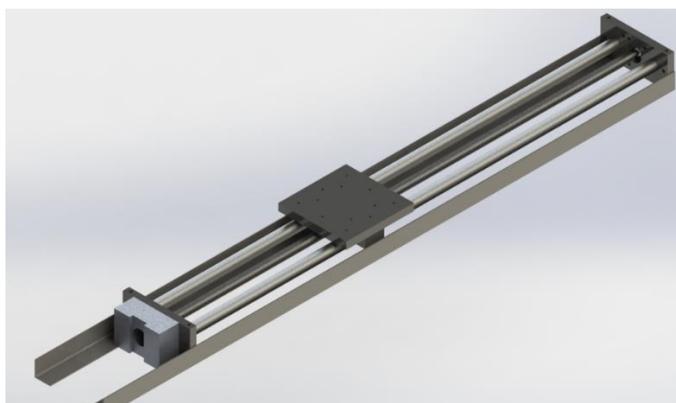


Figura 11: Modelagem 3D do Fuso trapezoidal.

Os pontos de fixação dos fusos foram analisados visando a máxima rigidez, buscou-se identificar as fixações indesejadas e esforços excessivos nos parafusos.

As posições dos fusos foram definidas de acordo com curso de abrangência de cada coordenada, isto é, o eixo z com curso de 300 mm, o eixo y com curso de 400 mm e o eixo x com curso de 1000 mm.

Outro fator primordial para o início do projeto da estrutura da máquina CNC foi a definição dos tipos de guias lineares ou barramentos que seriam utilizados. Devido a disponibilidade de materiais e facilidade de fabricação, optou-se pela utilização de barras de aço AISI 1020 com diâmetro de 5/8" (15,875 mm) na construção dos barramentos que compreendem a movimentação dos eixos Y e Z. O fuso trapezoidal que movimenta o eixo X possui barramentos integrados aos mancais, porém seu comprimento não possibilitou uma rigidez apropriada, sendo necessária a incorporação de duas guias lineares constituídas por cantoneiras posicionadas nas extremidades da estrutura principal.

A modelagem 3D da estrutura da máquina CNC foi desenvolvida buscando as seguintes características: rigidez, robustez, resistência aos esforços, leveza e funcionalidade.

Chapas de aço AISI 1020 com 4,25 mm de espessura foram utilizadas na construção dos componentes estruturais da máquina, material que garantiu a rigidez e resistência necessárias sem ultrapassar o valor predeterminado de 15 kg para a massa total das partes móveis do equipamento, minimizando assim os valores de perda de potência e esforços excessivos nos mancais de fixação, facilitando a movimentação dos fusos pelos motores de acionamento.

Tendo como base o fuso de esferas recirculantes com curso de 300 mm foi elaborado o projeto da estrutura que sustenta os barramentos que compreendem a movimentação da máquina através do eixo Z (Figura 12 A).

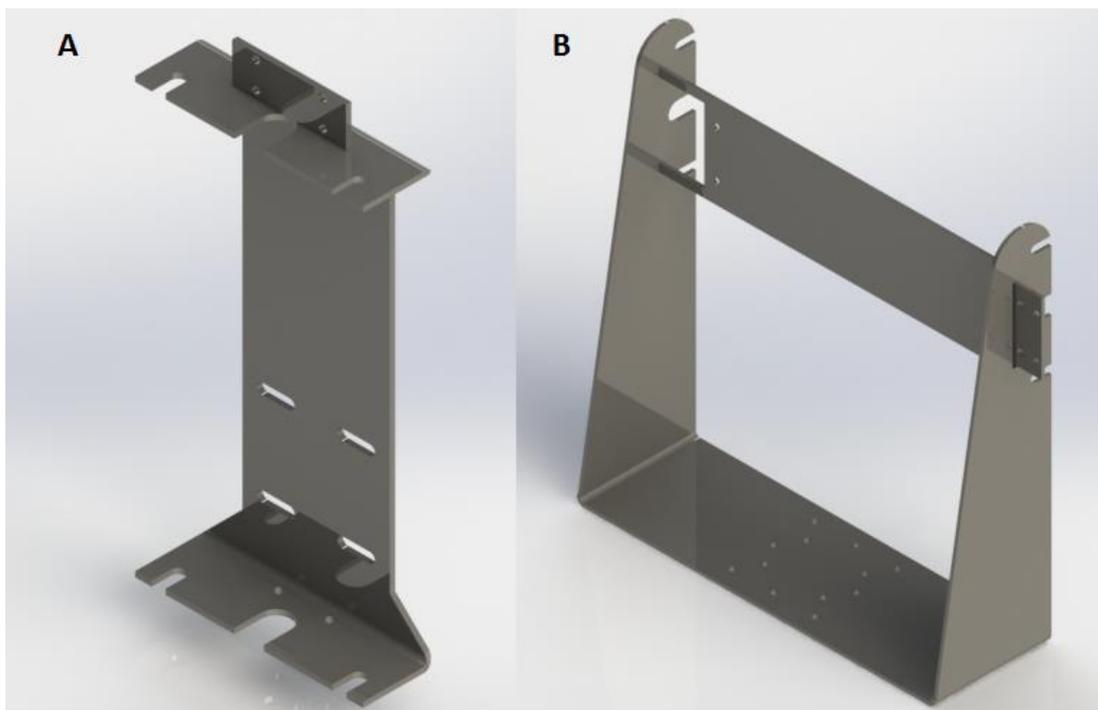


Figura 12: (A) Estrutura eixo Z; (B) Estrutura eixo Y.

Foi levada em consideração a possibilidade futura de fixação de um motor de acionamento para ferramenta de corte, no caso da execução de um processo de usinagem, ou uma tocha de corte a plasma, no caso da execução de um processo de corte. Para tanto, foram posicionados na estrutura do eixo Z quatro furos oblongos que compreendem os pontos de fixação da ferramenta.

Tendo como base o fuso de esferas recirculantes com curso de 400 mm, foi desenvolvida a estrutura de fixação dos barramentos que compreendem a movimentação da máquina através do eixo Y (Figura 12 B).

Durante o projeto da estrutura do eixo Y foi levada em consideração a necessidade de alinhamento e precisão dimensional, pois este componente foi projetado em duas partes distintas que seriam unidas pelo processo de soldagem MAG.

Para junção do eixo Z ao eixo Y foi desenvolvida uma flange (Figura 13 A) que, além de unir os eixos proporciona a fixação das guias dos barramentos (Figura 13 B) que foram projetados para serem confeccionadas com chapa de nylon com 25 mm de espessura, material que possui baixo coeficiente de atrito, mantendo um ajuste sem folgas que seriam prejudiciais para o correto funcionamento do equipamento.

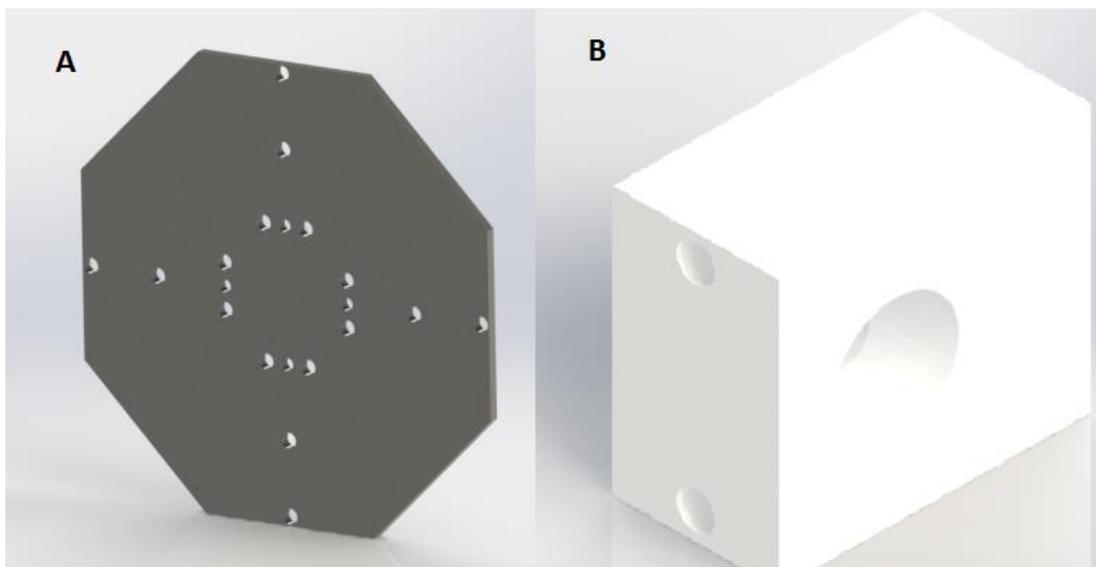


Figura 13: (A) Flange de acoplamento Eixo Y e Z; (B) Guias dos barramentos.

Por fim, todos os componentes do eixo Y e Z foram projetados para serem fixados, através do padrão de furações existente sobre a mesa do fuso trapezoidal responsável pelo deslocamento na direção X, finalizando assim a movimentação da máquina nos três eixos das coordenadas cartesianas.

Todos os componentes foram incluídos na montagem final (Figura 14) e foram adicionados os acessórios de fixação como porcas, parafusos allen e pontos unidos pelo processo de soldagem a fim de verificar possíveis interferências entre os mesmos através de uma breve análise dos movimentos que a máquina é capaz de desempenhar.



Figura 14: Montagem final.

3.1.1. Análise estrutural

Com o auxílio do software de desenho Solidworks foi executada uma análise estática, através do método de análise de elementos finitos dos esforços atuantes nos principais componentes, a fim de encontrar pontos de concentração de tensões excessivas que podem comprometer o desempenho do equipamento em determinadas aplicações que exigem maior rigidez. Para tanto, foi estipulada uma força de 200 N aplicada nas direções X, Y e Z sendo que, durante sua vida útil, dificilmente o equipamento passará por um esforço tão elevado.

Para a realização da análise de esforços estáticos foram adicionados os elementos de contato e deslizamento, além dos pontos unidos pelo processo de soldagem MAG especificando um cordão de solda com altura de 5 mm contínuo em todos os pontos cabíveis. Foram adicionados os componentes de fixação nos pontos unidos por parafusos e porcas, além de configurados os pontos fixos na base da estrutura. Por fim, para a realização da análise de esforços estáticos foi gerada uma malha com tamanho global de 13,0476 mm permanecendo em uma qualidade intermediária, ou seja, entre malha grossa e malha fina, com um total de 22568 nós e 10959 elementos.

3.1.2. Processos de fabricação

A fabricação e montagem da maioria dos componentes mecânicos e elétricos ocorreu nos laboratórios disponibilizados pela Instituição de Ensino Faculdade Horizontina.

Durante o projeto dos componentes estruturais do equipamento foi levantada a necessidade de precisão dimensional e alinhamento dos principais componentes. Para tanto foram selecionados processos de fabricação que conferem grande precisão dimensional aos componentes da máquina, evitando assim dificuldades não previstas ao decorrer da montagem.

Todos os componentes estruturais e de fixação dos eixos X, Y e Z foram confeccionados através do processo de corte a laser. As dobras foram efetuadas em uma dobradeira CNC, garantindo a precisão dimensional dos componentes dobrados. Alguns componentes precisaram passar pelo processo de soldagem MAG, pois foram constituídos de partes que necessitavam de união durante a montagem, para tanto, foram efetuados rasgos durante o processo de corte a laser que serviram como referência para o posicionamento dos demais componentes soldados.

Os barramentos que compreendem a movimentação dos eixos nas direções Y e Z e as guias do eixo X sofreram um processo de lixamento, onde foi efetuada a constante mudança de granulação das lixas, partindo-se de uma granulação mais grossa e chegando a uma granulação mais fina sucessivamente, conferindo aos barramentos um acabamento extremamente polido, diminuindo o atrito entre os componentes e garantindo melhores resultados.

3.2. PROJETO ELÉTRICO

A etapa descrita como projeto elétrico contempla a seleção dos motores de acionamento, a fonte elétrica de alimentação utilizada, além dos componentes de ligação elétrica e segurança.

3.2.1. Motores de acionamento

Os motores de acionamento utilizados na máquina CNC foram selecionados de acordo com a disponibilidade na instituição.

Para a movimentação dos fusos nos três eixos foram utilizados três servomotores DC com tacômetro integrado da marca EG&G Torque Systems modelo MT2130-012BE que trabalham com tensão máxima de 24 V em corrente contínua e possuem velocidade de rotação máxima de 300 rpm. As características dimensionais e de ligação dos motores estão dispostas no Anexo A.

3.2.2. Fonte de alimentação

Para a alimentação dos servomotores foi utilizada uma fonte da marca Elco modelo LMC135-1 com tensão de entrada de 115/220 V AC e tensão de saída 12 V DC com intensidade de corrente máxima de 12 A, responsável pela alimentação dos motores nos eixos X e Y, e uma fonte da marca Sunpower modelo SF-100A com tensão de entrada de 110/220 V AC e tensão de saída de 12 V DC com intensidade de corrente máxima de 10 A, responsável pela alimentação do motor no eixo Z.

3.2.3. Planejamento elétrico

O planejamento elétrico foi dividido em duas partes, sendo a primeira relacionada à alimentação dos três servomotores e a segunda relacionada à ligação dos sensores de fim de curso.

Os condutores utilizados na ligação elétrica foram cabos de rede (Figura 15 A) que possuem em seu interior oito fios de cores distintas, possibilitando assim a diminuição do volume de cabos.

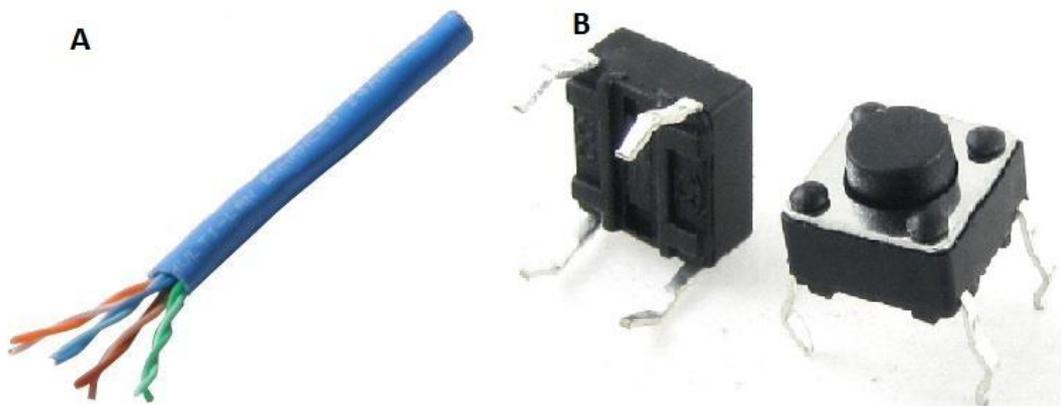


Figura 15: (A) Cabos de rede; (B) Botões fim de curso.

Como sensores de fim de curso foram utilizados seis botões de pressão (Figura 15 B) fixados nas extremidades de cada fuso de forma que os mesmos sejam pressionados pela porca do fuso no momento em que o mesmo chega ao seu curso máximo e evitando que ocorram acidentes como, por exemplo, o travamento dos servomotores.

3.3.HARDWARE

Os componentes eletrônicos utilizados no controle da máquina CNC foram três pontes H, um Arduino, e um computador responsável pela realização da interface homem-máquina.

3.3.1. Ponte H

A construção das pontes H que controlam os servomotores da máquina CNC foi baseada em um circuito eletrônico desenvolvido pelo professor Felipe Dal Piva Ely para motores que trabalham com tensão de 12 V DC e consomem grandes valores de corrente. Para tanto, os componentes utilizados conferem às pontes H confeccionadas a capacidade de controlar um motor por placa e suportar uma corrente contínua com intensidade de até 10 A. A Figura 16 mostra o desenho esquemático do circuito impresso da ponte H com respectivos componentes.

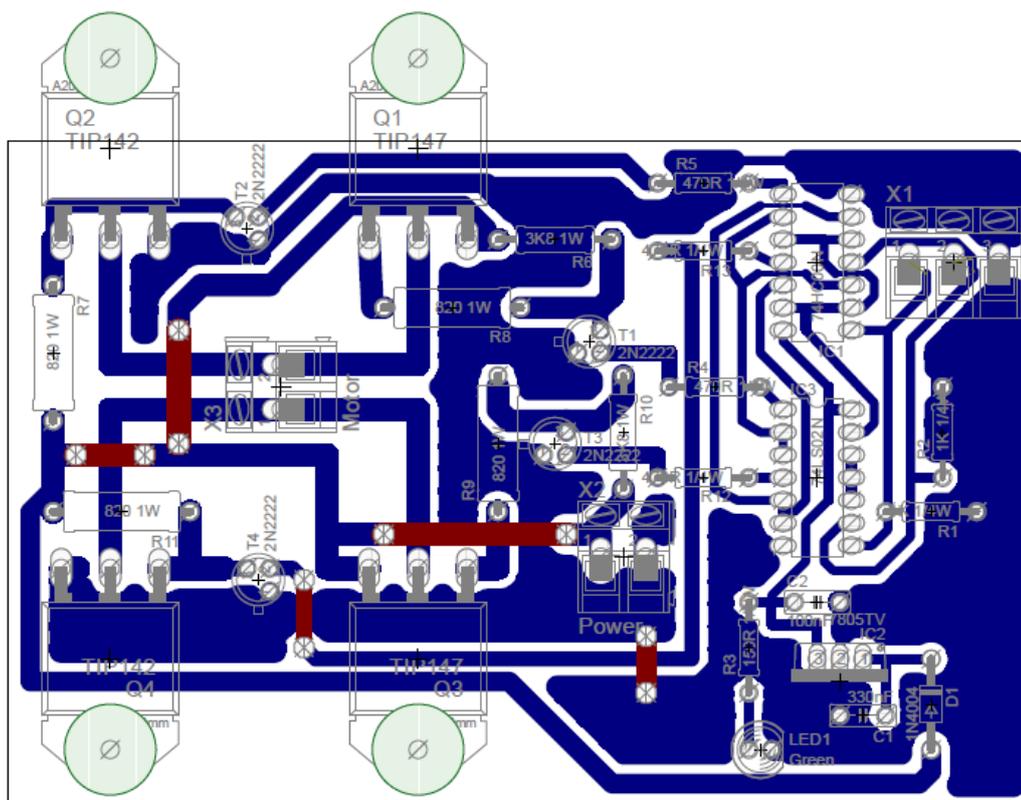


Figura 16: Circuito Elétrico das Pontes H. Fonte: Prof. Esp. Felipe Dal Piva Ely.

O desenho esquemático do circuito utilizado para a confecção das pontes H encontra-se no Anexo B.

3.3.2. Microcontrolador

Para controle e execução dos programas foi utilizada uma placa microcontroladora da marca Robocore BlackBoard v1.0, idêntica à placa Arduino UNO R3, que possui as seguintes especificações técnicas (Quadro 1):

Tamanho	5,3 cm x 6,8 cm x 1,0 cm
Microcontrolador	ATmega 328
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada	7 – 12 V
Tensão de entrada (limite)	6 – 20 V
Pinos de entrada / saída (I/O) digitais	14
Pinos de entrada analógicos	6
Corrente DC por pino I/O	40 mA
Corrente DC para pino 3,3 V	50 mA

Memória flash	32 kB (0,5 kB usado pelo <i>Bootloader</i>)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Velocidade de Clock	16 MHz
Temperatura de operação	10°C a 60°C

Quadro 1: Especificações técnicas placa Robocore Blackboard v1.0. Fonte: Robocore.

O esquema elétrico da placa microcontroladora Robocore encontra-se no Anexo C.

3.3.3. Computador

Para realização da programação, atuando na interface entre homem e máquina, foi utilizado um computador pessoal com os softwares necessários devidamente instalados.

3.4. SOFTWARE

O software utilizado durante a execução de todos os testes foi o software do Arduino que utiliza uma linguagem de programação semelhante a C/C++ possibilitando a criação tanto de programas simples quanto programas de maior complexidade como no caso da aplicação ao sistema da máquina CNC. O software é totalmente livre e compatível com qualquer placa microcontroladora sendo ou não da marca Arduino.

3.5. TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram divididos em três etapas. Primeiramente foi verificado o funcionamento dos componentes elétricos e eletrônicos, posteriormente foi efetuada a elaboração de uma programação simples a fim de verificar os movimentos da máquina. Por fim foi elaborada uma programação em que a máquina realizou um desenho simulando a execução de um processo de corte.

3.5.1. Teste de funcionamento

Os motores foram ligados às pontes H as quais foram conectadas a um Arduino onde foi realizada a inversão de rotação e o aumento e diminuição de velocidade buscando verificar o funcionamento dos motores. Com o auxílio de um

multímetro foi verificado o funcionamento dos tacômetros dos motores através da medição da tensão gerada pelos mesmos.

Foi efetuada, também, a identificação dos botões de fim de curso no programa do Arduino, possibilitando assim a execução dos testes de acionamento dos mesmos.

3.5.2. Teste de movimentação

Para o teste de movimentação foi elaborada uma programação simples em que a máquina CNC movimentou seus três eixos ao máximo até tocar nos botões de fim de curso, neste momento a rotação era invertida automaticamente ocorrendo a inversão dos movimentos. A máquina permaneceu em movimento contínuo por um período de dez minutos e foram observados o aquecimento dos componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos. Além disso foram observadas a suavidade dos movimentos e as vibrações provenientes de componentes possivelmente desbalanceados.

Após os testes de movimentação, foi adicionada à estrutura do eixo Z uma massa de 1 kg e foram observados os movimentos nos três eixos novamente, a fim de verificar o comportamento dos componentes quando submetidos a um esforço contínuo.

3.5.3. Simulação de um processo de corte

Após a realização de todos os testes anteriormente descritos, foi efetuada a programação da máquina CNC visando a realização de desenhos simulando um processo de corte.

A configuração da máquina foi efetuada tendo como base um ponto, chamado de ponto zero, onde os eixos da máquina encontravam-se totalmente retraídos. Uma caneta foi fixada no local da ferramenta e uma folha de papel foi posicionada no centro da mesa de trabalho.

O programa (Apêndice A) foi executado através da utilização de comandos previamente configurados, isto é, no momento em que a letra “P” do computador foi pressionada, a máquina posicionou os três eixos, tocando a ponta da caneta no ponto definido para o início da operação. Quando a letra “T” foi pressionada a máquina realizou o desenho de um triângulo, parou e aguardou um novo comando. Ao pressionar o número “0” a máquina realizou uma mudança de posição previamente programada, cessando seu movimento novamente e, no momento em que a letra “Q”

foi pressionada, a máquina realizou o desenho de um retângulo finalizando o programa.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados encontrados ao longo da execução do presente trabalho foram divididos, de acordo com a metodologia seguida. Uma análise dos problemas encontrados durante a execução do trabalho também foi realizada. Em seguida, foi executada uma análise visual, onde foram demonstrados em termos práticos os componentes mecânicos anteriormente descritos, e os métodos de fabricação utilizados, seguidos pela apresentação dos resultados obtidos através da análise de elementos finitos. Posteriormente é demonstrado o esquema elétrico de ligação dos componentes. Por fim, são descritos os resultados obtidos através da execução dos testes experimentais de movimentação e simulação de corte.

4.1. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE PROBLEMAS

Desde a fase de projeto até a fase de construção e testes foram encontrados diversos problemas relativos ao mau funcionamento de componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos. Esses problemas precisaram passar por uma análise e posterior aplicação de ações corretivas, pois grande parte dos problemas encontrados atingia diretamente partes importantes do equipamento, comprometendo o seu correto funcionamento

4.1.1. Problemas mecânicos e estruturais

Durante o processo de montagem dos componentes mecânicos foram observados problemas no alinhamento dos barramentos que sustentam os fusos de movimentação dos eixos X, Y e Z.

Inicialmente, foi observada grande dificuldade na realização da soldagem dos componentes da estrutura dos eixos Y e Z. Foram necessários diversos ajustes na regulagem dos barramentos demonstrando que o fator de alinhamento dos mesmos é vital para que não ocorram travamentos durante a execução dos movimentos. É importante que exista o maior nível possível de paralelismo entre os pares de barramentos dos eixos, caso contrário, ocorreriam travamentos nos mesmos. Para correção do alinhamento dos barramentos, desde a fase inicial de projeto, foram executadas furações alongadas (Figura 17 A) nos pontos de fixação dos mesmos, possibilitando a correção do alinhamento caso ocorresse o não paralelismo.

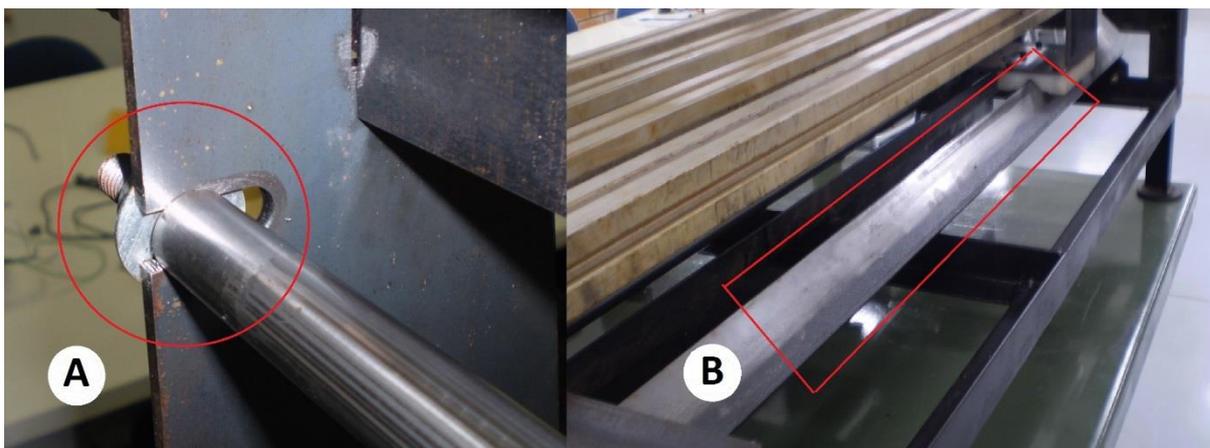


Figura 17: (A) Furos alongados para alinhamento; (B) Guias de apoio eixo X.

Outro problema encontrado durante a montagem do equipamento está relacionado à rigidez dos barramentos que compreendem a movimentação do fuso do eixo X. Por serem muito longos, os barramentos do eixo X não conferiam uma rigidez adequada ao equipamento e curvaram-se com o próprio peso da estrutura. A falta de rigidez no eixo X impossibilitou a utilização do equipamento sem que este problema fosse resolvido, para tanto, foram incorporadas duas guias ao longo do eixo X (Figura 17 B). As guias foram confeccionadas com cantoneiras fixadas na estrutura de base e paralelas ao eixo X. Fixados nas extremidades da estrutura do eixo Y, foram posicionadas duas chapas de nylon devidamente desenvolvidas para executar o deslizamento sobre as guias.

4.1.2. Problemas elétricos e eletrônicos

Dentre os problemas elétricos encontrados durante a execução dos testes com o equipamento, cabe salientar o mau funcionamento de alguns botões de fim de curso, além da falta de capacidade das pontes H e da fonte de energia utilizadas.

Inicialmente, ocorreu uma tentativa da utilização de pontes H existentes na instituição (Figura 18 A). As pontes H utilizadas possuíam uma tensão máxima de trabalho de 12 V e capacidade de resistir a uma intensidade de corrente máxima de até 2 A podendo controlar até dois motores simultaneamente. O primeiro teste ocorreu sem problemas, pois os motores estavam desconectados dos eixos do equipamento, porém quando os eixos foram conectados aos servomotores o atrito, proveniente da movimentação das guias sobre os barramentos e da movimentação dos fusos, elevou significativamente a intensidade de corrente demandada pelos servomotores, resultando na súbita queima das pontes H. A fim de sanar este problema foi verificada,

com o auxílio de um multímetro, a intensidade de corrente demandada por cada servomotor. De posse do valor de intensidade de corrente máxima, cerca de 2,5 A, foram confeccionadas três pontes H com a capacidade de suportar um valor máximo de corrente de até 10 A (Figura 18 B), conferindo aos componentes eletrônicos do sistema uma capacidade extra para a execução de tarefas que demandem grandes valores de corrente elétrica.

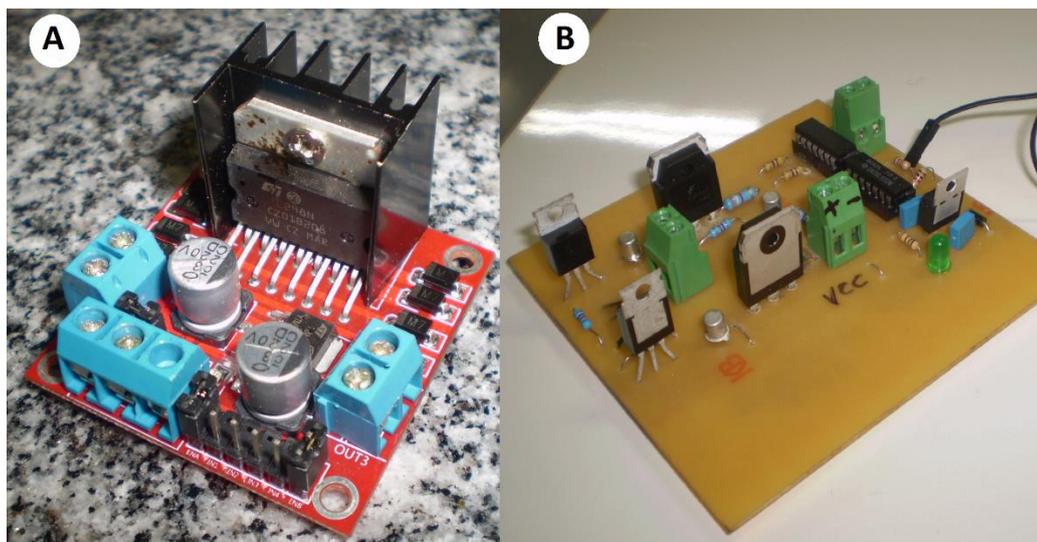


Figura 18: (A) Ponte H danificada; (B) Ponte H confeccionada.

No decorrer dos testes foi possível perceber que a fonte de alimentação utilizada inicialmente apresentava problemas, não sendo possível a sua utilização na alimentação dos três motores simultaneamente. A fonte não supriu a demanda de corrente exigida para o acionamento dos três motores, sendo necessária a incorporação de uma fonte adicional no sistema de alimentação. Foi adicionada uma nova fonte responsável pela alimentação do motor no eixo Z, enquanto que a fonte antiga foi conectada somente para a alimentação dos motores do eixo X e Y.

Foi possível observar o mau funcionamento dos botões utilizados como fim de curso. Alguns botões sofreram um esmagamento, pois ocorreram alguns erros durante a elaboração do programa utilizado na realização dos primeiros testes. O não funcionamento dos botões de fim de curso acarretou no travamento dos motores, sendo necessária a rápida intervenção do operador para o desligamento da alimentação, pois quando o motor trava pelo fato de o fuso ter chegado ao seu curso máximo, o valor de corrente demandada pelo mesmo aumenta significativamente podendo acarretar na queima das pontes H ou até mesmo dos servomotores. Para

sanar o problema em questão foi efetuada a substituição dos botões de fim de curso danificados por botões novos.

4.2. ANÁLISE VISUAL

Durante a fase de análise visual são apresentados, em termos práticos, os componentes da máquina CNC, além de serem apresentados os processos de fabricação empregados na confecção dos principais componentes.

4.2.1. Identificação dos componentes

Para apresentação dos componentes utilizados na fabricação da máquina CNC é necessária primeiramente a identificação, de modo geral, das partes responsáveis pela movimentação da máquina nos três eixos das coordenadas cartesianas (Figura 19).

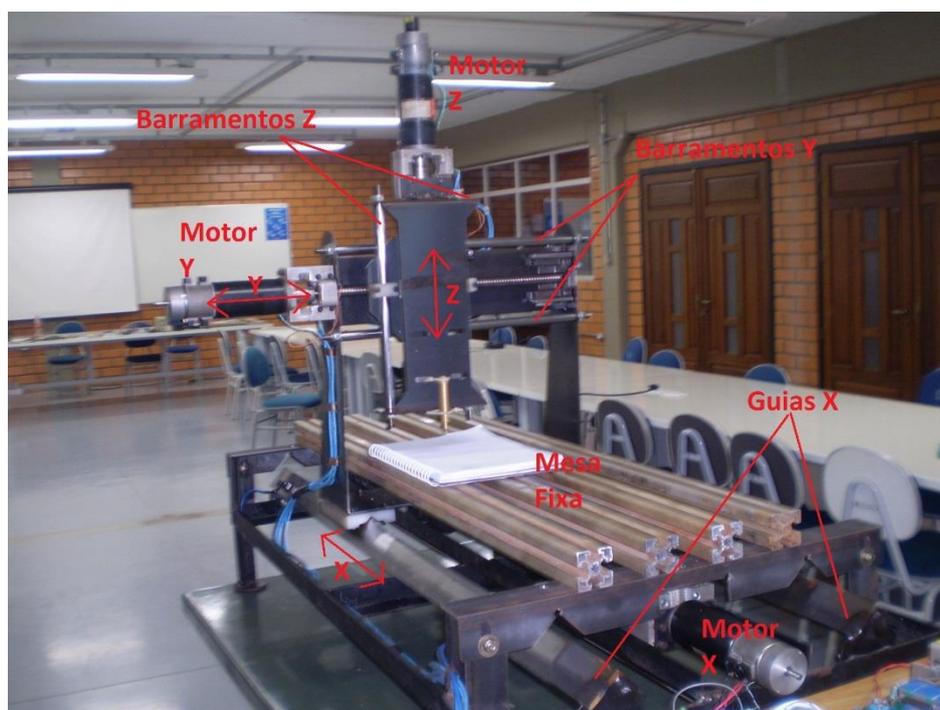


Figura 19: Componentes mecânicos da Máquina CNC didática.

Através da Figura 19 é possível um melhor entendimento dos componentes responsáveis pela movimentação do equipamento nos eixos das coordenadas cartesianas. São identificados os motores X, Y e Z e a direção dos movimentos que os mesmos desempenham seguindo os barramentos e as guias. Também é mostrada a mesa de trabalho onde a peça a ser processada deve ser fixada por meio de grampos que se encaixam nos perfis da mesa.

4.3. ANÁLISE ESTRUTURAL

Alguns dos principais componentes foram submetidos a uma análise de esforços estáticos nas três direções de atuação da máquina CNC. Os componentes estudados foram submetidos a uma força de 200 N, permitindo a observação de seu comportamento quando exercido sobre os mesmos um esforço elevado.

A análise de elementos finitos (Apêndice B) ocorreu na montagem das estruturas de fixação dos eixos Y e Z, pois estes componentes executam a maior parte dos movimentos, além de serem responsáveis pela absorção da maior parte dos esforços a que a máquina será exposta.

Foram analisados os pontos de concentração de tensões, o deslocamento e a deformação provenientes da ação da força nas direções X, Y e Z.

Primeiramente, foi analisada a consequência da aplicação da força na direção X da máquina CNC. São demonstrados os pontos de concentração de tensões, deslocamento e a deformação (Figura 20) quando a força é aplicada na direção do eixo X. Foi possível a constatação de um deslocamento de 2,6 mm e uma deformação equivalente com razão de alteração dimensional de 0,00098, além da observação da existência de poucos pontos de concentração de tensão, sendo que o valor de tensão máxima atingida foi de 114,5 MPa.

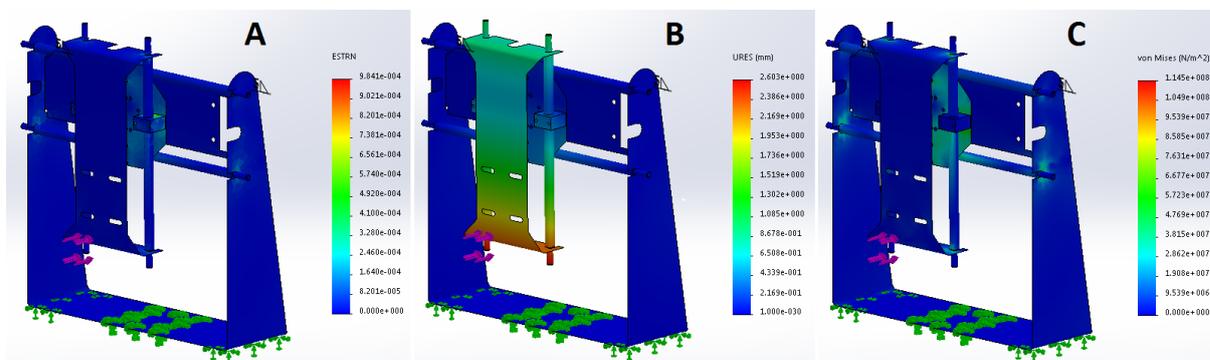


Figura 20: (A) Deformação em X; (B) Deslocamento em X; (C) Tensão em X.

A análise dos esforços na direção Y (Figura 21) demonstra a probabilidade de um deslocamento menor que na direção X, pois o valor encontrado foi de 1,3 mm. A deformação equivalente também foi reduzida no eixo Y, onde foi obtido um valor de 0,00051. Os pontos de concentração de tensões são semelhantes aos apresentados na análise dos esforços na direção X, porém, a intensidade sofreu uma redução, apresentando um valor máximo de 55 MPa.

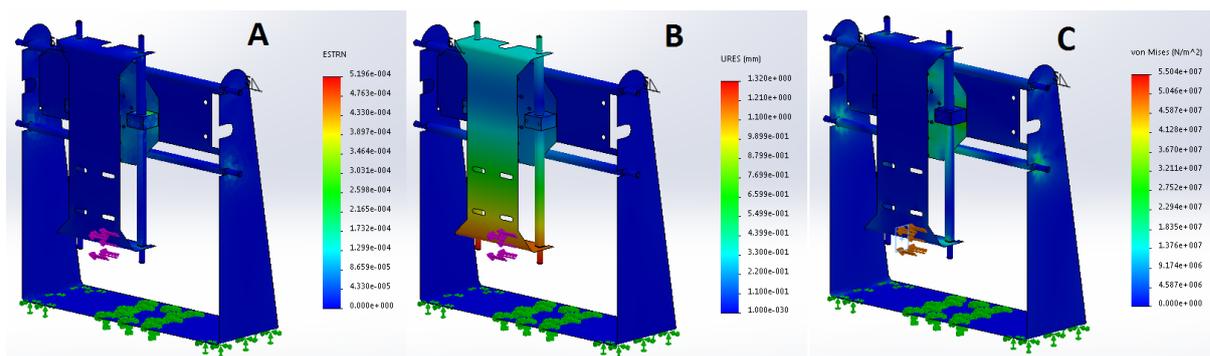


Figura 21: (A) Deformação em Y; (B) Deslocamento em Y; (C) Tensão em Y.

A análise dos esforços na direção Z (Figura 22) apresentou os melhores resultados para tensão, deslocamento e deformação. Cabe frisar a importância da obtenção de melhores resultados no eixo Z, pois operações de furação e usinagem exigem maiores esforços nessa direção. O valor encontrado para deslocamento na direção Z foi de 0,44 mm, enquanto que a deformação equivalente não ultrapassou o valor de 0,00017. Foram encontrados poucos pontos de concentração de tensões obtendo-se um valor de tensão máxima de 35,2 Mpa.

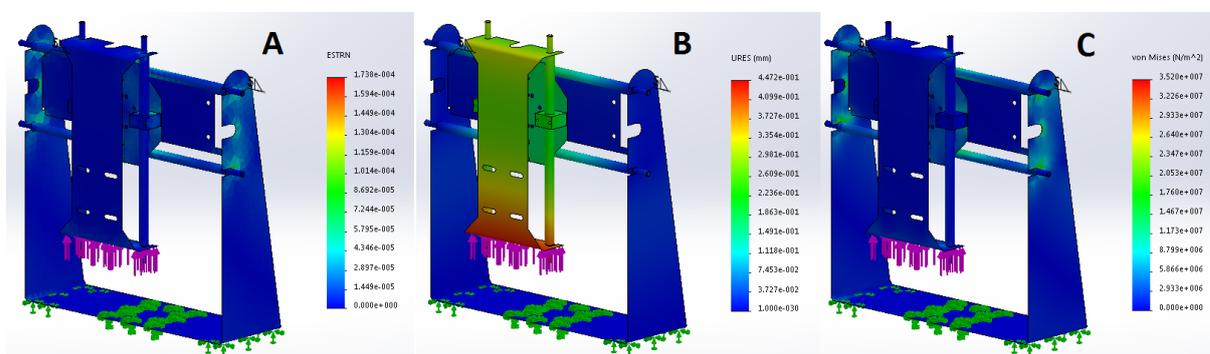


Figura 22: (A) Deformação em Z; (B) Deslocamento em Z; (C) Tensão em Z.

Através da análise de elementos finitos foi possível a obtenção de informações acerca do desempenho da estrutura perante a aplicação de esforços nas três direções das coordenadas cartesianas.

4.4. ESQUEMA ELÉTRICO DE LIGAÇÃO

Foram utilizadas na ligação (Figura 23) do Microcontrolador catorze portas, sendo, seis portas digitais para controle da inversão de rotação pelas pontes H, seis portas analógicas para recebimento dos sinais enviados pelos botões de fim de curso, uma porta de alimentação com tensão de 5 V e uma porta de aterramento utilizadas na alimentação dos botões de fim de curso e pontes H. Os servomotores foram

conectados aos respectivos terminais das pontes H e as mesmas foram ligadas nas duas fontes de alimentação.

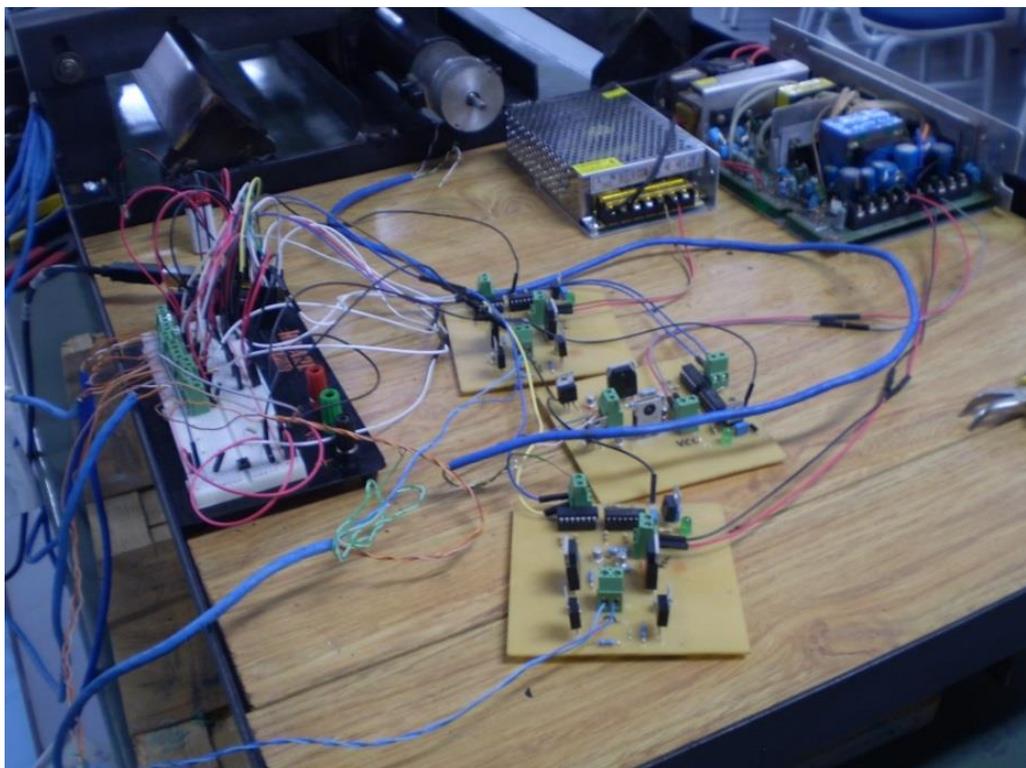


Figura 23: Ligação Elétrica.

A fim de identificar a ligação dos componentes elétricos e eletrônicos foi desenvolvido um esquema elétrico (Figura 24) com todas as ligações utilizadas no Microcontrolador, pontes H, motores de acionamento e botões de fim de curso.

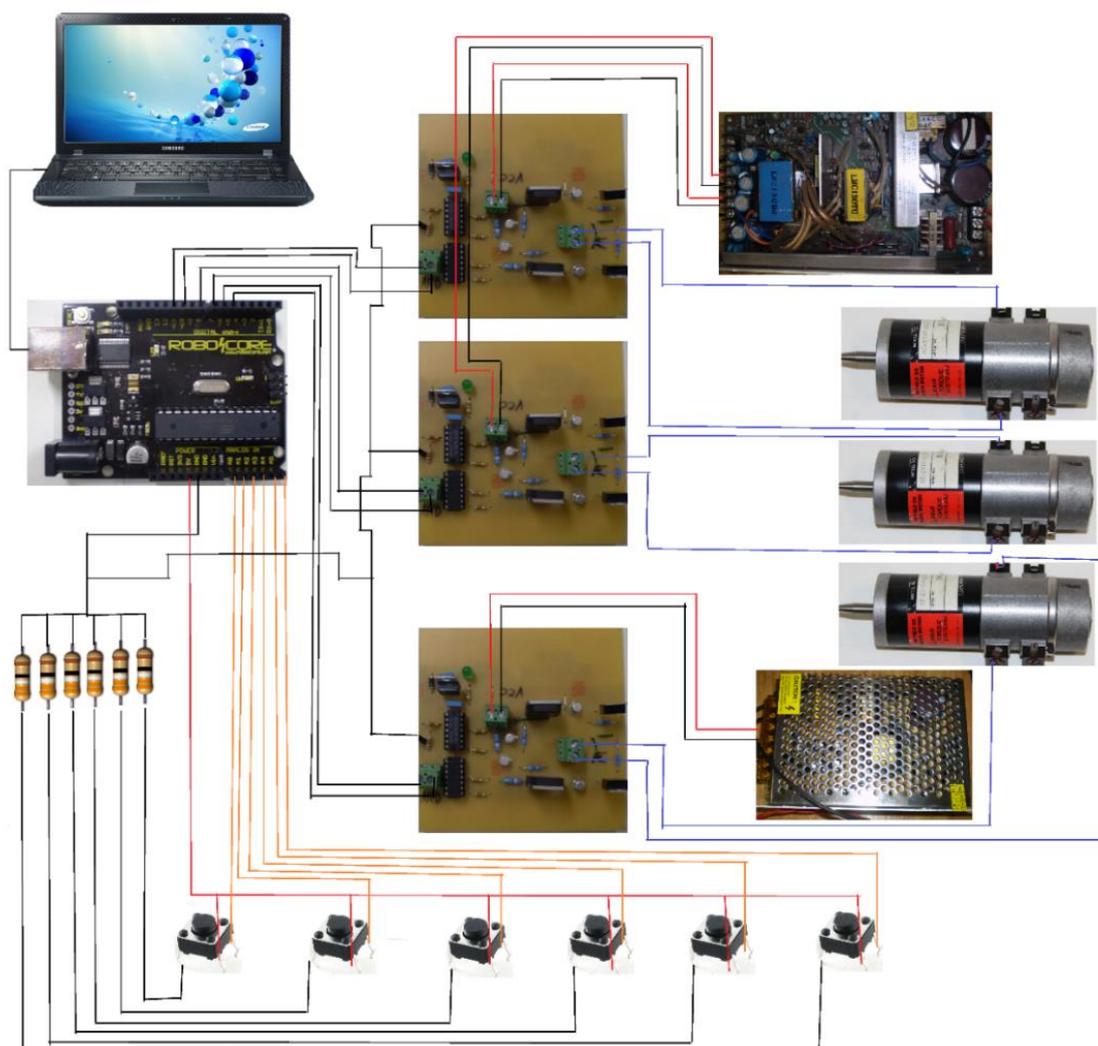


Figura 24: Esquema Elétrico.

4.5. ANÁLISE DOS TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes realizados seguiram a sequência determinada na metodologia, iniciando pelo teste de funcionamento que ocorreu antes da realização da montagem dos componentes na máquina CNC, seguido pelo teste de movimentação, onde foram testados os componentes atuando na movimentação dos eixos da máquina e, simulação de um processo de corte, onde foi realizada a programação da máquina para a realização de um desenho, simulando a geometria de uma peça cortada.

4.5.1. Análise do Teste de funcionamento

Todos os componentes utilizados mostraram-se em perfeito estado de funcionamento pois, com os motores conectados ao microcontrolador, foi possível a realização da variação de velocidades e inversão de rotação. Foi possível evidenciar

fatores como o alto torque em todas as faixas de rotação e a baixa emissão de ruídos, características dos servomotores DC.

Os tacômetros para medição de velocidade apresentaram um perfeito funcionamento, aumentando a diferença de potencial entre os terminais ao passo em que se aumentava a velocidade de rotação dos mesmos.

Por fim, os botões de fim de curso foram adicionados ao programa executado pelo microcontrolador, para que fossem reconhecidos pelo sistema. Cada botão foi pressionado e seu funcionamento foi evidenciado através de uma mensagem exibida pelo software de programação do Arduino.

4.5.2. Análise do teste de movimentação

Foi executada a programação e os eixos X, Y e Z foram movimentados constantemente pelo período predeterminado. Inicialmente, buscava-se a quantificação do aquecimento proveniente do atrito entre as partes mecânicas e da circulação de corrente elétrica pelas fontes e placas componentes do circuito, porém os valores de alteração nas temperaturas do momento inicial ao momento final do processo foram insignificantes, pois as temperaturas preocupantes para os circuitos elétricos encontram-se acima dos 70° C.

Foi possível a observação da suavidade dos movimentos executados pela máquina CNC, sendo que o baixo ruído proveniente dos motores e a utilização de acoplamentos flexíveis contribuíram significativamente para a redução de ruídos e vibrações excessivas.

No momento em que a massa de 1 kg foi acrescentada na estrutura do eixo Z, foi possível a observação de uma pequena redução na velocidade de retorno do eixo Z, pois esse movimento é executado verticalmente para cima, o que acarreta no acréscimo da força proveniente da massa combinada com a aceleração da gravidade. Os eixos X e Y não sofreram alterações visíveis em suas velocidades de avanço.

4.5.3. Análise da simulação de um processo de corte

Com a execução da simulação de um processo de corte foi possível a observação do comportamento e da movimentação da máquina CNC em um processo de fabricação.

A programação consistiu na elaboração de desenhos com formas geométricas simples e sem dimensões especificadas, pois a precisão na elaboração de formas

geométricas mais complexas só seria possível com a incorporação de sensores de posição, os quais não estavam disponíveis.

Primeiramente, foi elaborada a programação tendo como base a produção de um desenho composto por linhas dispostas na forma de um triângulo, e um desenho com linhas dispostas na forma de um retângulo. O resultado é apresentado pela Figura 25, que mostra a disposição das linhas executadas pela máquina CNC.

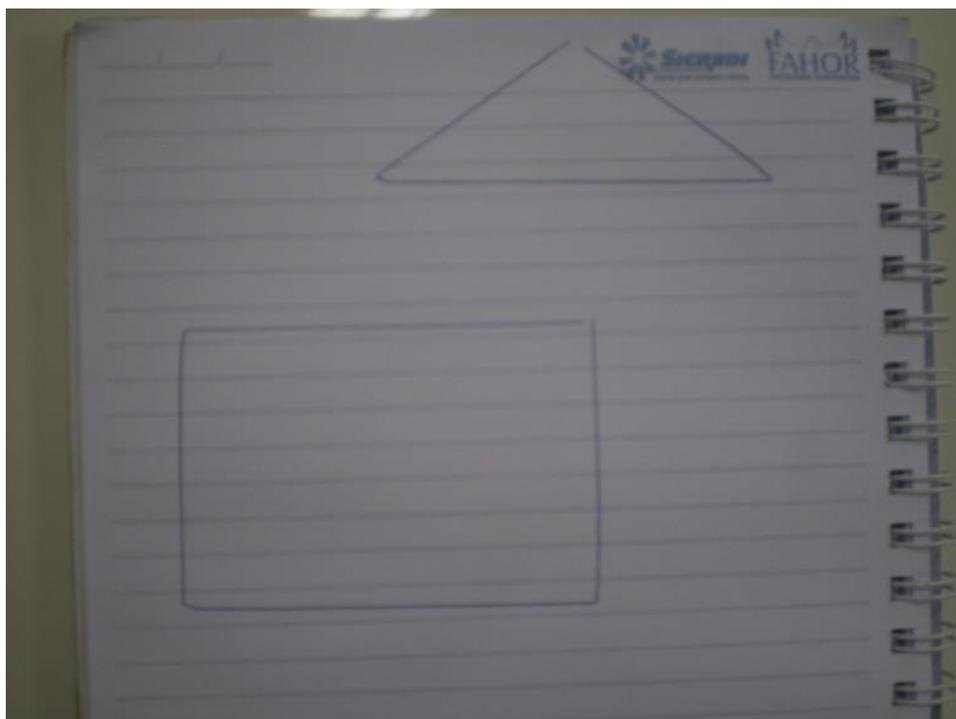


Figura 25: Desenho efetuado na Máquina CNC.

O equipamento demonstrou rápida inversão no sentido de rotação, traçando linhas extremamente retas que se encontram ao final da operação. A distância entre os pontos de início e fim dos desenhos ocorreu devido à falta de rigidez na fixação da caneta, sendo que sua ponta sofria deslocamentos durante a execução do processo.

Foram efetuados diversos desenhos iguais durante um longo período de tempo e foram verificados resultados semelhantes em todas as operações, demonstrando a capacidade de repetibilidade da máquina na produção em série.

5. CONCLUSÕES

Através da construção da máquina CNC foi possível a interação entre os sistemas mecânico, elétrico e eletrônico, abrangendo uma vasta gama de especialidades relacionadas aos cursos de Engenharia.

Os sistemas mecânico, elétrico e eletrônico apresentaram um correto funcionamento, apesar dos problemas que necessitaram de soluções rápidas. O estudo evidenciou a possibilidade de automação em processos de fabricação utilizando-se componentes acessíveis.

Partindo-se do projeto em software foi possível a concretização de uma análise detalhada de montagem do conjunto da máquina, servindo de auxílio para a construção física do equipamento.

Os processos de fabricação empregados, bem como a correta realização das etapas de projeto e construção garantiram a obtenção de uma máquina CNC alinhada e sem folgas entre seus componentes móveis, facilitando assim o alcance de resultados satisfatórios, pois seu funcionamento durante a realização dos testes ocorreu de forma que os resultados encontrados atingiram os objetivos propostos.

Ainda se faz necessária a incorporação de sensores de posicionamento ao equipamento, além do acoplamento de um motor de acionamento para a ferramenta de corte, o que possibilitaria a execução de processos de usinagem reais ou, o desenvolvimento de uma tocha para corte a plasma, possibilitando a execução de processos de corte automatizados.

6. SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros cabe salientar três temas para a continuação dos estudos:

1- Incorporação de sensores de posicionamento e utilização de um sistema de controle baseado em porta paralela.

2- Adequação da máquina CNC para a execução de processos de usinagem automatizados.

3- Adequação da máquina CNC para a execução de processos de corte automatizados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, Alain. **Understanding CNC Routers**. FPIInnovations - Forintek Division, First Edition, 2004.

ARDUINO. **Arduino Diecimila**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDiecimila>>. Acesso em: 25 de outubro de 2015.

BIGATON, C. **Automação CNC**. São Paulo: 2000. (Terceiro ciclo de técnico em mecânica)

MACHADO, A. **Comando numérico aplicado às máquinas-ferramenta**. São Paulo: Cone Editora, 1986.

McROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. São Paulo: Editora Novatec, 2011.

NASCIMENTO, T. E. Do. **Estudo De Máquinas Cnc**. UFSJ. São João Del-Rei – MG: Julho, 2011.

PATSKO, Luís F. **Tutorial Montagem da ponte H**. Maxwell Bohr – Instrumentação Eletrônica, 2006.

ROBOCORE. **BlackBoard v1.0**. Disponível em: <https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_LojaVirtual&prod=530>. Acesso em: 25 de outubro de 2015.

SANTOS, D. R. **Fuso de esferas recirculantes e guias lineares**. São Paulo: Abril, 2001. (Mecatrônica atual)

SUH, S. et al. **Theory and Design of CNC Systems**. Espanha: Editora Springer, 2008. (Springer Series in Advanced Manufacturing)

THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Computer Numerical Control (CNC)**. Hong kong: Agosto, 2009. (IC Professional Training Series)

8. APÊNDICE A – PROGRAMA

```

int btnLY = 14;
int btnLX = 15;
int btnBZ = 16;
int btnRX = 17;
int btnUZ = 18;
int btnRY = 19;
int btnStart = 13;

int motorY1 = 7;
int motorY2 = 8;
int PWMY = 6;

int motorX1 = 10;
int motorX2 = 11;
int PWMX = 9;

int motorZ1 = 5;
int motorZ2 = 6;
int PWMZ = 4;

int valorSerial = 0;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  pinMode(btnLY, INPUT);
  pinMode(btnLX, INPUT);
  pinMode(btnBZ, INPUT);
  pinMode(btnRX, INPUT);
  pinMode(btnUZ, INPUT);
  pinMode(btnRY, INPUT);
  pinMode(btnStart, INPUT);

  pinMode(motorY1, OUTPUT);
  pinMode(motorY2, OUTPUT);
  pinMode(PWMY, INPUT);

  pinMode(motorX1, OUTPUT);
  pinMode(motorX2, OUTPUT);
  pinMode(PWMX, INPUT);

  pinMode(motorZ1, OUTPUT);
  pinMode(motorZ2, OUTPUT);
  pinMode(PWMZ, INPUT);
}

void eixoXL(){
  digitalWrite(motorX1, HIGH);
  digitalWrite(motorX2, LOW);
}

void eixoXR(){
  digitalWrite(motorX1, LOW);
  digitalWrite(motorX2, HIGH);
}

void eixoYL(){
  void eixoXStop(){
    digitalWrite(motorX1, LOW);
    digitalWrite(motorX2, LOW);
  }

  void eixoYStop(){
    digitalWrite(motorY1, LOW);
    digitalWrite(motorY2, LOW);
  }

  void eixoZStop(){
    digitalWrite(motorZ1, LOW);
    digitalWrite(motorZ2, LOW);
  }
}

void loop() {
  if (digitalRead(btnStart)){
    Serial.println("Botao Start Pressionado");

    eixoZL();
    eixoXL();
    eixoYL();
  }
  if (digitalRead(btnBZ)){
    Serial.println("Botao de baixo pressionado (Z)");
    Serial.println("Motor Z em Ponto 0");
    eixoZR();
    delay(100);
    eixoZStop();
  }
}

```

```

}
if (digitalRead(btnLX)) {
  Serial.println("Botao Esquerdo pressionado (X)");
  Serial.println("Motor X em Ponto 0");
  eixoXR();
  delay(100);
  eixoXStop();
}
if (digitalRead(btnLY)) {
  Serial.println("Botao Esquerdo pressionado (Y)");
  Serial.println("Motor Y em Ponto 0");
  eixoYR();
  delay(100);
  eixoYStop();
}
if (Serial.available()) {
  valorSerial = Serial.read();
  Serial.println(valorSerial);
  if (valorSerial == 112) { //Letra p
    eixoXR();
    delay(12000);
    Serial.println("Motor X posicionado");
    eixoXStop();

    eixoZR();
  }
  if (valorSerial == 113) { //Letra q
    eixoYR();
    delay(2000);
    Serial.println("Primeiro Traco");
    eixoYStop();

    eixoXR();
    delay(2000);
    Serial.println("Segundo Traco");
    eixoXStop();

    eixoYL();
    delay(2000);
    Serial.println("Terceiro Traco");
    eixoYStop();

    eixoXL();
    delay(2000);
    Serial.println("Quarto Traco");
    eixoXStop();
  }
  if (valorSerial == 116) { //Letra t
    eixoYR();
    eixoXR();
    delay(1000);
    Serial.println("Primeiro Traco");

    eixoYStop();
    eixoXStop();

    eixoYL();
    delay(2000);
    Serial.println("Segundo Traco");
    eixoYStop();

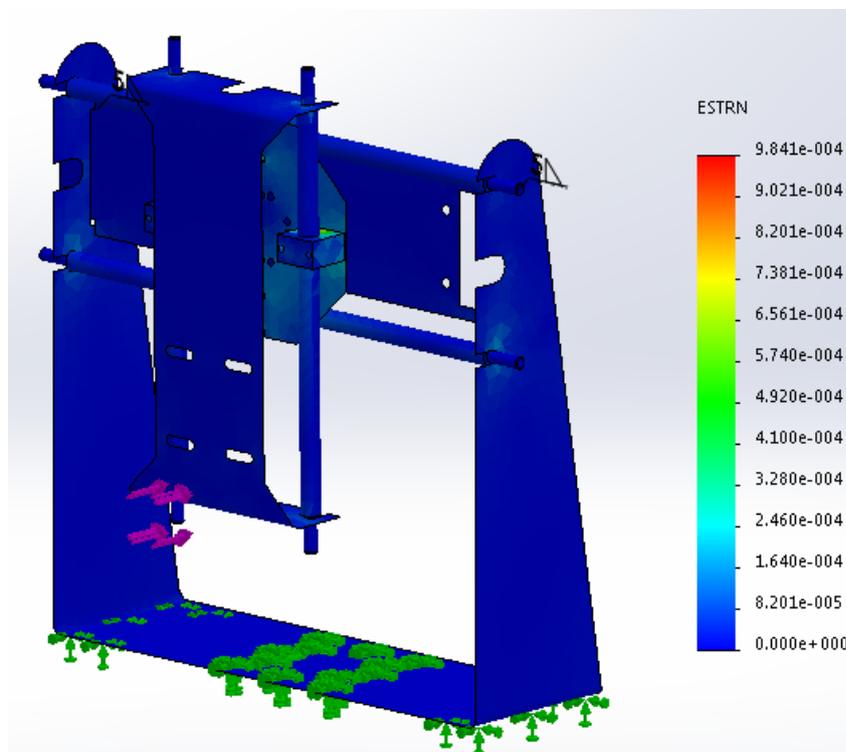
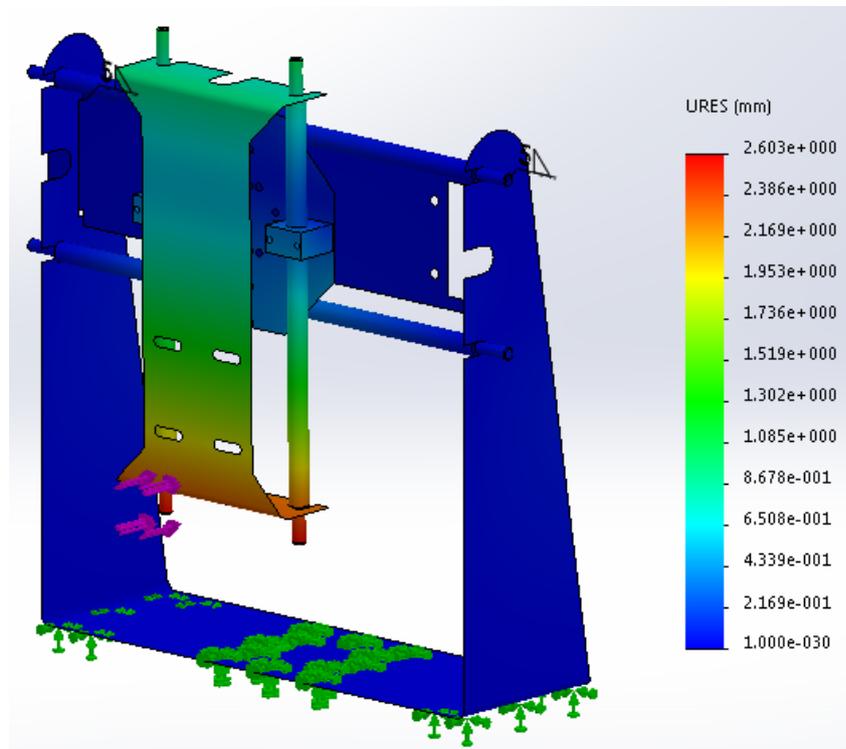
    eixoXL();
    delay(1000);
    Serial.println("Terceiro Traco");
    eixoXStop();
    eixoYStop();
  }
  if (valorSerial == 48) { //Letra 0
    eixoZL();
    delay(500);
    eixoZStop();
    eixoXR();
    delay(2000);
    eixoXStop();
    eixoZR();
    delay(300);
    eixoZStop();
  }
}
if (digitalRead(btnUZ)) {
  eixoZL();

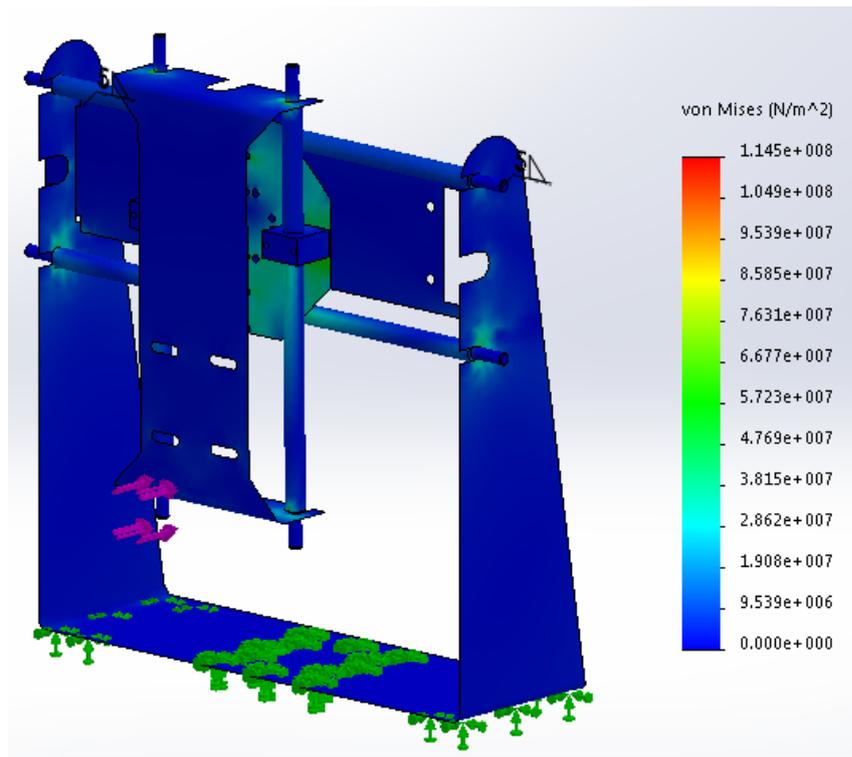
  delay(100);
  Serial.println("Motor Z posicionado");
  eixoZStop();
}
}

```

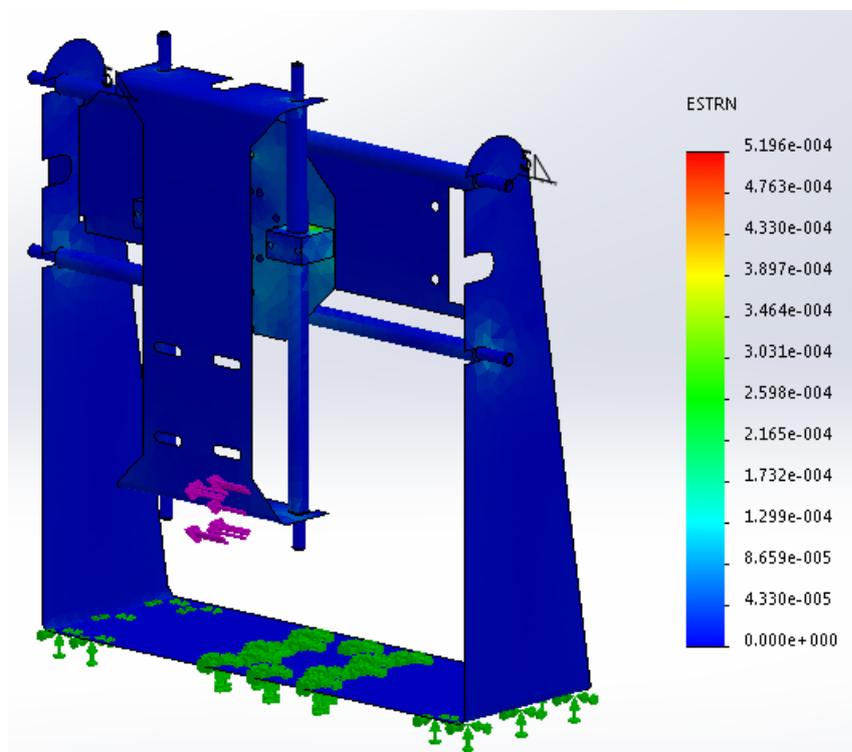
9. APÊNDICE B – ANÁLISE ESTÁTICA

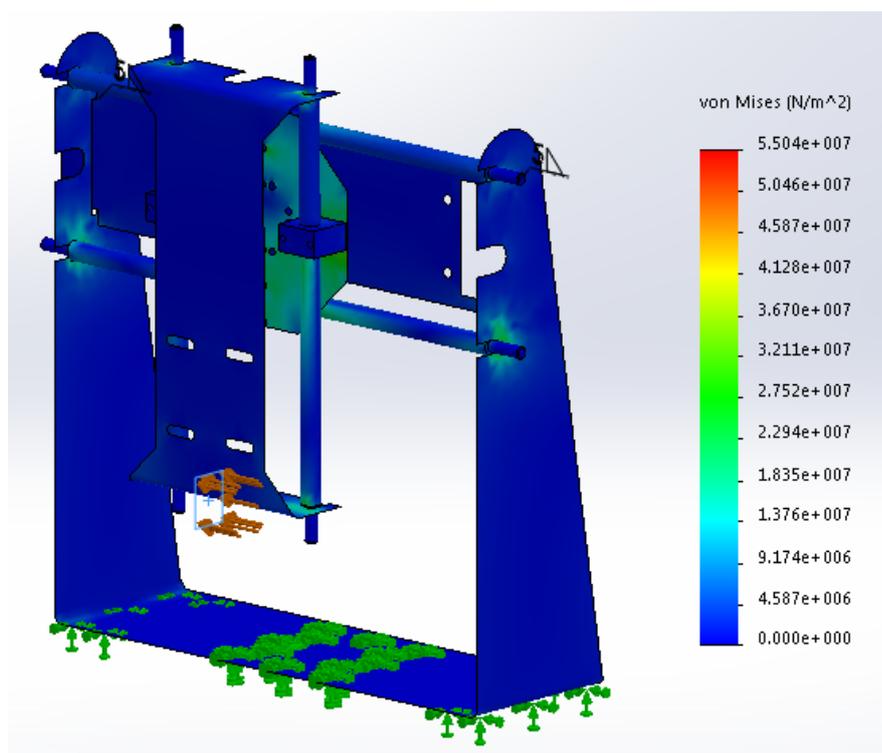
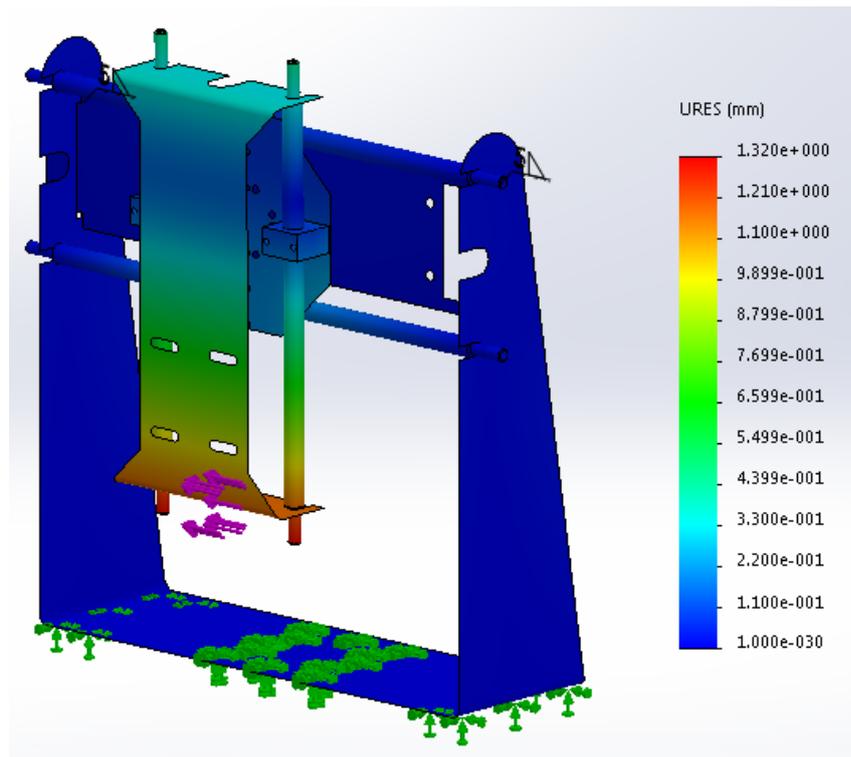
9.1. EIXO X



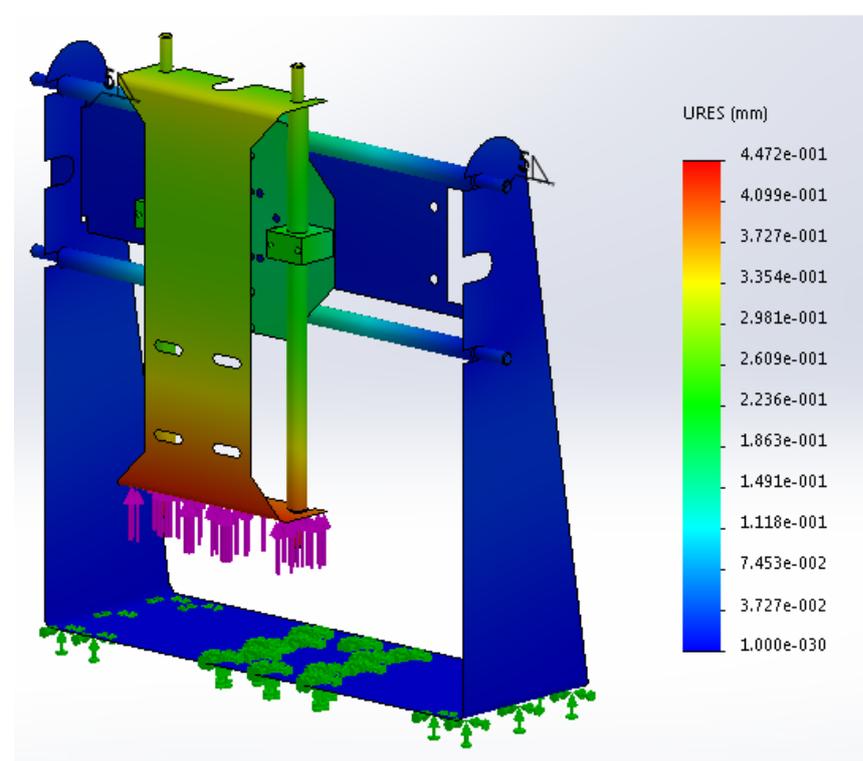
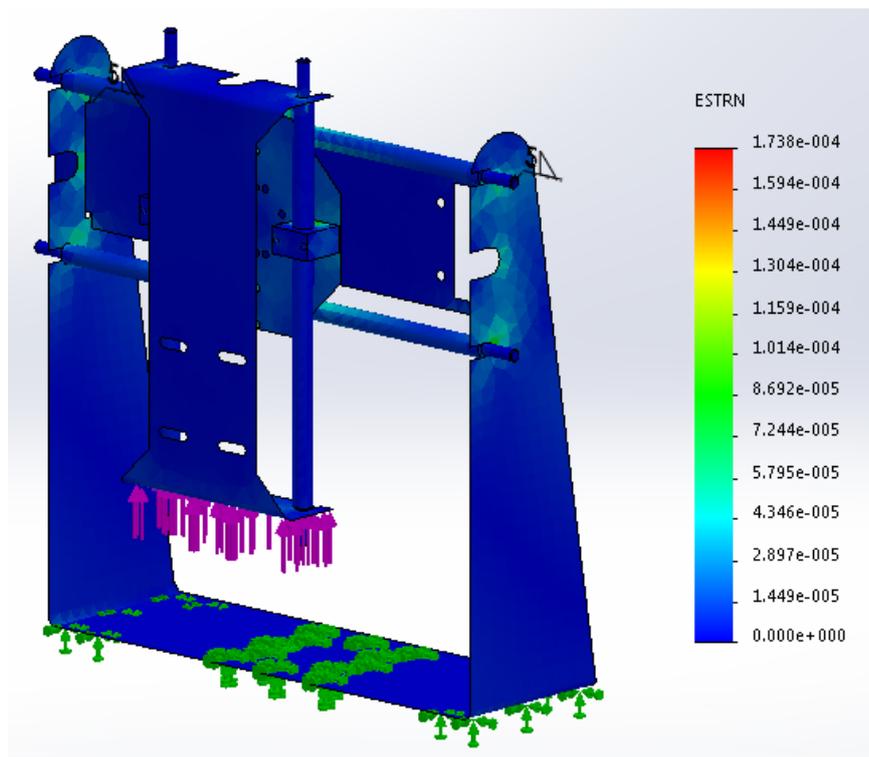


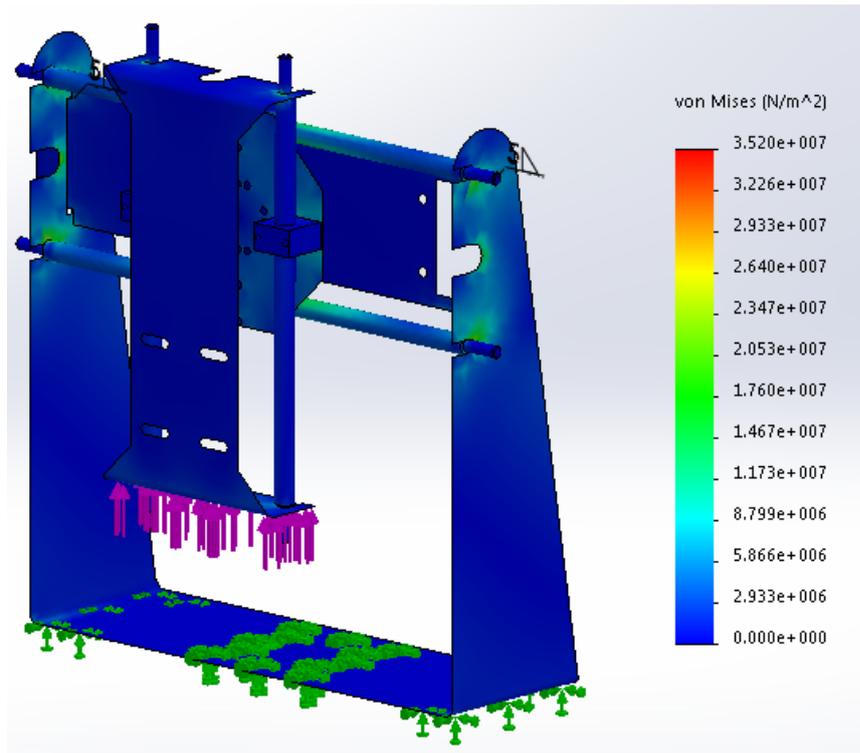
9.2. EIXO Y





9.3. EIXO Z





10. ANEXO A – DIMENÇÃO E TERMINAIS DE LIGAÇÃO DOS SERVOMOTORES

NOTES:

1. ROTATION: WITH RED MOTOR TERMINAL POSITIVE WITH RESPECT TO BLACK MOTOR TERMINAL. ROTATION IS CCW FACING OUTPUT SHAFT END (AS INDICATED), AND RED TACH TERMINAL IS POSITIVE.
2. AXIAL MOVEMENT OF SHAFT TO BE .007 MAX. WITH A 25LB. REVERSING LDAD, AND .001 MAX. WITH A 10LB. REVERSING LDAD.

TABULATION

DRAWING NO.	MODEL NO.	DIM. "L"	DIM. "X"
13694-001	MT2115-	5.60 ±.04	7.31
13694-002	MT2120-016	6.10 ±.04	7.81
13694-003	MT2130-012	7.10 ±.04	8.81

REVISIONS

REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVAL
D	ECN00388	11/27/94	BA

ISSUE

REV.	DESCRIPTION	DATE	APPROVAL
D	ECN00388	11/27/94	BA

INFORMATION CONTAINED HEREIN IS THE SOLE PROPERTY OF TRIMBLE COMPANY. IT IS TO BE KEPT IN CONFIDENTIALITY AND NOT TO BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, WITHOUT WRITTEN PERMISSION FROM TRIMBLE COMPANY. CONTROL SYSTEMS DIVISION

NOTICE

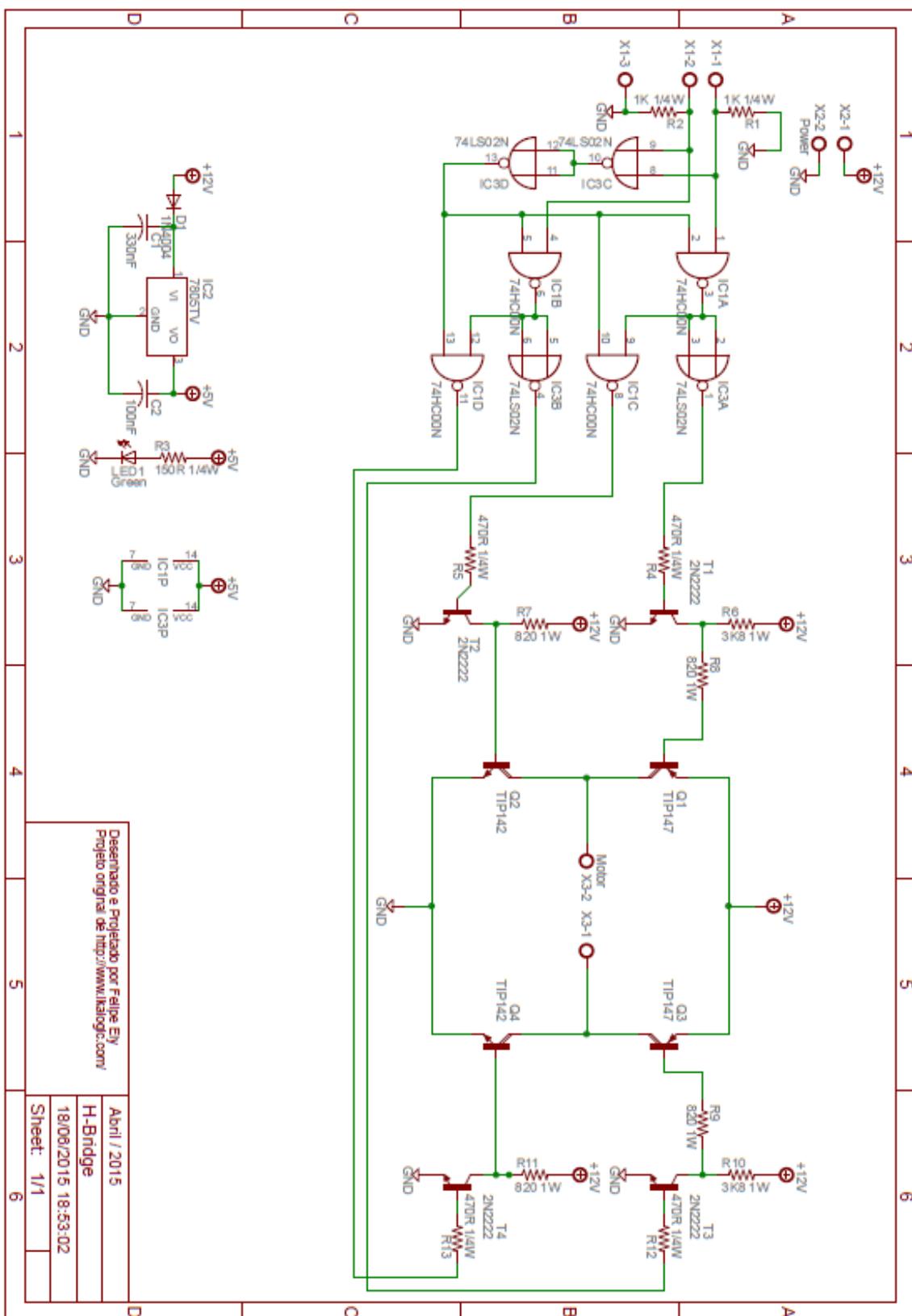
REVISIONS TO THIS DRAWING SHALL BE INDICATED BY A CIRCLED NUMBER IN THE REVISIONS SECTION. REVISED DIMENSIONS SHALL BE INDICATED BY A CIRCLED DIMENSION VALUE. DIMENSIONS IN PARENTHESES ARE FOR INFORMATION ONLY.

TRIMBLE COMPANY
SERVO MOTOR DIVISION

OUTLINE

SIZE: 7500 NO. 3/4" IN. SCALE: NONE
33866 13694-TAB
D

11. ANEXO B – ESQUEMA ELÉTRICO DAS PONTES H



Desenhado e Projetado por Felipe Ely
 Projeto original de <http://www.kaliojg.com/>

Abri / 2015
 H-Bridge
 18/08/2015 18:53:02
 Sheet: 1/1

12. ANEXO C – ESQUEMA ELÉTRICO DA PLACA ROBOCORE BLACK BOARD

