

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE**  
**SISTEMAS MECÂNICOS**

Impressora 3D de baixo custo

Julio Cesar Candia Nishida

São Paulo  
2011

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE  
SISTEMAS MECÂNICOS**

**Impressora 3D de baixo custo**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para a  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Julio Cesar Candia Nishida

Orientador: Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto

Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica

São Paulo  
2011

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Nishida, Julio Cesar Candia**

**Impressora 3D de baixo custo / J.C.C. Nishida. – São Paulo, 2011.  
55 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas  
Mecânicos**

**1. Impressora 3D 2. Prototipagem Rápida Subtrativa I. Universidade  
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia  
Mecatrônica e Sistemas Mecânicos.**

**À Raquel, companheira em todos os momentos de felicidades ou dificuldades,  
sem seu apoio, nada disso seria possível.**

## RESUMO

Tendo em vista o crescente interesse do público em geral por máquinas capazes de criar objetos personalizados, as chamadas “Impressoras 3D”, notou-se a demanda por um equipamento capaz de executar essa mesma tarefa, mas que tivesse um custo menor e fosse, assim, mais acessível a todos. O presente trabalho tem por objetivo o projeto e a construção de uma máquina ferramenta com comando numérico computadorizado (CNC), denominada “Impressora 3D”, capaz de gerar formas tridimensionais, com baixo custo, dimensões compactas (compatível com o tamanho de impressoras domésticas tradicionais) e que possa ser usada por projetistas para a geração de peças e até mesmo por crianças na criação de brinquedos personalizados. Para a geração dessas peças, essa máquina fará a usinagem (fresamento e furação) de blocos de materiais pré-definidos através de uma interface computacional simples e amigável.

**Palavras-chave:** Impressora 3D, Prototipagem Rápida Subtrativa (SRP), Usinagem CNC.

## **ABSTRACT**

Given the growing interest of the general public for machines capable of creating custom objects, so-called "3D printer", it was noted the demand for an equipment capable of performing this same task, but having a lower cost and, thus, being more accessible to all. The present work aims to design and construct a machine tool with computer numerical control (CNC), called "3D Printer", capable of generating three-dimensional shapes, with low cost, compact size (compatible with the size of traditional home printers) and that could be used both by designers to generate parts and even by children in creating custom toys. For the generation of these parts, this machine will do the machining (milling and drilling) of blocks of material pre-defined through a simple user-friendly computer interface.

**Keywords:** 3D Printer, Subtractive Rapid Prototyping (SRP), CNC machining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de estereolitografia .....	5
Figura 2: Confeção de um crânio. ....	5
Figura 3: Esquema de funcionamento da SLS. ....	6
Figura 4: Processo de deposição de laminas. ....	7
Figura 5: Processo de 3D-print. ....	8
Figura 6: Processo de FDM. ....	9
Figura 7: Dois equipamentos que utilizam SRP. ....	10
Figura 8: Visão geral.....	13
Figura 9: "Impressora 3D" com cobertura de proteção.....	13
Figura 10: Mesa X, Y e porta peças.....	14
Figura 11: Ferramenta e eixo z. ....	14
Figura 12: Bucha "iglidur <sup>®</sup> G" em detalhe.....	15
Figura 13: Guia Linear.....	16
Figura 14: Visão esquemática da eletrônica.....	17
Figura 15: PIC 19F2550.....	19
Figura 16: Circuito de Controle. ....	20
Figura 17: ULN2803.....	21
Figura 18: ULN2003.....	22
Figura 19: Eletrônica de Potência. ....	22
Figura 20: Fluxograma do programa do micro controlado. ....	23
Figura 21: Fluxograma da interface gráfica com o usuário. ....	25

Figura 22: Interface com o usuário. ....	26
Figura 23: Vista frontal da "Impressora 3D". ....	27
Figura 24: Vista lateral da "Impressora 3D". ....	28
Figura 25: Mesa xy e porta peça. ....	29
Figura 26: Eixo z e ferramenta. ....	29
Figura 27: Detalhe bucha Iglidur <sup>®</sup> . ....	30
Figura 28: Tubos do aço carbono. ....	30
Figura 29: Guia Linear montada. ....	31
Figura 30: Placa de Controle. ....	31
Figura 31: Placa com eletrônica de potência. ....	32
Figura 32: Interface com o usuário. ....	33

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
®	Marca registrada
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAM	Manufatura Assistida por Computador
LPT	Porta de comunicação paralela
PC	Computador Pessoal
PWM	Modulação por largura de pulso
RP	Prototipação Rápida
RS232	Porta de comunicação serial
SRP	Prototipação Rápida
SFF	<i>Solid Freeform Fabrication</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

# SUMÁRIO

<b>FICHA CATALOGRÁFICA .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE ABREVIACÕES .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivo.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>1</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>4</b>
<b>3. PROJETO .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1. Mecânica .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.1. Modelo em CAD .....</b>	<b>12</b>
<b>3.1.2. Guias Lineares.....</b>	<b>15</b>

<b>3.2.</b>	<b>Eletrônica .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Estudo do tipo de comunicação com o PC .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Estudo e seleção do micro controlador .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Circuitos eletrônicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.</b>	<b>Programação.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1.</b>	<b>Programação do micro controlador .....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>Programação da Interface.....</b>	<b>24</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.</b>	<b>Mecânica .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.</b>	<b>Eletrônica .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.</b>	<b>Programação.....</b>	<b>33</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>34</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>35</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>37</b>
<b>7.1.</b>	<b>Planilha de Custos .....</b>	<b>37</b>
<b>7.2.</b>	<b>Desenhos de Circuitos .....</b>	<b>38</b>
<b>7.3.</b>	<b>Desenhos de Fabricação.....</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação

Com a grande difusão nos últimos anos do uso de *softwares* CAD no processo de projeto de novos produtos e de *softwares* CAM na integração desses projetos à manufatura, muitos engenheiros e estudantes de engenharia passaram a ter a necessidade de máquinas capazes de gerar formas tridimensionais reais a partir dos modelos criados no computador.

Isso motiva a ideia central desse trabalho: projetar e construir uma máquina de prototipagem rápida de baixo custo que gere formas tridimensionais através do processo de usinagem.

A máquina projetada destina-se tanto a projetistas, engenheiros, hobbistas, estudantes de engenharia ou cursos técnicos, como por crianças, adolescentes e o público leigo em geral.

Para o público técnico, a máquina tem como seu principal uso, a criação de peças projetadas a partir de softwares de CAD no conceito conhecido como prototipagem rápida subtrativa (SRP). Com isso estes terão uma poderosa ferramenta para criar rapidamente pequenos protótipos funcionais e testar peças, encurtando e melhorando o ciclo de desenvolvimento de novos produtos.

Por outro lado, o público em geral terá em mãos um equipamento capaz de criar objetos personalizados. Crianças e adolescentes poderão criar brinquedos, cartões, brindes, gravuras em alto e baixo relevo entre outros, através de arquivos contendo o código G para essas tarefas.

Para estes a “Impressora 3D” será utilizada para a criação de brinquedos de forma instantânea. Ela pode ser vista como uma “Fábrica de Brinquedos” e possui enorme apelo para esse público. Exemplos desses brinquedos criados são: medalhões,

*bottons*, mini bonecos e bonecas, carrinhos, trenzinhos, pequenos “bichinhos”, como cães, gatos, peixes, dinossauros, casinhas, mesinhas, cadeirinhas, entre outros.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é o projeto e a construção de uma máquina, denominada “Impressora 3D”, de baixo custo, com dimensões compactas, de fácil operação, capaz de gerar formas tridimensionais através do processo de Prototipagem Rápida Subtrativa (SRP).

Com o objetivo de se criar uma máquina economicamente acessível a seu público alvo, foi estabelecida uma meta de custo de produção seriada de US\$ 100,00<sup>1</sup>, aqui definido como “baixo custo”.

Essa máquina funcionará conectada a um computador (PC) e contará com uma interface de operação simples e objetiva em ambiente Windows<sup>®</sup>.

## **1.3. Estrutura do Trabalho**

No presente capítulo, foram abordados a motivação e o objetivo central desse trabalho, bem como a estrutura que rege todo o corpo deste texto.

No capítulo 2 será feita a análise e o confronto entre as duas principais técnicas de prototipagem rápida no cenário atual: a prototipagem rápida aditiva (RP) e prototipagem rápida subtrativa (SRP).

O capítulo 3 discorre sobre o projeto da “Impressora 3D” em cada uma de suas partes. Discute também decisões de projeto e suas justificativas.

O capítulo 4 analisa os resultados obtidos após a construção do protótipo da máquina.

---

<sup>1</sup> Em novembro de 2011, cerca de R\$ 180,00.

Finalmente, no capítulo 5, é feita uma comparação entre o que foi proposto e o que, de fato, foi obtido após a construção do protótipo. Isto é, este capítulo analisa se os objetivos do trabalho foram efetivamente alcançados.

## 2. ESTADO DA ARTE

A partir da popularização do uso de computadores nos anos 1980 e do uso de software de CAD/CAM para o processo de concepção de novos produtos, surgiram uma série de técnicas de prototipagem agrupadas sob o nome de *Solid Freeform Fabrication* (SFF). Segundo o World Technology Evaluation Center, Inc. - WTEC (2004) em seu relatório anual, duas técnicas se sobressaem tanto em seu uso como em importância: a Prototipagem Rápida (RP), que utiliza métodos de deposição de materiais, e a Prototipagem Rápida Subtrativa (SRP), que utiliza métodos de remoção de materiais.

As máquinas de prototipagem rápida (RP) criam objetos em sucessivas camadas depositando material na peça que está sendo formada. Para isso elas utilizam tecnologias como estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser ou deposição por jato de cera. Estas tecnologias, apesar de cumprirem essa tarefa, possuem custos altíssimos da ordem de dezenas de milhares de dólares, são equipamentos volumosos, de difícil transporte e ainda inacessíveis ao usuário comum.

As principais tecnologias de prototipagem rápida aditiva são descritas a seguir.

### -Estereolitografia (SLA):

Segundo Grimm (2005) o equipamento de estereolitografia constrói a peça pela superposição de camadas de resina polimérica líquida. De acordo com o desenho criado em CAD, os raios laser UV solidificam uma resina fotossensível, camada a camada dos contornos do objeto pretendido sobre uma plataforma, até completar a formação da peça (figura 1).

Na figura 2 pode-se ver esquematicamente o processo de superposição de camadas para formação de um crânio tridimensional.

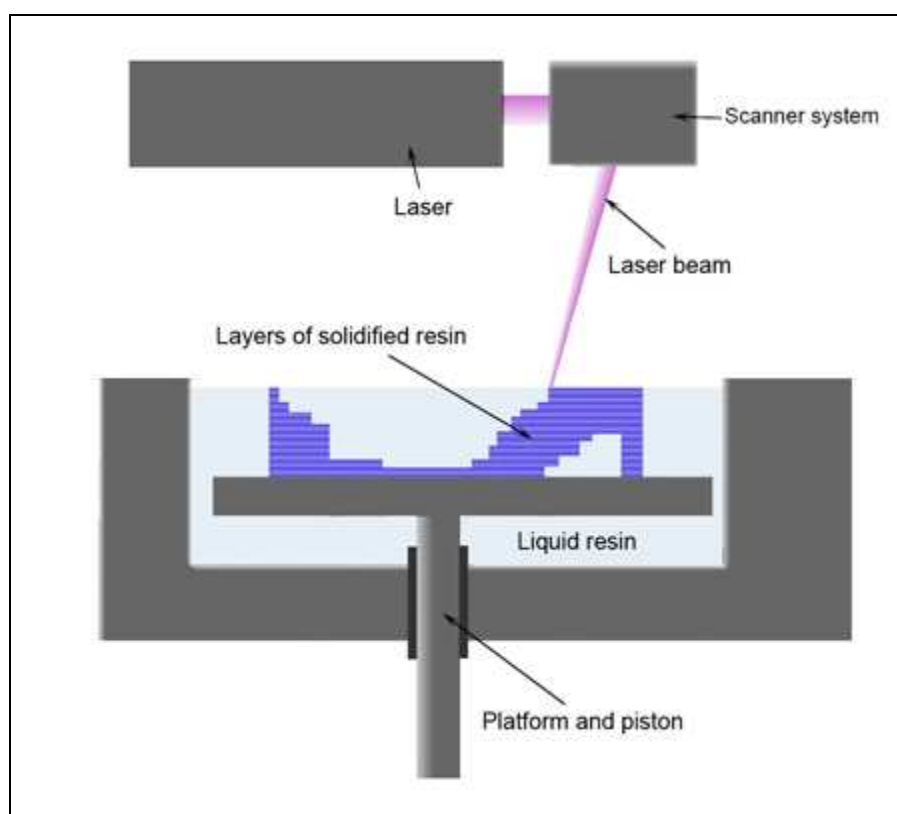


Figura 1: Processo de estereolitografia (3D systems).

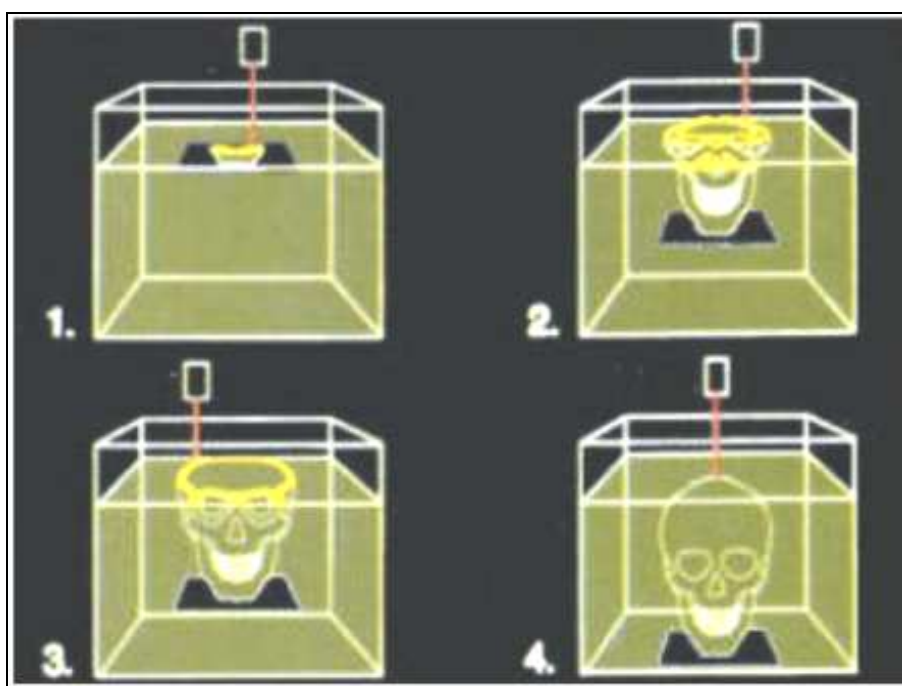
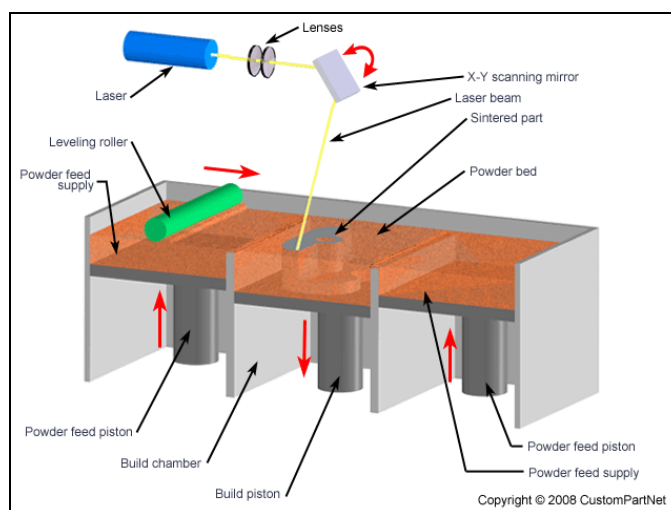


Figura 2: Confeção de um crânio (3D systems).

A peça, depois de completa, é removida do equipamento e a resina restante, dentro dos contornos, é curada por meio de aquecimento em forno. As geometrias que possuem partes desconectadas ou salientes requerem estruturas de suporte para evitar que o objeto desça para o fundo ou flutuem livremente na resina líquida.

#### - Sinterização Seletiva a Laser (SLS):

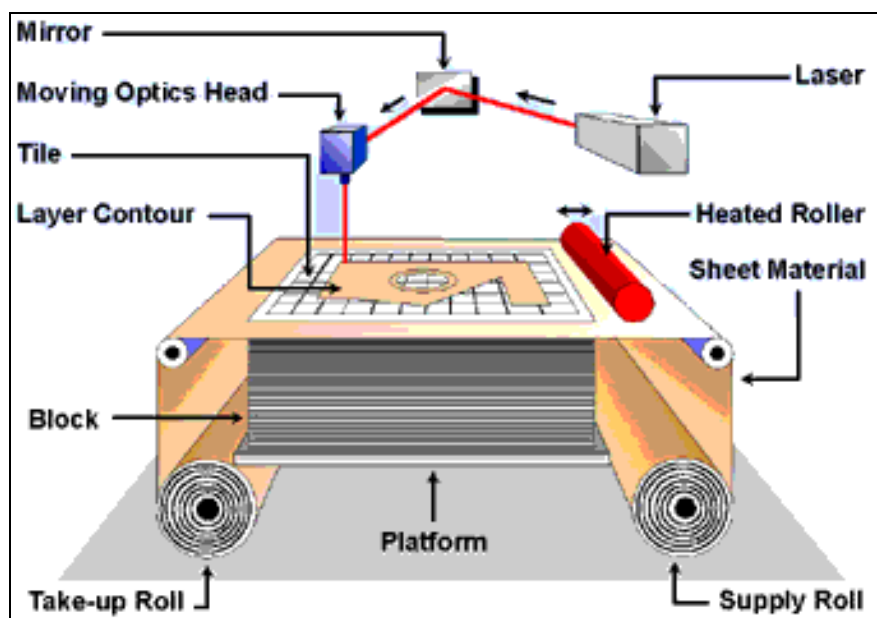
O equipamento do processo SLS também constrói objetos tridimensionais pela superposição de camadas, homogêneas de polímeros em pó. As camadas superpostas são ligadas quimicamente entre si por ação do calor de um equipamento de emissão de laser. Com o processo iniciado, uma fina camada do pó, que se solidifica por ação do laser, é depositada dentro em um cilindro de formação do objeto, posicionado no centro do equipamento. Depois, camadas adicionais do pó são depositadas através de roletes sobre a camada já sinterizada para sofrer a ação do laser, repetindo-se o processo até a formação final do objeto. O pó não sinterizado pela ação do laser serve como uma estrutura de suporte para partes desconectadas e é removido quando a peça estiver completa. Vê-se na figura 3 o esquema de funcionamento.



**Figura 3: Esquema de funcionamento da SLS (Custom Part Net, 2011).**

- Laminated Object Manufacturing (LOM):

A obtenção dos objetos no processo LOM, ocorre colando-se sucessivamente folhas de material. Um feixe laser corta o perímetro exterior correspondente ao corte da camada do objeto. Assim, o processo inicia-se com o desenrolar de um rolo de material impregnado de cola termoplástica na sua superfície inferior. Em seguida, um rolo pré-aquecido comprime o papel sobre a camada anterior ficando a colagem consolidada. O corte do contorno da peça na camada é feito por um laser. O material de suporte, que não faz parte do objeto, é cortado para remoção da peça do interior do bloco formado pela superposição dessas camadas (figura 4).

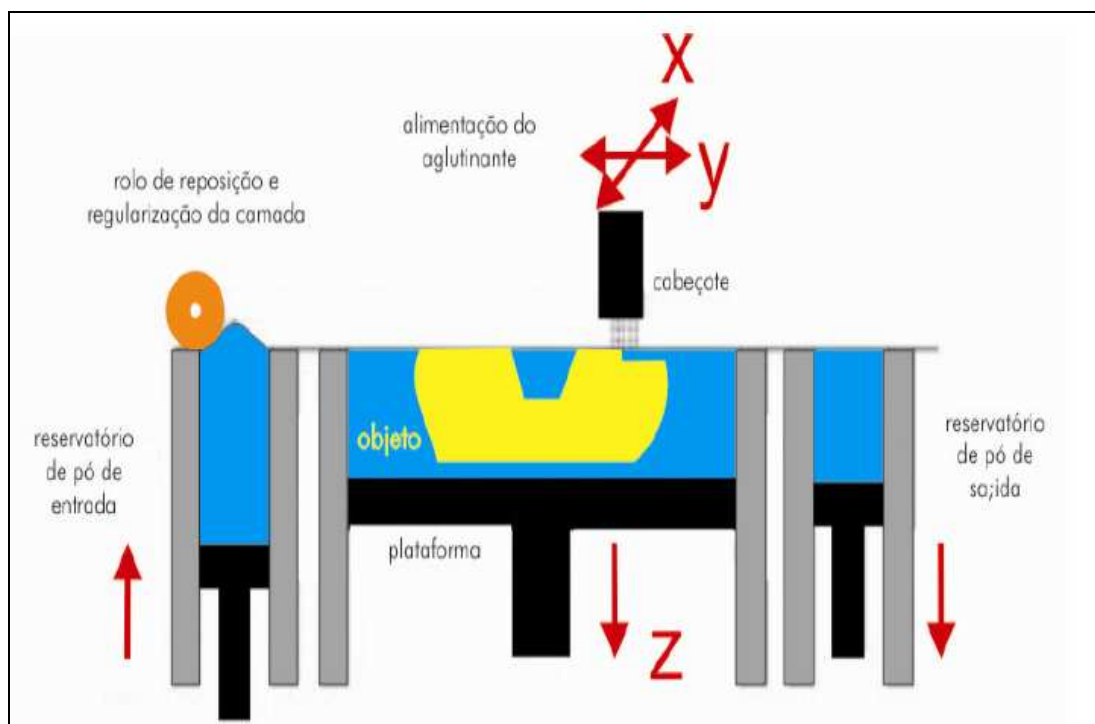


**Figura 4: Processo de deposição de lâminas (Milwaukee School of Engineering, 2011).**

- Impressão Tridimensional (3D Print):

Este processo utiliza o mesmo conceito de impressão de jato de tinta de impressoras de computadores, sendo construído sob esta mesma base. A diferença é que ao invés de utilizar tinta, é utilizado um agente aglutinante. Em um reservatório contendo pó cerâmico ou polimérico uma plataforma se movimenta no eixo Z de

coordenadas, onde o pó é aglutinado formando as camadas do objeto. Na medida em que a plataforma desce, um rolo carrega nova camada vinda de outra plataforma ascendente. A movimentação do cabeçote de agente aglutinante, nas coordenadas  $x$  e  $y$ , permite a construção do objeto através da fixação dessas camadas. Isso ocorre até o fim da construção do objeto, que é retirado de dentro do volume de pó excedente. Um desenho esquemático pode ser visto na figura 5.



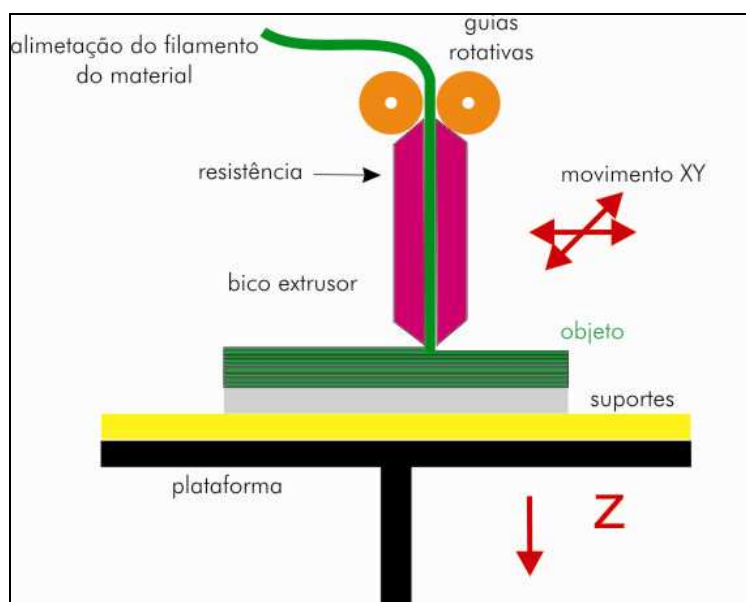
**Figura 5: Processo de 3D-print (Z Corporation).**

#### -Fused Deposition Modeling (FDM):

O processo FDM constrói objetos por extrusão de filamentos de polímeros como ABS e Poliamida, aquecidos e com um cabeçote movimentando-se nas coordenadas  $xy$ , além de uma plataforma movimentando-se no sentido vertical na coordenada  $z$ . No cabeçote, fios do material termoplástico são direcionados, por guias rotativas, a atravessarem dois bicos extrusores aquecidos.

Um bico recebe material para a construção do objeto 3D enquanto outro recebe material para ser utilizado como suporte para a fabricação. Ao final de cada camada a plataforma se desloca para baixo, com uma distância igual à espessura de

camada, formando camadas superpostas de filamento até formar o objeto pretendido (figura 6).



**Figura 6: Processo de FDM (Stratasys).**

Por outro lado, as máquinas de prototipagem rápida subtrativa SRP utilizam a mesma base tecnológica já bem consolidadas do centro de usinagem CNC. A diferença entre elas é que enquanto esta é otimizada para a fabricação de objetos metálicos e ferramental em aço, as máquinas SRP são equipamentos portáteis que trabalham com materiais não metálicos como polímeros, madeira etc. Conforme figura 7, pode-se ver dois equipamentos baseados nesse conceito. Note a semelhança construtiva com os centros de usinagens tradicionais, mas em uma escala menor.



**Figura 7: Dois equipamentos que utilizam SRP (Stratasys).**

Por serem equipamentos de pequeno porte podem ser ligados em redes domésticas de energia elétrica e necessitam de pouca manutenção. Trabalham com baixo nível de ruído e não utilizam sistemas de refrigeração e filtragem. Segundo Curtis (2006), esses equipamentos são fáceis de operar e geralmente contam com software CAM integrado e otimizado para o processo de prototipagem, proporcionando a *designers* e engenheiros a possibilidade de criação de protótipos rápidos de excelente precisão e acabamento superficial.

Selhorst et al. (2006) explicitam a importância da integração e da rapidez entre as diversas fases de desenvolvimento de um produto, o que justifica a necessidade da passagem rápida do conceito do produto a sua produção.

Assim como centros de usinagem tradicionais, esses equipamentos utilizam os três eixos comuns de usinagem, x, y e z. Porém uma variedade considerável de equipamentos tem apresentado um quarto eixo de giro e trocadores automáticos de ferramentas, permitindo a usinagem parte traseira da peça logo após a finalização da primeira face. O que possibilita iniciar a construção do protótipo e retirá-lo do equipamento ao fim da usinagem sem interferência manual durante o processo.

O acabamento superficial e o tempo de execução dos protótipos também são consideravelmente melhores nos processos de SRP em relação aos de RP (WTEC, 2004).

Soma-se a isso, no caso do SRP, o fato de ser utilizado o mesmo processo tanto para a construção do protótipo de um produto, como para a produção seriada do produto final, o que valida ainda mais o seu uso.

### **3. PROJETO**

O projeto da “Impressora 3D” foi dividido em três partes: estrutura mecânica, eletrônica de controle e potência e programação.

#### **3.1. Mecânica**

Visando o uso do equipamento em ambientes residenciais e em escritórios de desenvolvimento, foram estabelecidas as dimensões máximas externas de: 600 mm (largura) x 300 mm (profundidade) x 400 mm (altura), resultando em um volume total de 72L, que é um tamanho compatível ao de computadores e impressoras domésticas convencionais.

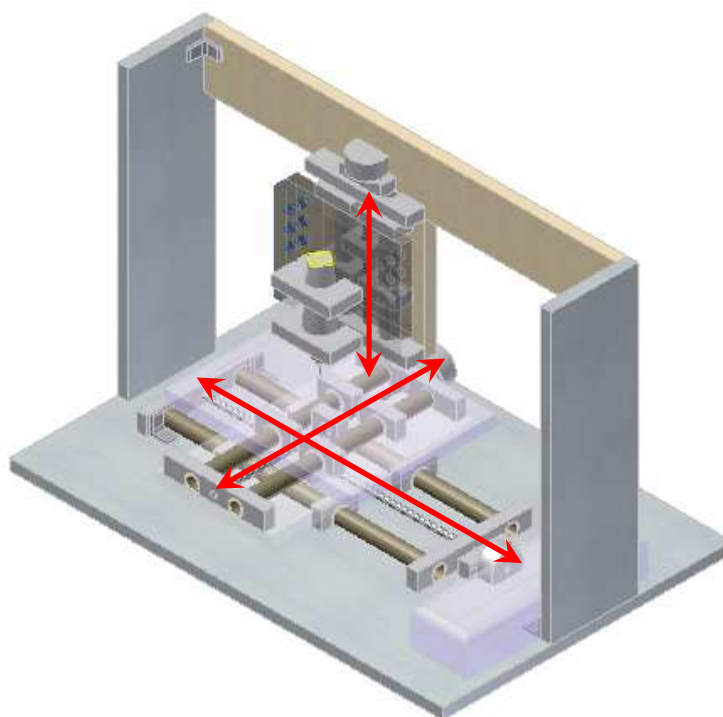
Foi possível chegar-se a um volume de trabalho interno e, portanto, a um tamanho máximo das peças geradas de: 370 mm(L) x 210 mm(P) x 160 mm(A) = 18L.

Com isso conseguiu-se um aproveitamento da área interna da máquina de 25%, o que corrobora o intuito de produzir um equipamento compacto.

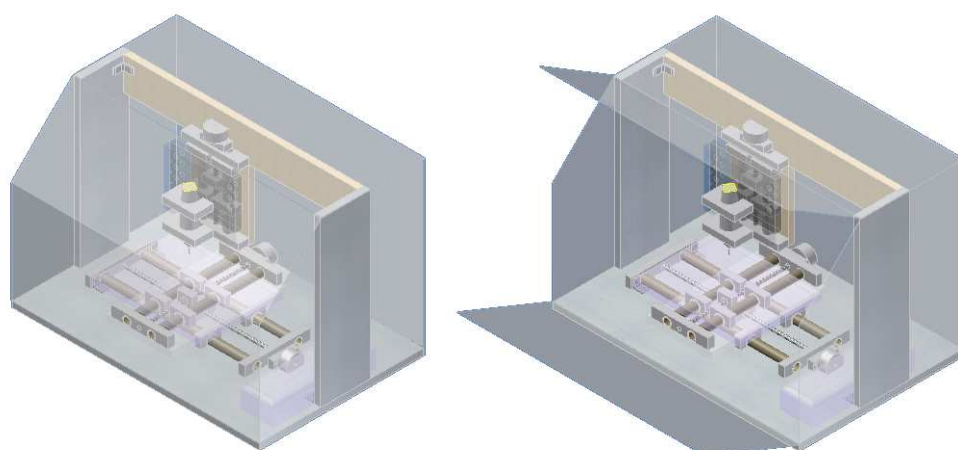
##### **3.1.1. Modelo em CAD**

O projeto da estrutura mecânica foi feito no software de CAD Inventor<sup>®</sup> da Autodesk e foram levadas em conta as premissas adotadas no projeto. Maiores detalhes do projeto em CAD, assim como os desenhos de fabricação podem ser vistos nos anexos.

Através das figuras 8 e 9, é possível ter uma visão geral do funcionamento do equipamento, bem como das movimentações nos eixos x, y e z.

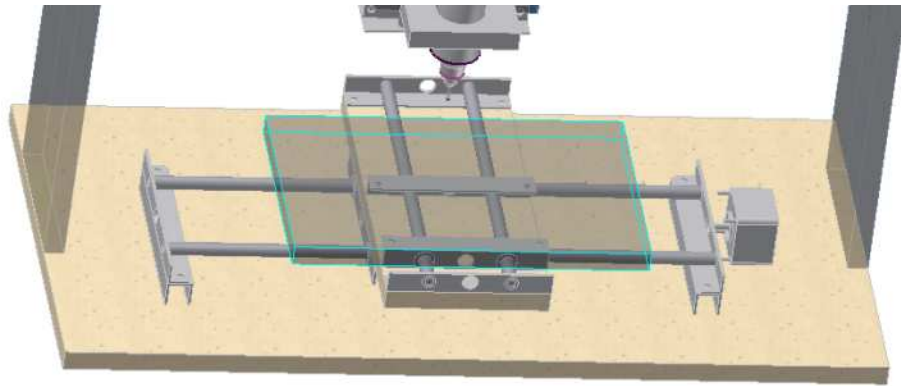


**Figura 8: Visão geral.**



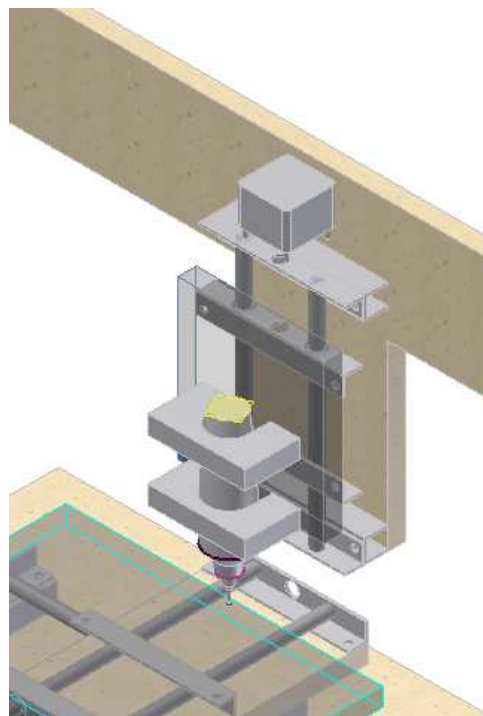
**Figura 9: "Impressora 3D" com cobertura de proteção.**

A figura 10, mostra em detalhes a mesa xy e o porta peças.



**Figura 10: Mesa xy e porta peças.**

Na figura 11, tem-se uma visão em detalhe da ferramenta e do eixo Z.



**Figura 11: Ferramenta e eixo z.**

### 3.1.2. Guias Lineares

Um dos grandes desafios de se construir uma máquina ferramenta com baixo custo foi o de se projetar um sistema de guias lineares preciso, barato, de baixo atrito e que não sofresse com o fenômeno de travamento e escorregamento (*stick-slip*).

As guias com fusos de esferas recirculantes poderiam resolver esse problema, mas devido ao seu alto custo (dentro dos requisitos do projeto), essa alternativa foi descartada.

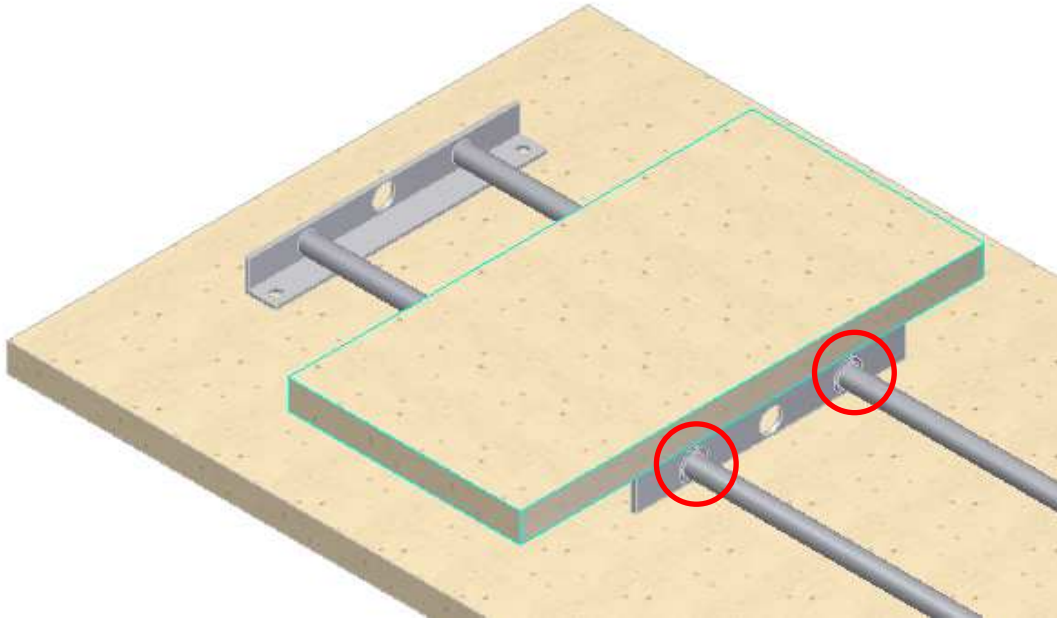
Após pesquisa, foi escolhida uma solução que utiliza buchas auto lubrificantes “iglidur® G” da empresa IGUS em conjunto com tubo circulares de aço carbono.

Segundo dados de seu fabricante, as buchas “iglidur® G” não necessitam manutenção, são resistentes à corrosão, insensíveis a sujeira e tem um coeficiente de atrito dinâmico  $\mu$  no aço entre 0,08 e 0,15 e permitem velocidades lineares de até 4m/s.



**Figura 12: Bucha "iglidur® G" em detalhe (IGUS).**

A figura 13 mostra a montagem da guia linear com a bucha “iglidur® G”.



**Figura 13: Guia Linear.**

### 3.2. Eletrônica

Os desenhos de circuito da parte eletrônica da máquina foram feitos no software EAGLE<sup>®</sup> da empresa Cadsoft. Maiores detalhes desses circuitos podem ser vistos nos anexos.

O projeto eletrônico da máquina consiste um micro controlador principal, drivers de potência para o acionamento de motores de passo e da ferramenta de fresa, leds informativos e demais componentes eletrônicos de suporte para estas operações.

Uma visão esquemática da eletrônica pode ser vista a seguir na figura 14.

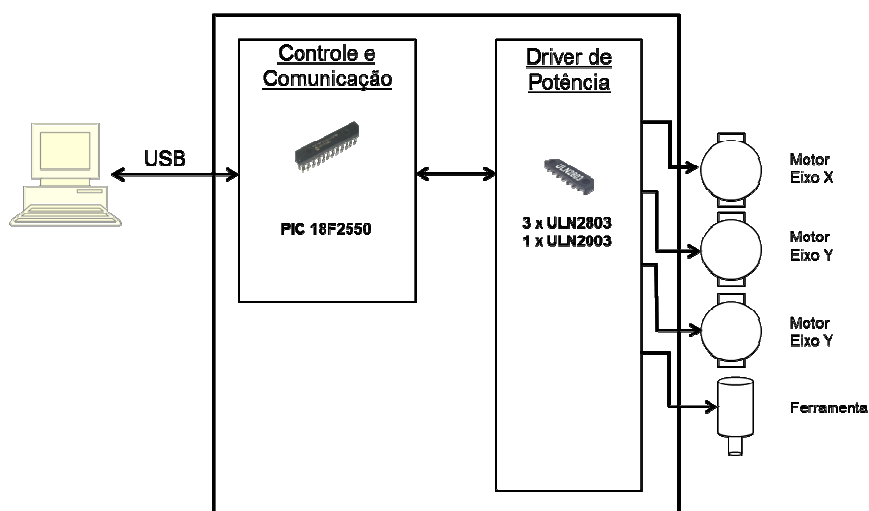


Figura 14: Visão esquemática da eletrônica.

#### 3.2.1. Estudo do tipo de comunicação com o PC

A impressora 3D precisa de uma via de comunicação bidirecional para que a sua interface possa enviar os comandos que, a partir do código G gerado para a formação da peça 3D, acionem os motores dos eixos e da ferramenta. Esta via é

necessária também para a leitura de seus sensores, para o funcionamento do painel de LEDs e para o controle manual da impressora.

O uso da porta paralela para a comunicação com o PC, por ser mais simples, foi cogitado e estudado. Porém, como a disponibilidade desta porta é cada vez mais rara nos computadores modernos e, como o uso da porta serial ou USB substituiu completamente o seu uso, esse tipo de comunicação foi descartado.

Outro tipo de comunicação cogitado o uso a interface serial padrão RS-232, pois praticamente todos os micro controladores disponíveis comercialmente possuem essas portas implementadas. Porém essa interface serial está cada vez sendo menos utilizada e é pouco encontrada em computadores e notebooks modernos, o que dificulta o seu uso. Seria possível utilizar conversores do tipo “RS-232 para USB” para contornar esse problema, mas esse tipo de adaptação leva a uma série de incompatibilidades e acrescenta atrasos indesejáveis à comunicação com o PC. Sendo assim, esse tipo de interface também foi descartado.

Por outro lado, como muitos PCs dispõem de apenas portas USB para comunicação externa e vários micro controladores de baixo custo atualmente já dispõem de portas USB implementadas, essa interface foi a escolhida para esse projeto.

### **3.2.2. Estudo e seleção do micro controlador**

A função do micro controlador é receber os dados enviados pela porta USB do PC e convertê-los em sinais que possam acionar os motores que controlam os eixos da impressora e a ferramenta de usinagem. É, também, sua função enviar ao PC os sinais gerados pelos sensores (de segurança, fim de curso etc.), manter o funcionamento do painel de LEDs da impressora (que informam o seu estado) e fazer todo o controle de operação e de erros desta.

Como um dos requisitos do projeto é o baixo custo de produção da impressora, toda a complexidade de se tratar o código G, verificar sua sintaxe e

calcular as interpolações que geram os movimentos de usinagem foi deixada a cargo do PC e apenas as funções mínimas de comunicações e acionamentos são de responsabilidade do micro controlador. Sendo assim, foi escolhido o micro controlador mais simples e de menor custo que fosse capaz de realizar essas tarefas.

Tendo em mente esses requisitos, a escolha foi pelo micro controlador PIC 18F2550 da Microchips.

A família de micro controladores PIC pertencente à classe dos micro controladores programáveis de arquitetura Harvard e possui conjunto reduzido de instruções (RISC). Em síntese, é um microcomputador completo, consistindo de uma memória RAM, memória não volátil EEPROM, memória de programa, controladores de E/S digital e analógica (opcional) em torno de uma CPU com um conjunto reduzido de instruções, dentro de um único chip.

O 18F2550 é um micro controlador de 8 bits de baixíssimo custo com 32kbytes de memória flash, 28 pinos (sendo 25 destes para I/O), operação entre 2V e 5,5V, baixo consumo de energia, uma porta USART para comunicação serial RS-232, uma porta USB full speed, 4 contadores (três de 16bits e um de 8bits), 10 canais de conversão A/D com 10 bits cada e dois módulos CCP: Capture, Compare e PWM.

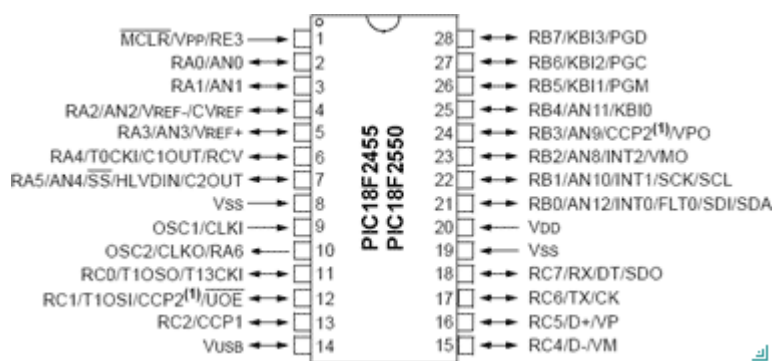


Figura 15: PIC 19F2550.

### 3.2.3. Circuitos eletrônicos

A eletrônica foi dividida em duas partes principais descritas em maiores detalhes a seguir.

#### Eletrônica de Controle:

Responsável pela comunicação com o PC via interface USB, pelo controle dos motores de passo e do acionamento da ferramenta com controle de velocidade por PWM.

A figura 16 mostra como isso foi feito.

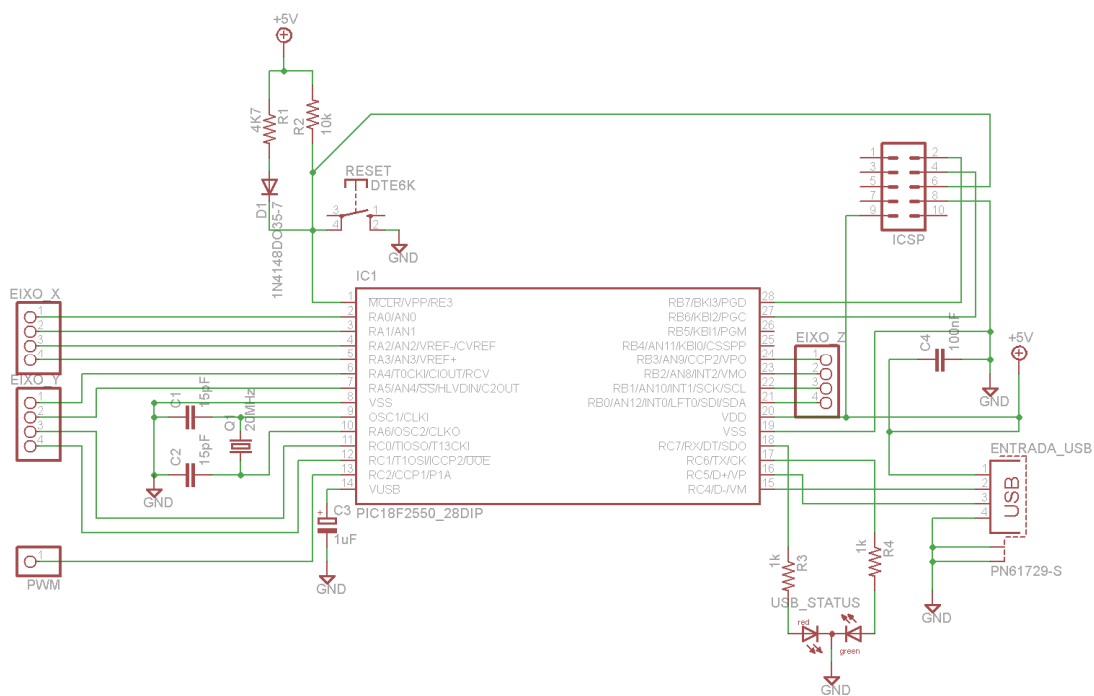


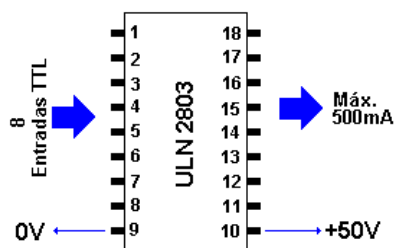
Figura 16: Circuito de Controle.

### Eletrônica de Potência:

Responsável pelo acionamento dos motores de passo e da ferramenta.

Utiliza como drivers de potência três circuitos integrados ULN2803 e um ULN2003.

O ULN2803 é um circuito integrado de baixo custo composto por oito transistores de potência em arranjo *darlington*, sendo assim possui oito entradas que podem controlar até oito saídas com correntes de até 500 mA e tensão de até 50V. Com ele, pode-se controlar até dois motores de passo simultaneamente. Nesse projeto foi adotada a técnica de conectar as saídas em paralelo, duas a duas, para obter-se o dobro da corrente máxima, no caso 1 A.



**Figura 17: ULN2803.**

Já o CI ULN2003 possui as mesmas características do ULN 2803, mas com apenas sete entradas e saídas. Para projetos nos quais não é preciso utilizar um número múltiplo de oito entradas e saídas, ele se torna a escolha ideal, pois custa apenas uma fração do já econômico ULN2803.

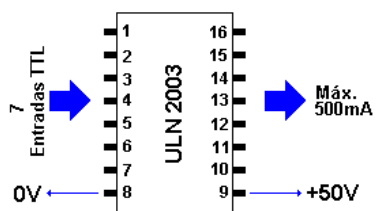


Figura 18: ULN2003.

Na figura 19, vê-se em detalhes a eletrônica de potência.

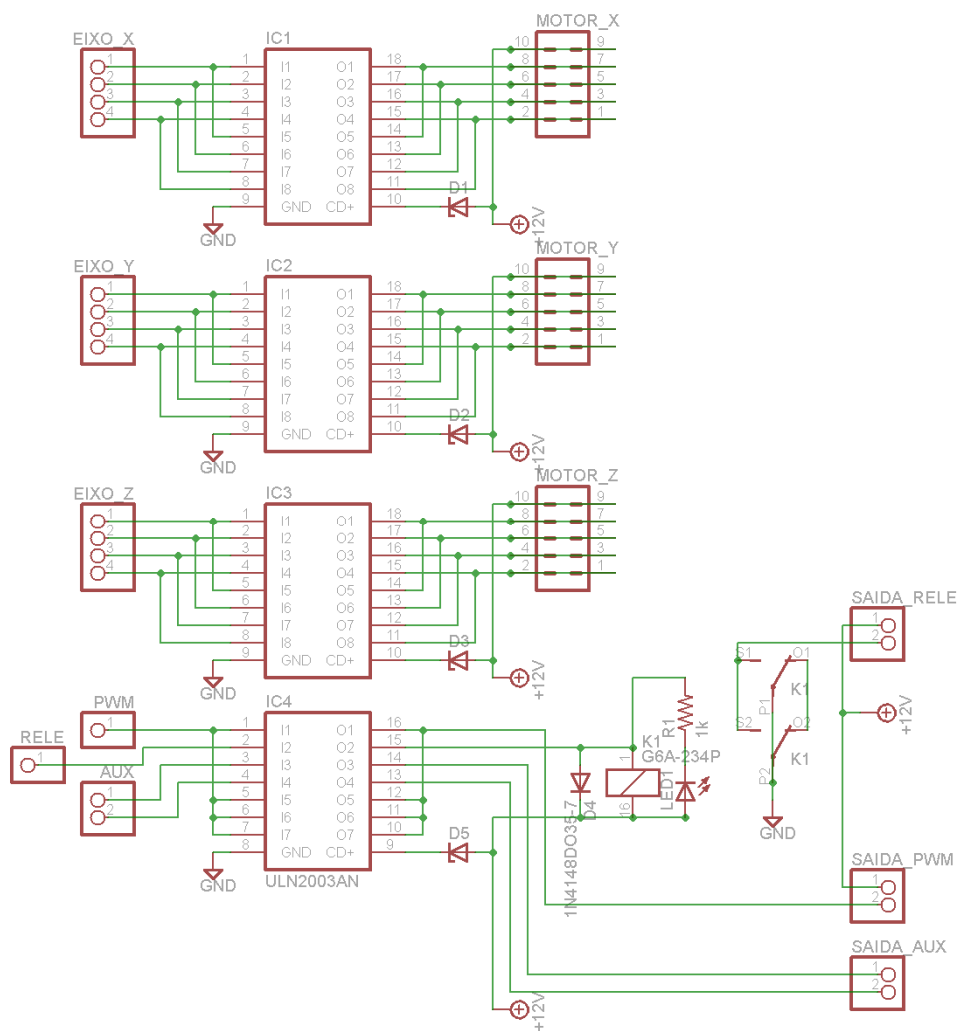


Figura 19: Eletrônica de Potência.

### 3.3. Programação

A programação da máquina se divide basicamente em duas partes: a programação do micro controlador e a programação da interface gráfica com o usuário.

#### 3.3.1. Programação do micro controlador

A programação do micro controlador, feita em linguagem C, é responsável pelo controle da comunicação USB com o PC, pelo acionamento dos motores de passo dos três eixos, do motor da ferramenta (SPINDLE) via controle PWM, e do acionamento dos leds informativos.

A figura 20, abaixo, representa o fluxograma simplificado da parte principal do programa do micro controlador.

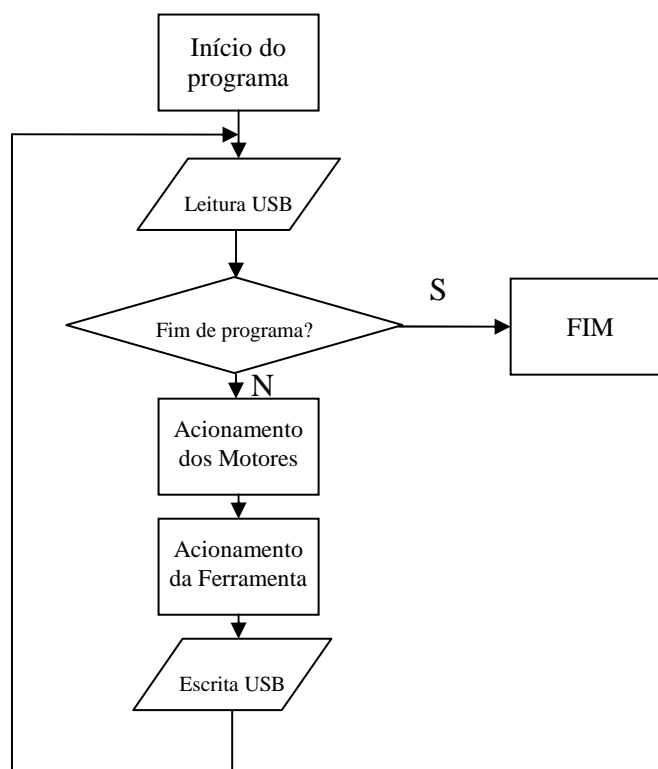


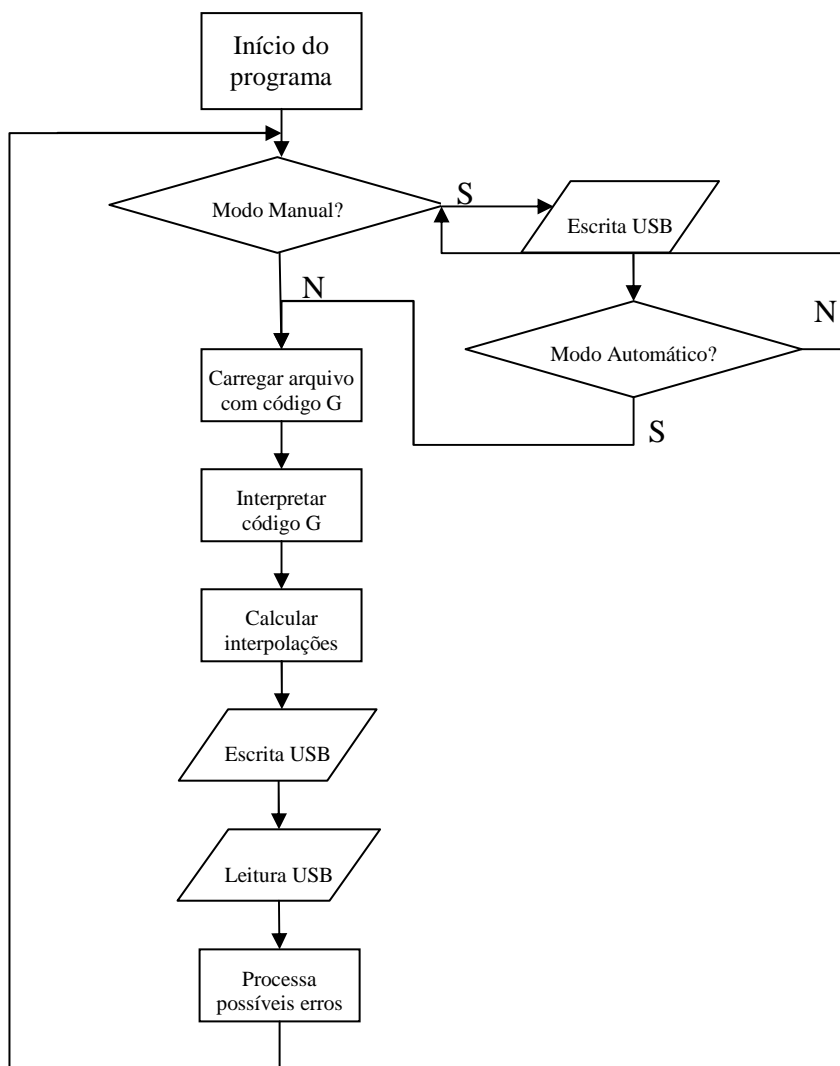
Figura 20: Fluxograma do programa do micro controlado.

### 3.3.2. Programação da Interface

Através dessa interface, o usuário poderá controlar o funcionamento da máquina tanto em modo manual como em modo automático, carregando um arquivo contendo o código G com as instruções para a usinagem da peça.

A programação da interface gráfica, feita em linguagem C#, é responsável por manter a comunicação USB com o micro controlador, pelo controle manual da máquina, carregamento do arquivo contendo o código G, interpretação do código G em movimento sincronizado dos motores de passo, interpolações lineares em duas e três dimensões e pela interface gráfica, através de janelas, com o usuário.

A figura 21 representa o fluxograma simplificado da interface gráfica com o usuário.



**Figura 21: Fluxograma da interface gráfica com o usuário.**



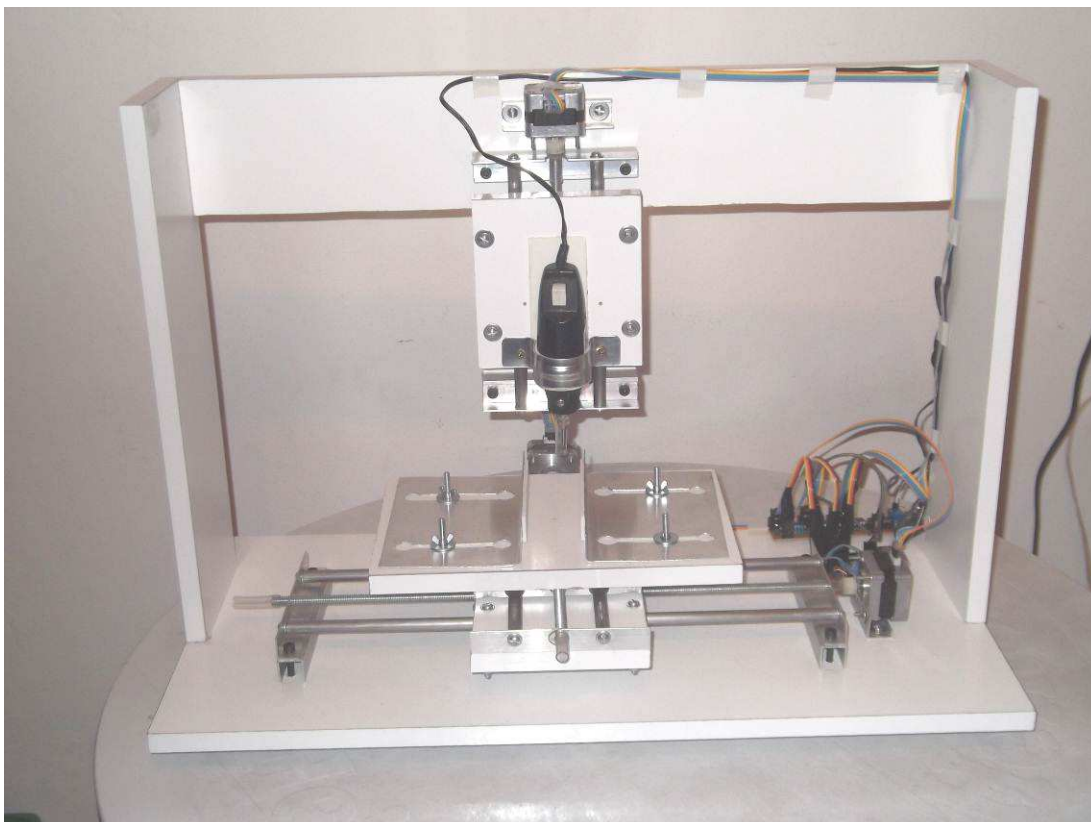
Figura 22: Interface com o usuário.

## 4. RESULTADOS

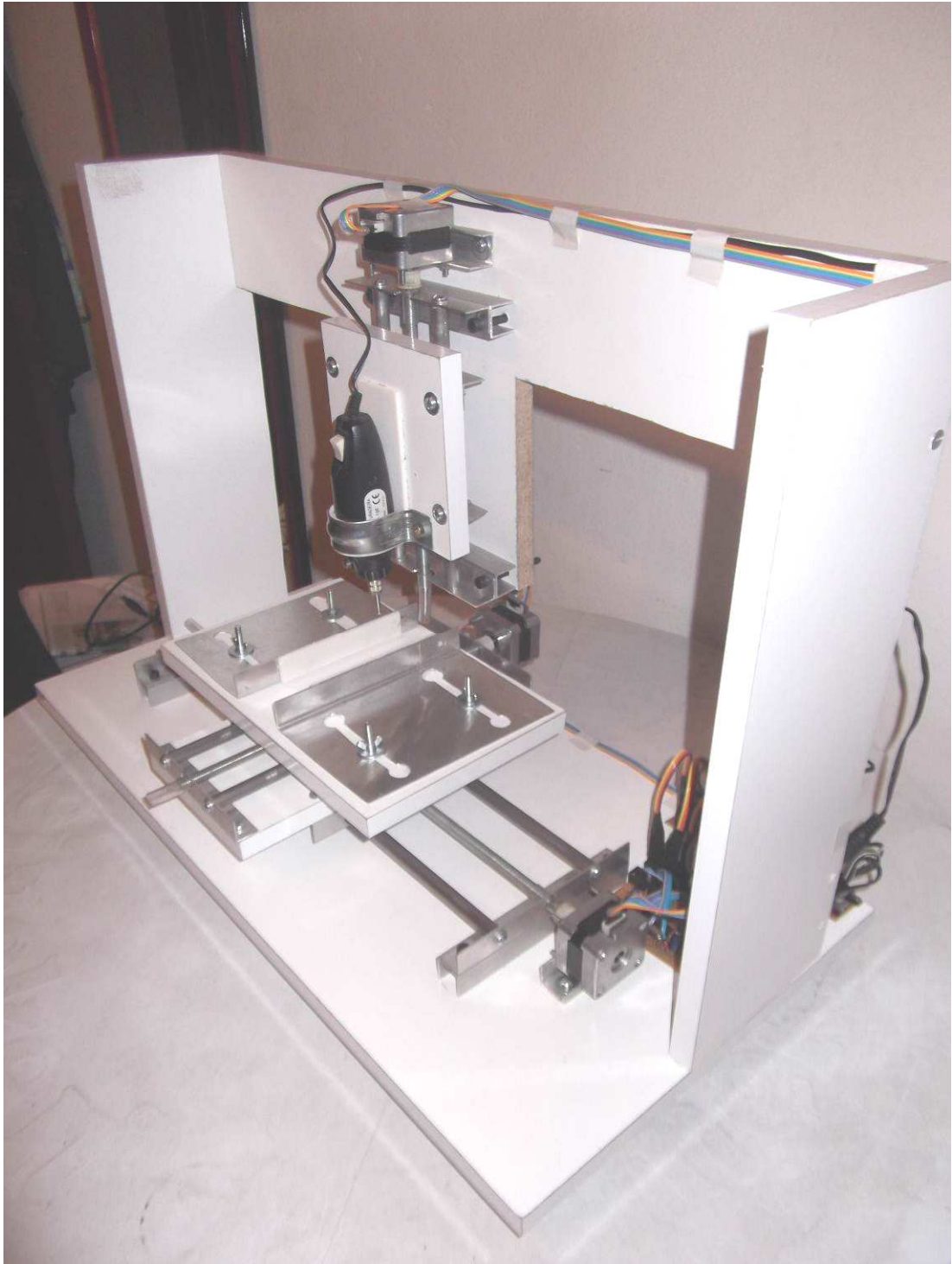
Foi possível executar com sucesso as todas as etapas anteriormente descritas. Segue abaixo um detalhamento dos subsistemas após a sua construção.

### 4.1. Mecânica

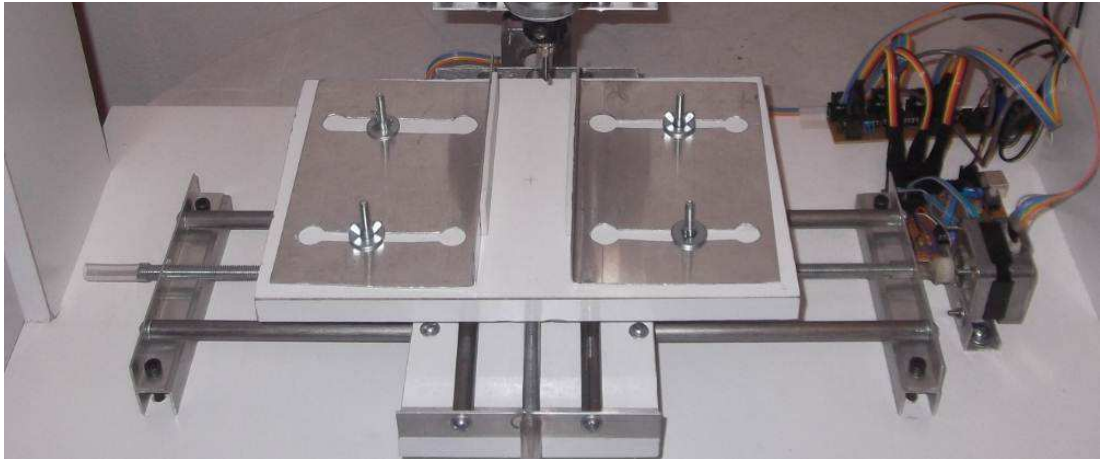
Nas figuras 23 e 24, tem-se uma visão geral da “Impressora 3D” pronta.



**Figura 23: Vista frontal da "Impressora 3D".**



**Figura 24: Vista lateral da "Impressora 3D".**

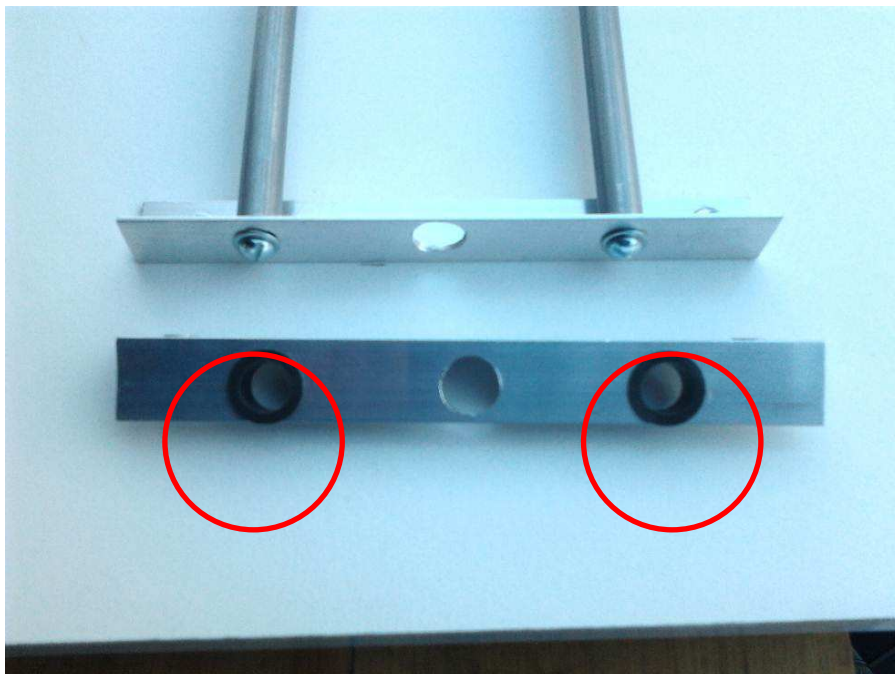


**Figura 25: Mesa xy e porta peça.**



**Figura 26: Eixo z e ferramenta.**

Nas figuras 27, 28 e 29 é mostrado em detalhes o uso das buchas Iglidur<sup>®</sup> nas guias lineares.



**Figura 27: Detalhe bucha Iglidur<sup>®</sup>.**



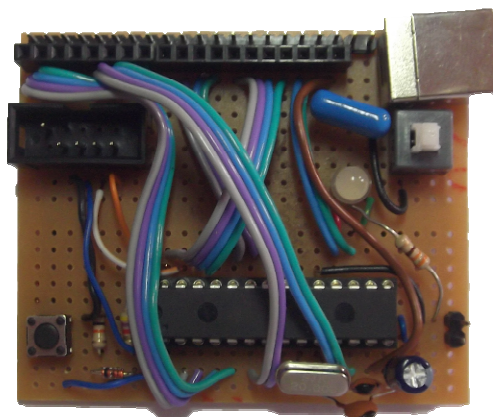
**Figura 28: Tubos do aço carbono.**



**Figura 29: Guia Linear montada.**

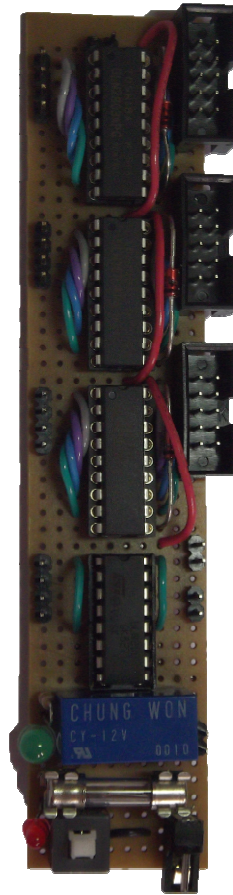
#### **4.2. Eletrônica**

A figura 30 mostra a placa de Controle construída.



**Figura 30: Placa de Controle.**

A figura 31 mostra a placa de com a eletrônica de potência construída.



**Figura 31: Placa com eletrônica de potência.**

### 4.3. Interface

Vê-se na figura 32 a tela principal da interface com o usuário.

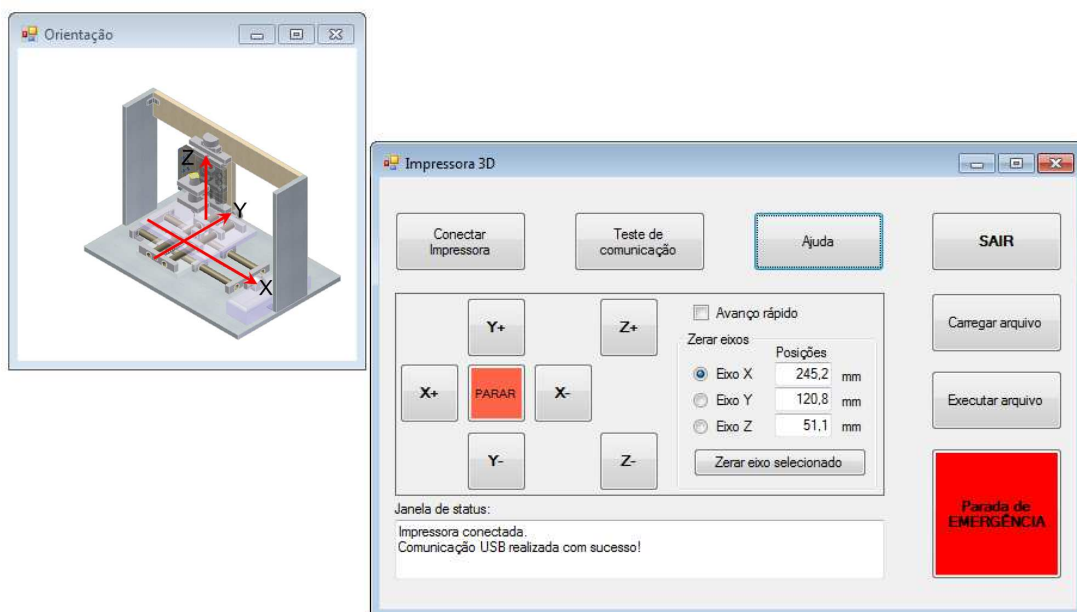


Figura 32: Interface com o usuário.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho, de projetar e construir um protótipo de uma “impressora 3D”, foi plenamente atingido.

Foi possível realizar a construção do protótipo da máquina com um custo dentro do valor proposto de US\$ 100,00, o que torna esse produto acessível para o público a que ele se destina.

Também se pode ressaltar que esse foi um custo de fabricação de apenas uma unidade e, portanto, o custo de uma produção seriada seria ainda menor.

Ainda, foi possível atingir o objetivo de construir essa máquina de forma compacta, com dimensões e peso reduzidos.

Finalmente, pelas análises realizadas e pelos resultados obtidos nota-se que é promissor e viável o uso deste produto diferenciado.

## 6. REFERÊNCIAS

3D SYSTEM. Disponível em <<http://printin3d.com/3d-printers>>. Acesso em: 04 nov. 2011.

CURTIS, Will. *Rapid Prototyping – Truly Functional Prototype*. 2006. Disponível em: <<http://www.timecompression.com/articles/truly-functional-prototypes>>. Acesso em: 08 out. 2011.

CUSTOM PART NET. *Selective laser sintering*. 2011. Disponível em: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>. Acesso em: 06 nov. 2011.

GORNI, Antonio Augusto. *Introdução à Prototipagem Rápida e seus Processos*. 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/protrap.html>>. Acesso em: 04 nov. 2011.

GRIMM, Todd. *Choosing the Right RP System*. 2005. Disponível em: <<http://www.docstoc.com/docs/29088154/Choosing-The-Right-RP-System>>. Acesso em: 19 out. 2011.

IGUS. *Iglidur® G – The All-Round Performer*. 2010. Disponível em: <[http://www.igus.com/\\_Product\\_Files/Download/pdf/02\\_GL2\\_E\\_igl\\_G\\_RZ1.pdf](http://www.igus.com/_Product_Files/Download/pdf/02_GL2_E_igl_G_RZ1.pdf)>. Acesso em: 11 set. 2011.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *PIC 18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*. 2006.  
Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>>.  
Acesso em: 11 set. 2011.

MILWAUKEE SCHOOL OF ENGINEERING. *Solid Freeform Fabrication*. 2011.  
Disponível em: <[http://www.msoe.edu/academics/research\\_centers/reu/solid\\_freeform\\_fabrication.shtml](http://www.msoe.edu/academics/research_centers/reu/solid_freeform_fabrication.shtml)>. Acesso em: 04 nov. 2011.

SELHORST at al. *Análise comparativa entre os processos de prototipagem rápida por deposição ou remoção de material na concepção de novos produtos*. 2006.  
Disponível em: <[http://www.proinova.com.br/admin/biblioteca\\_upload/121001084.pdf](http://www.proinova.com.br/admin/biblioteca_upload/121001084.pdf)>. Acesso em: 08 out. 2011.

STRATASYS INC. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/Products.aspx>>.  
Acesso em: 04 nov. 2011.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola Politécnica, Divisão de Bibliotecas.  
*Diretrizes para apresentação de Dissertações e teses*. 3 ed. São Paulo: Poli-USP, 2006.

WORLD TECHNOLOGY EVALUATION CENTER, INC. – WTEC.  
*Additive/Subtractive manufacturing research and development in Europe*. 2004.  
Disponível em: <<http://www.wtec.org/additive/report/additive-report.pdf>>. Acesso em: 08 out. 2011.

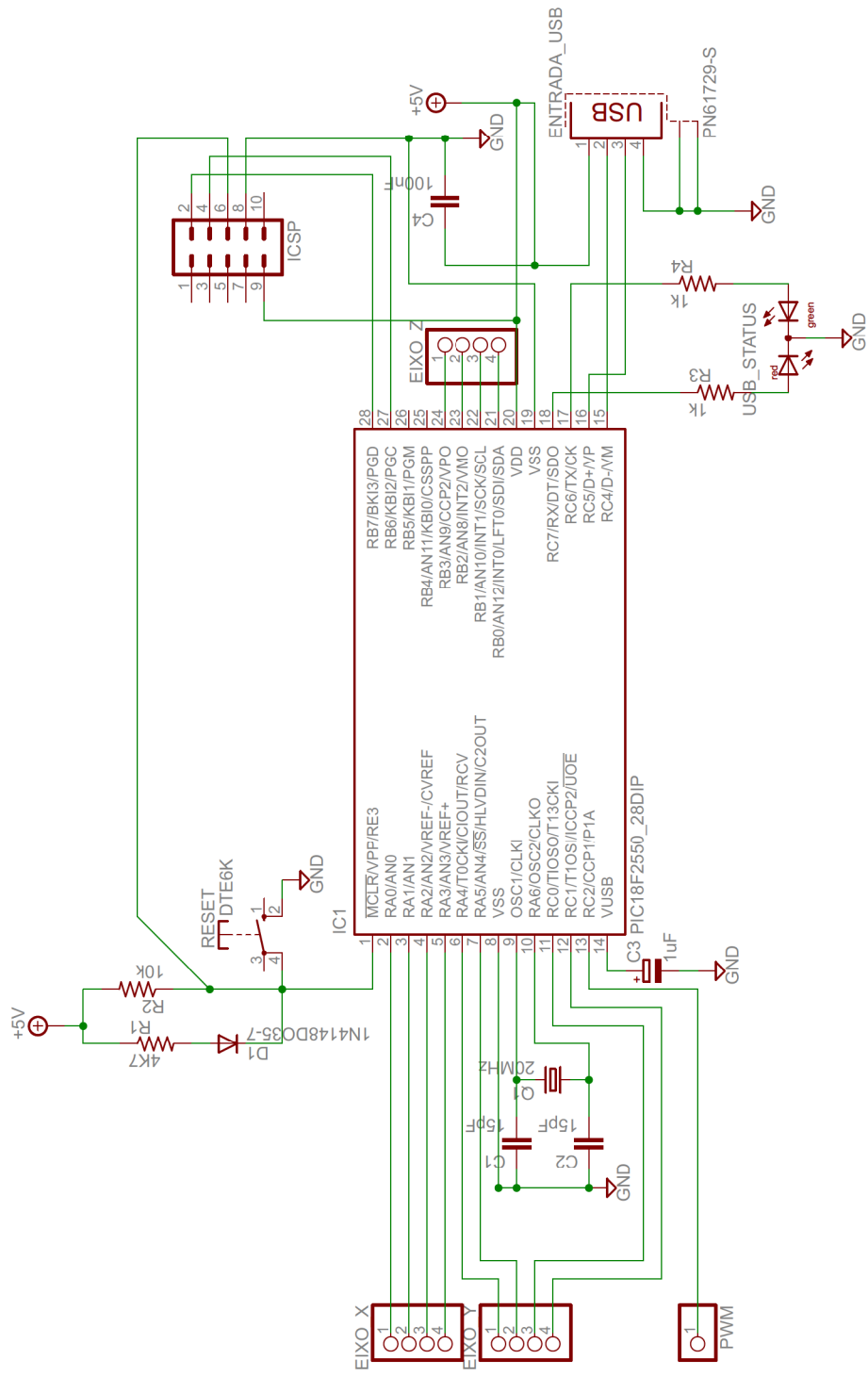
Z CORPORATION. Disponível em: <<http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/spage.aspx>>. Acesso em: 04 nov. 2011.

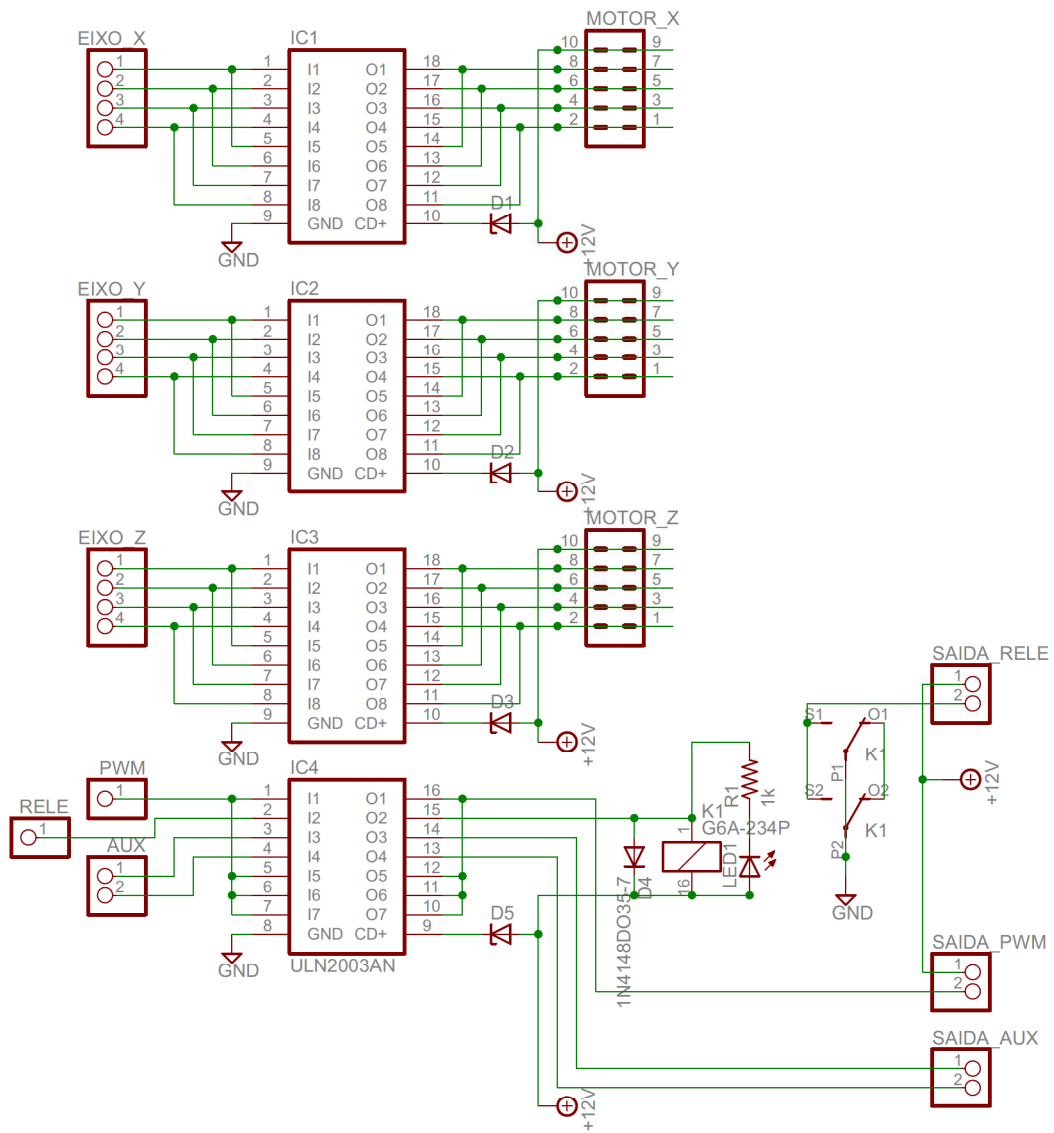
## 7. ANEXOS

### 7.1. Planilha de Custos

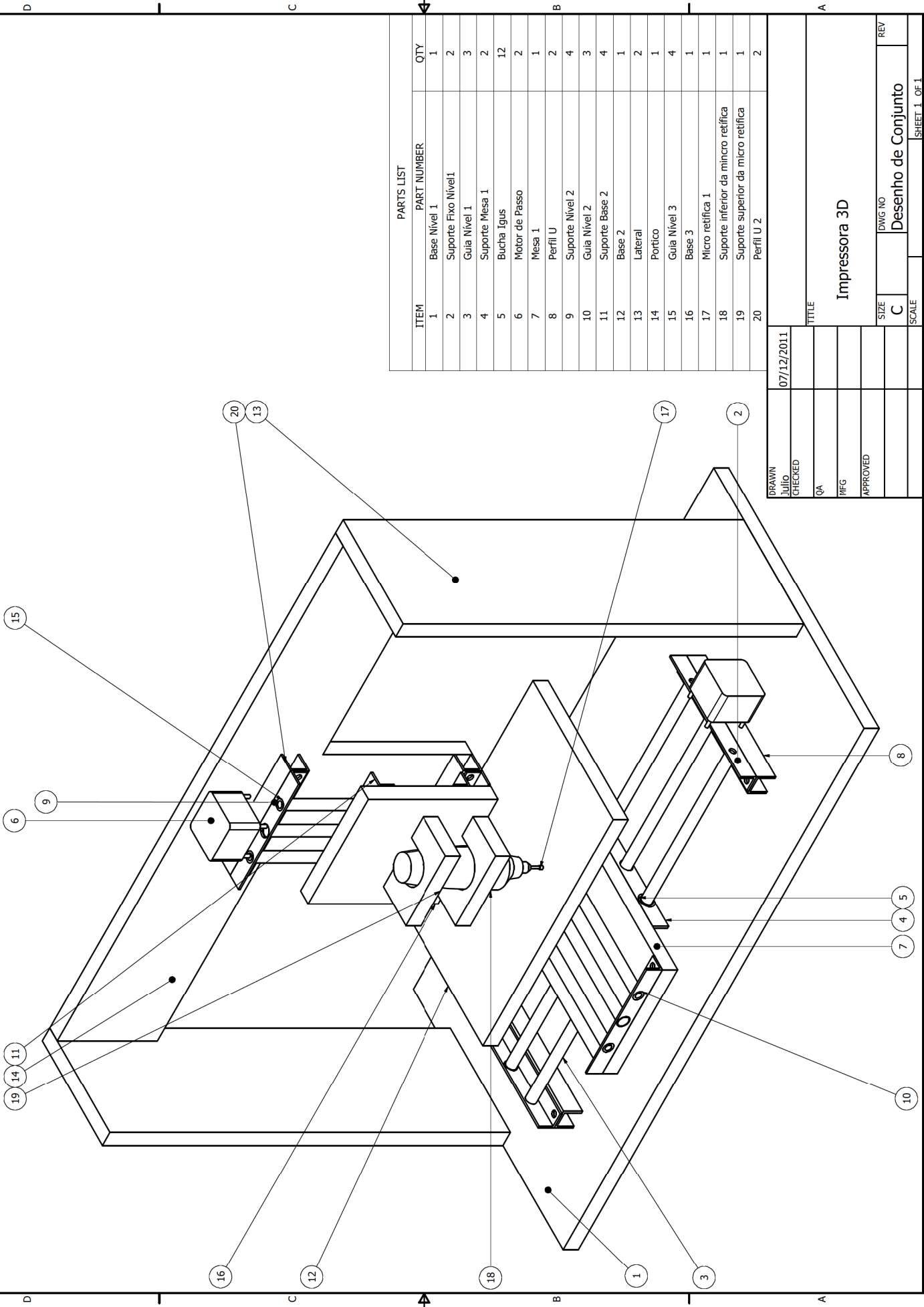
<b>Estrutura Mecânica:</b>						
Descrição	Custo efetivo do protótipo			Custo estimado para produção seriada		
	Preço	Quantidade	Total	Preço	Quantidade	Total
Micro retífica	R\$ 30,00/unid.	1	R\$ 30,00	R\$ 20,00/unid.	1	R\$ 20,00
Tubos de aço 10 mm para guias	R\$ 2,80/m	2	R\$ 5,60	R\$ 2,00/m	2	R\$ 4,00
MDP 15 mm	R\$ 40,00/m <sup>2</sup>	0,5	R\$ 20,00	R\$ 30,00/m <sup>2</sup>	0,5	R\$ 15,00
Chapas e perfis	R\$ 10,00/unid.	1	R\$ 10,00	R\$ 7,00/unid.	1	R\$ 7,00
Barra roscada (M6)	R\$ 4,00/m	1	R\$ 4,00	R\$ 3,00/m	1	R\$ 3,00
Parafusos e porcas	R\$ 0,50/unid.	30	R\$ 15,00	R\$ 0,35/unid.	30	R\$ 10,50
Outros	R\$ 10,00/unid.	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00/unid.	1	R\$ 5,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 94,60</b>			<b>R\$ 64,50</b>
<b>Eletroeletrônica:</b>						
Descrição	Custo para protótipo			Custo para produção seriada		
	Preço	Quantidade	Total	Preço	Quantidade	Total
Micro controlador PIC18F2550	R\$ 19,00/unid.	1	R\$ 19,00	R\$ 14,00/unid.	1	R\$ 14,00
Micro motor de passo (Nema 17)	R\$ 13,00/unid.	3	R\$ 39,00	R\$ 9,00/unid.	4	R\$ 36,00
Drive para motor UNL2803	R\$ 2,50/unid.	3	R\$ 7,50	R\$ 1,75/unid.	4	R\$ 7,00
Drive para ferramenta UNL2003	R\$ 1,50/unid.	1	R\$ 1,50	R\$ 1,05/unid.	4	R\$ 4,20
Leds, resistores, diodos, capacitores, fios e outros	R\$ 10,00/unid.	1	R\$ 10,00	R\$ 7,00/unid.	1	R\$ 7,00
<b>TOTAL</b>			<b>R\$ 77,00</b>			<b>R\$ 68,20</b>
<b>TOTAL GERAL</b>			<b>R\$ 171,60</b>			<b>R\$ 132,70</b>

## 7.2. Desenhos de Circuitos





## **7.2. Desenhos de Fabricação**

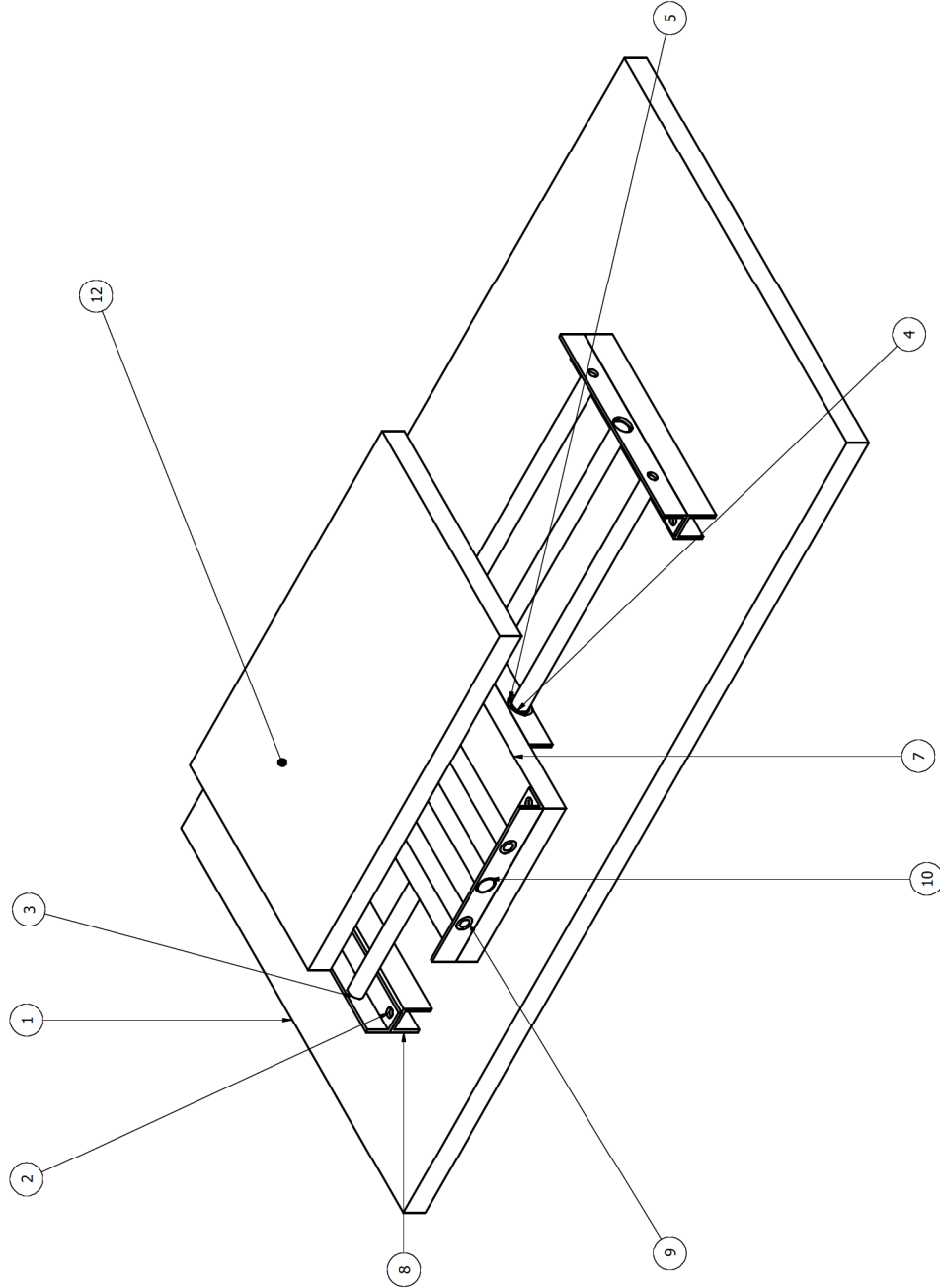


PARTS LIST		
ITEM	PART NUMBER	QTY
1	Base Nivel 1	1
2	Suporte Fixo Nivel1	2
3	Guia Nivel 1	3
4	Suporte Mesa 1	2
5	Bucha Tgus	12
6	Motor de Passo	2
7	Mesa 1	1
8	Perfil U	2
9	Suporte Nivel 2	4
10	Guia Nivel 2	3
11	Suporte Base 2	4
12	Base 2	1
13	Lateral	2
14	Portico	1
15	Guia Nivel 3	4
16	Base 3	1
17	Micro retifica 1	1
18	Suporte inferior da micro retifica	1
19	Suporte superior da micro retifica	1
20	Perfil U 2	2

DRAWN	07/12/2011	TITLE	Impressora 3D
CHECKED		SIZE	C
QA		SCALE	
MFG		DWG NO	Desenho de Conjunto
APPROVED		REV	

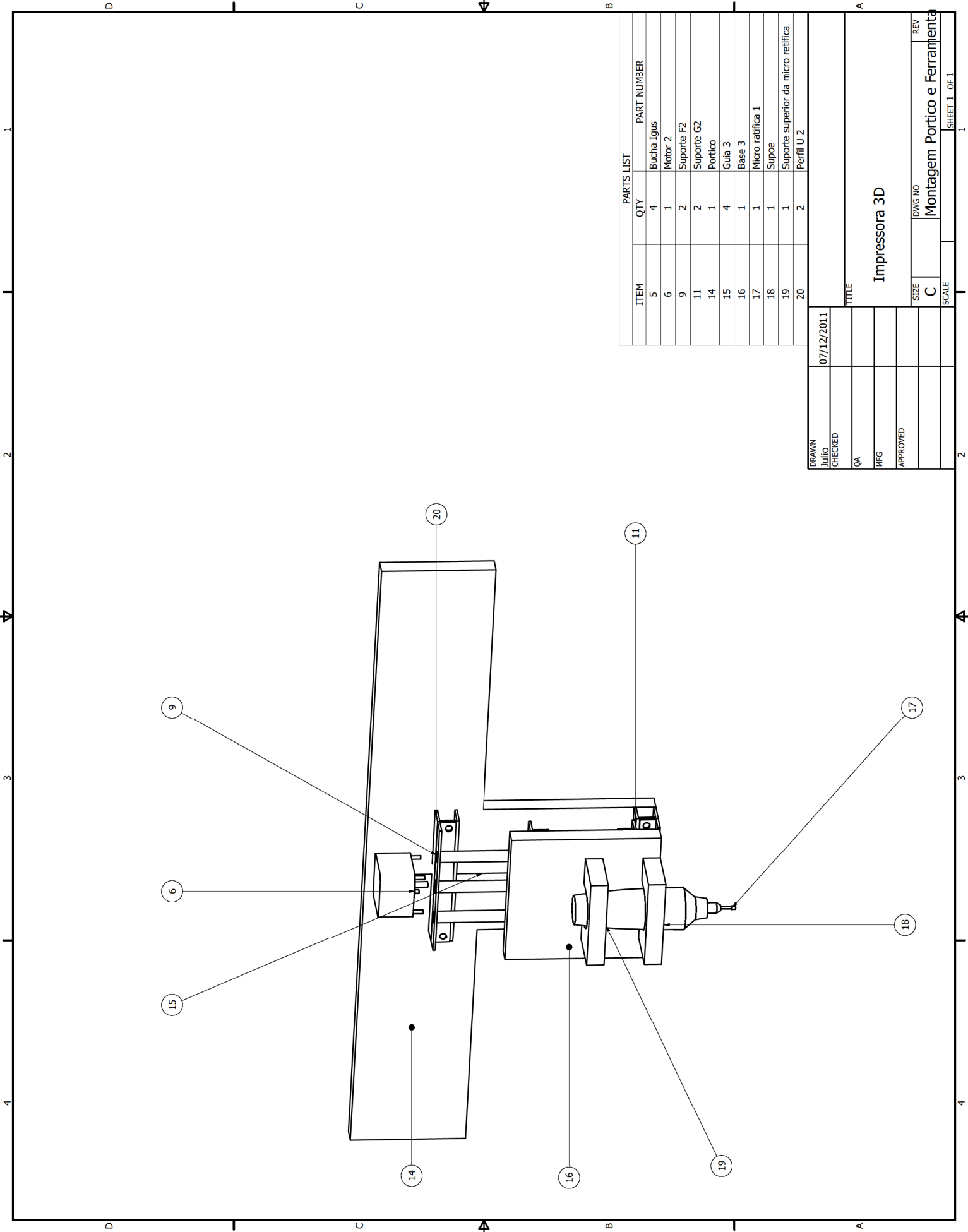
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Base 1
2	2	Supporte F1
3	3	Guia 1
4	2	Supporte G1
5	8	Bucha Igus
7	1	Mesa 1
8	2	Perfil U
9	2	Supporte F2
10	3	Guia 2
11	2	Supporte G2
12	1	Base 2

DRAWN	07/12/2011	TITLE	Impressora 3D
CHECKED		SIZE	C
QA		DWG NO	Montagem mesa xy
PMG		SCALE	
APPROVED		SHEET	1 OF 1
		REV	



ITEM	QTY	PART NUMBER
5	4	Bucha Igus
6	1	Motor 2
9	2	Supporte F2
11	2	Supporte G2
14	1	Portico
15	4	Guia 3
16	1	Base 3
17	1	Micro rectificca 1
18	1	Supoe
19	1	Supporte superior da micro rectificca
20	2	Perfil U 2

DRAWN	07/12/2011
CHECKED	
QA	
MFG	
APPROVED	
TITLE	
Impressora 3D	
SIZE	DWG NO
C	Montagem Portico e Ferramenta
SCALE	REV
	1

D

C

B

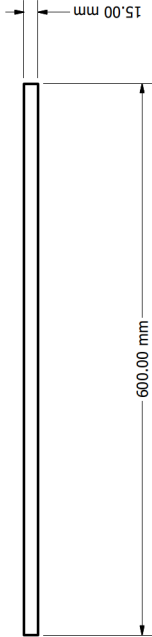
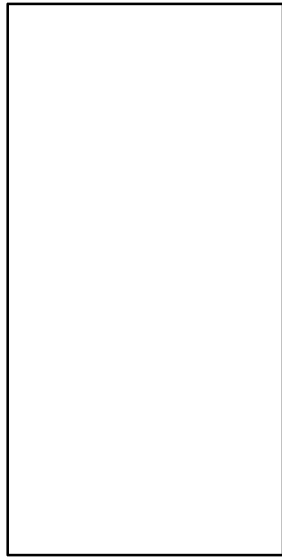
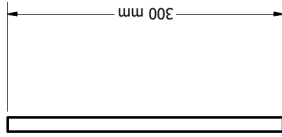
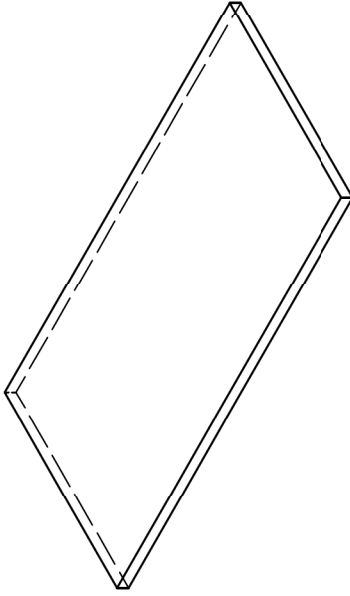
A

D

C

B

A



DRAWN	07/12/2011	TITLE	
CHECKED		Impressora 3D	
QA		SIZE	C
MFG		DWG NO	Base 1
APPROVED		SCALE	
			SHEET 1 OF 1





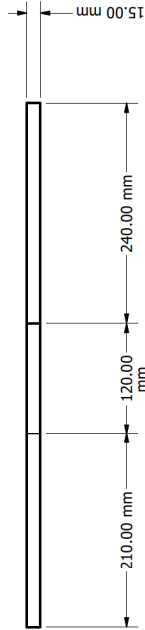
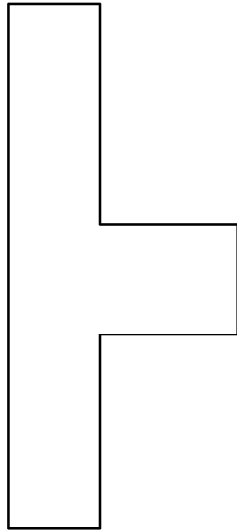
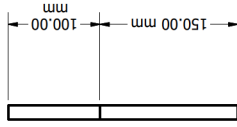
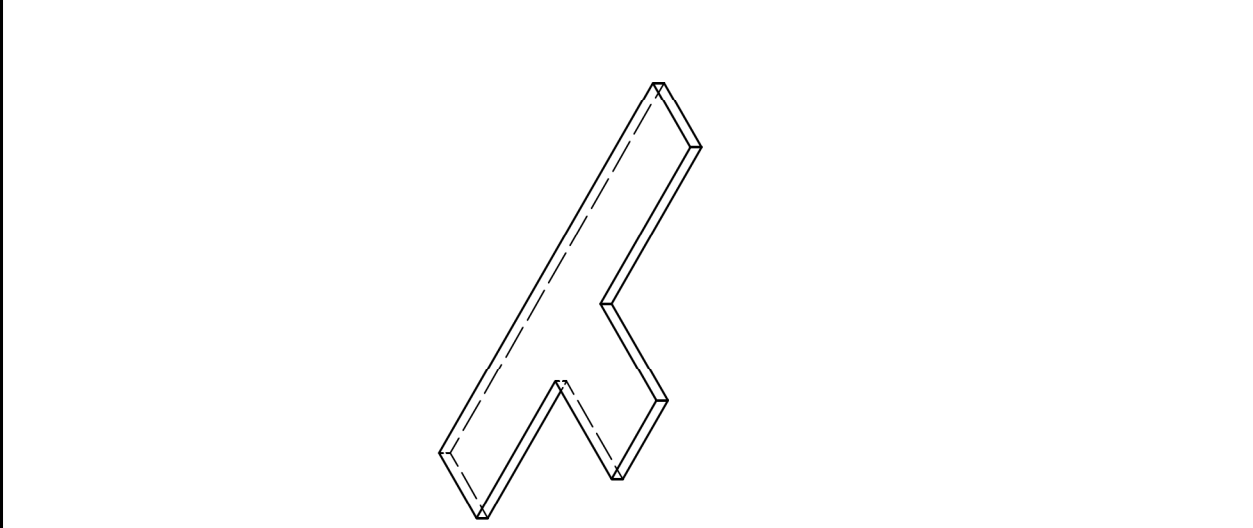
D

C

B

A

1



DRAWN	07/12/2011	TITLE	Impressora 3D
CHECKED		SIZE	C
QA		DWG NO	Portico
MFG		SCALE	
APPROVED		REV	

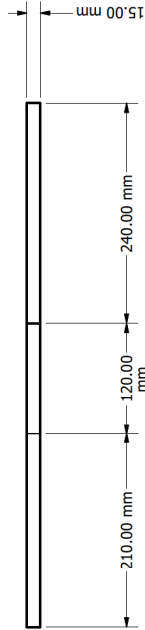
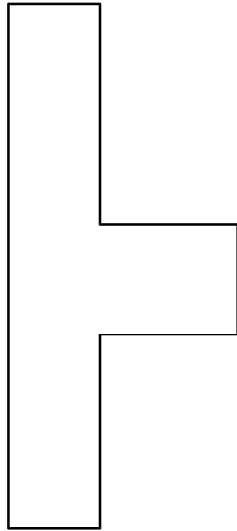
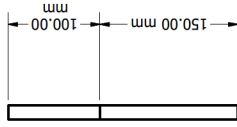
D

C

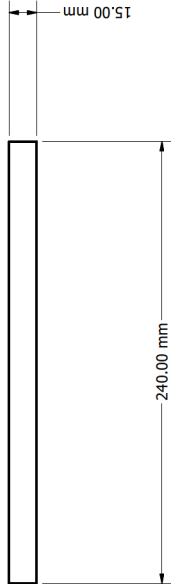
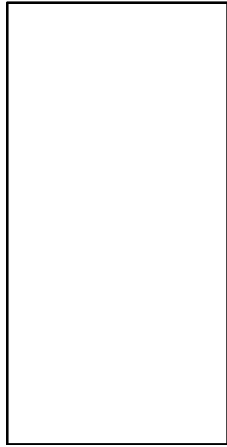
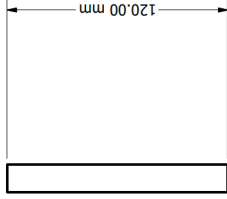
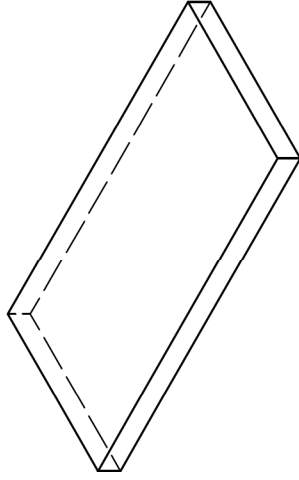
B

A

3







DRAWN	07/12/2011	TITLE	
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		SIZE	DWG NO
		C	Mesa 1
		SCALE	REV

Impressora 3D

D

I

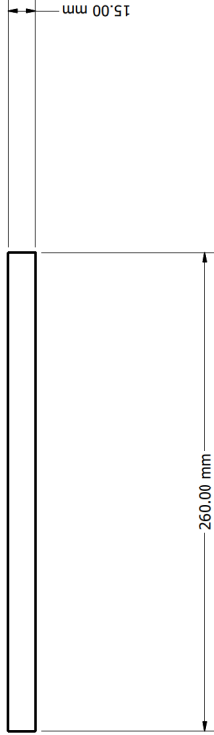
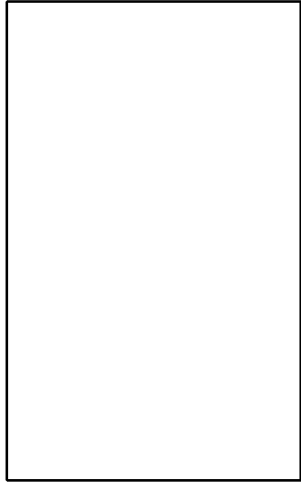
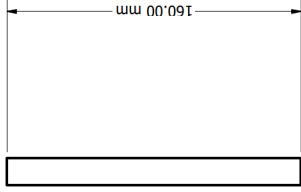
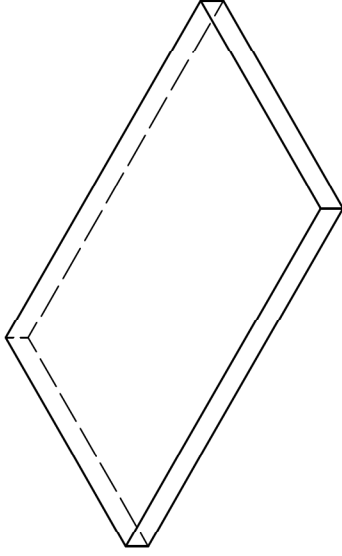
C

↓

B

I

A



DRAWN	07/12/2011	TITLE	Impressora 3D		REV
CHECKED					
QA					
MFG					
APPROVED		SIZE	C	DWG NO	Mesa 2
		SCALE			
					SHEET 1 OF 1

1

2

3

4

D

I

C

↓

B

I

A

1

2

3

4

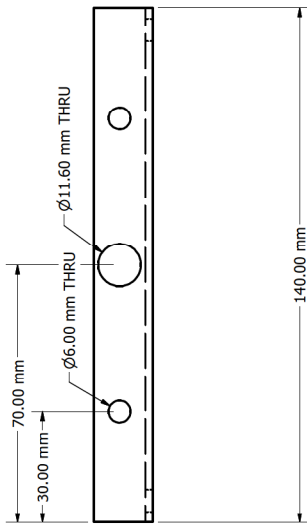
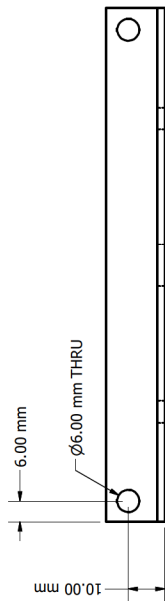
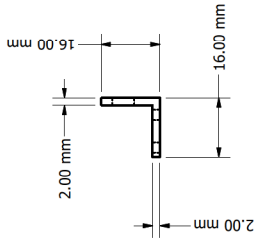
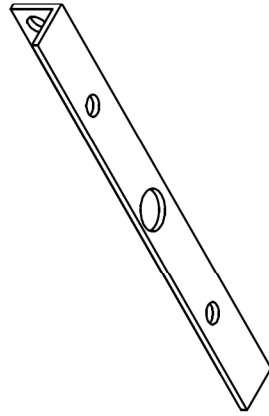
D

C

B

A

A



DRAWN	07/12/2011	TITLE	Impressora 3D
CHECKED		SIZE	C
QA		DWG NO	Suporte F1
MFG		SCALE	
APPROVED		REV	

D

C

B

A

A

1

2

3

4

1

2

3

4

D

I

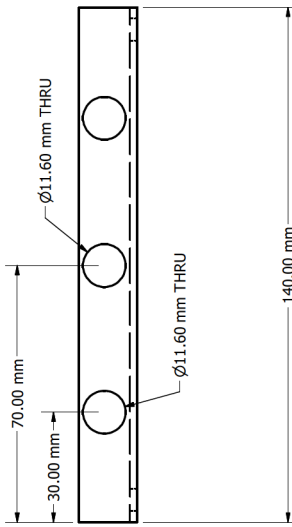
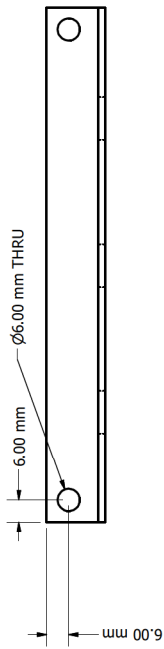
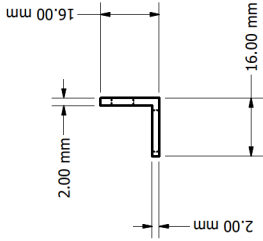
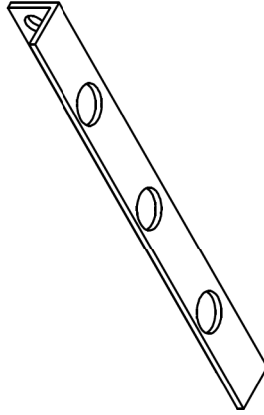
C

↓

B

I

A



DRAWN	07/12/2011	TITLE	
CHECKED			
QA			
MFG			
APPROVED			
		Impressora 3D	
		SIZE	DWG NO
		C	Suporte G1
		SCALE	REV

D

I

C

↓

B

I

A