

Claudio Abilio da Silveira

**INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE IMPRESSÃO 3D EM UMA
ARQUITETURA MODULAR DE POSICIONAMENTO
CARTESIANO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.

Coorientador: Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Ing.

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silveira, Claudio Abilio da

Integração de um sistema de impressão 3D em uma arquitetura modular de posicionamento cartesiano / Claudio Abilio da Silveira ; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner ; coorientador, Carlos Alberto Martin. – Florianópolis, SC, 2015

108 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Incluir referências

1. Engenharia Mecânica. I. Weingaertner, Walter Lindolfo. II. Martin, Carlos Alberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Claudio Abilio da Silveira

**INTEGRAÇÃO DE UM SISTEMA DE IMPRESSÃO 3D EM UMA
ARQUITETURA MODULAR DE POSICIONAMENTO
CARTESIANO**

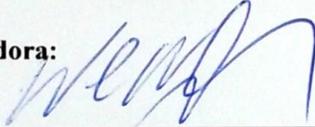
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 11 de março de 2015.

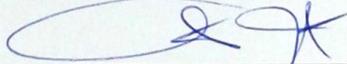


Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

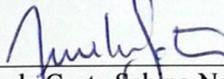
Banca Examinadora:



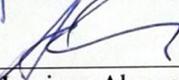
Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Alberto Martin, Dr. Ing.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Aurélio da Costa Sabino Netto, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais
Abilio Joaquim da Silveira e Rosa
Rodrigues da Silveira.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador desta dissertação de mestrado, Prof. Walter Weingaertner, pela sua dedicação e pelo conhecimento transmitido e ao coorientador Prof. Carlos Alberto Martin pelos auxílios prestados.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por possibilitarem a realização desta dissertação de mestrado. Assim como o Departamento de Engenharia Mecânica e o Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pelo apoio e assistência.

Aos professores do POSMEC pela qualidade das disciplinas realizadas durante o programa, em especial ao Prof. Rolf B. Schroeter pelos constantes diálogos e discussões acadêmicas.

Aos colegas Bernardo Rachadel, Dyonad Scolaro, Felipe Ebersbach, Ismael Lutz, Jhonattan Gutjahr, Leandro Schmitz, Luiz Barbeta, Wei Lin, Rodrigo Blodorn e aos demais colaboradores do laboratório. Em especial ao colega de mestrado Leonardo Santana pela constante troca de informações sobre o tema e colaboração.

Aos bolsistas e pesquisadores Artur Schutz, Bruno Alves, Jordana Carvalho, Larissa Santana, Lucas Azambuja, Thiago Dias e Victor Sanchez. Em especial a Isabel Prestes e Adriano Pereira pelo apoio durante a realização de testes.

Ao mestre engenheiro João Rovaris e aos técnicos Carlos Coelho, Hélio Irineu, Valtair Garcez e Joe Schmitz pelo apoio necessário durante as etapas de fabricação e construção mecânica.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram, seja ela direta ou indireta, para a realização desta dissertação de mestrado.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

(Albert Einstein)

RESUMO

A automação é uma das ferramentas utilizadas na adequação de uma estrutura produtiva para possibilitar melhorias e avanços tecnológico que torna-se cada vez mais importante. Neste trabalho são abordados os aspectos da automação existentes entre um sistema de Comando Numérico Computadorizado (CNC) baseado em Computador Pessoal (PC – *Personal Computer*) e o processo de fabricação por impressão 3D. O aprimoramento de um posicionador é focado principalmente na integração entre os componentes mecânicos, eletroeletrônicos e computacionais com objetivo de garantir a flexibilidade de uso do sistema. Para conferir versatilidade ao CNC foi desenvolvido um Dispositivo Microcontrolado Auxiliar (DMA) para o sensoriamento e controle do processo. Baseado em projetos do tipo *open source*, o DMA é uma ferramenta com capacidade de ser modificada e adequada a diferentes utilizações em um ambiente de pesquisa. Para validar as soluções propostas para o posicionador optou-se pela aplicação do processo denominado Modelagem por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*), comumente associada ao termo impressão 3D. Neste processo um material termoplástico aquecido é extrudado através de um orifício e depositado camada a camada, permitindo a construção de modelos geométricos complexos. São apresentadas também soluções de automação para o processo de impressão 3D, que visam o baixo custo e fácil disponibilidade, bem como a possibilidade de integração com *software* e *hardware* existentes. Os resultados obtidos mostram que a programação orientada ao uso do DMA o torna uma ferramenta essencial para flexibilidade do equipamento CNC. Por meio dele é possível implementar funções como a leitura de sensores, processamento de informações e ações de controle sobre variáveis de processo. Os testes realizados com o equipamento mostram que as soluções apresentadas são capazes de executar o processo de impressão 3D. Dentro das limitações inerentes do processo é possível fabricar peças com geometrias variadas e com diferentes materiais. Conclui-se que o sistema proposto permite a automação de um processo produtivo como a impressão 3D e que as características finais obtidas são favoráveis ao uso em outros processos.

Palavras-chave: Automação, CNC, PC, FDM, Impressão 3D, Controle.

ABSTRACT

Automation is one of the tools used in the production suitability of a structure to enable technological advancements and improvements becomes increasingly important. This work discussed aspects of existing automation between a Computer Numerical Control (CNC) based on Personal Computer (PC) and the manufacturing process for 3D printing. The improvement of a positioner is primarily focused on the integration between the mechanical components, electronics and computer in order to ensure the flexibility of system use. To give versatility to the CNC we developed an Auxiliary Microcontrolled Device (DMA) for the sensing and control of the process. Based on the open source type projects, the DMA is a tool capable of being modified and suitable for different uses in a research environment. To validate the proposed solutions to the positioner was decided to process the application called Modeling Fused Deposition (FDM), commonly associated with the term 3D printing. In this process a heated thermoplastic material is extruded through a nozzle and deposited layer by layer, allowing the construction of complex geometric models. Also presented are automation solutions for the 3D printing process, aimed at low cost and easy availability as well as the possibility of integration with existing software and hardware. The results show that the programming oriented to the use of DMA makes it an essential tool for CNC machine's flexibility. Through it is possible to implement functions such as reading sensors, information processing and control actions on process variables. Tests conducted with the equipment show that the solutions are able to run the 3D printing process. Within the inherent limitations of the process it is possible to manufacture parts with different geometries and with different materials. It is concluded that the proposed system enables automation of a production process as 3D printing and that the final characteristics obtained are favorable for use in other processes.

Keywords: Automation, CNC, PC, FDM, 3D Printing, Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Guias e fusos de esferas em um centro de usinagem.	30
Figura 2 – Conceito híbrido de motor linear e fuso de esferas.....	31
Figura 3 – Controle baseado em PC com placa dedicada.....	33
Figura 4 – Tela principal do <i>software</i> MACH3.....	34
Figura 5 – Aplicações de LASER no processamento de materiais.	37
Figura 6 – Ilustrações da patente gerada por Crump em 1992.	40
Figura 7 – Cinemática para um processo baseado em FDM.	41
Figura 8 – Impressora MakerBot Replicator 2X.	42
Figura 9 – Impressora 3D Prusa Mendel 2.....	43
Figura 10 – Ciclo de vida do produto.....	47
Figura 11 – Visão geral do posicionador cartesiano.	54
Figura 12 – Configuração (simplificada) do gabinete elétrico.	56
Figura 13 – Placa controladora de movimento GX-MAX.	57
Figura 14 – Contexto das ligações do DMA no equipamento.....	58
Figura 15 – Circuito de intertravamento.	60
Figura 16 – Circuito da fonte de sinal.....	62
Figura 17 – <i>Driver</i> STR8 instalado no equipamento.....	63
Figura 18 – Tela do <i>software</i> MachScreen.....	65
Figura 19 – Tela do <i>software</i> durante a programação do DMA.....	66
Figura 20 – Imagem do extrusor contendo filamento.	70
Figura 21 – Imagens do cabeçote extrusor.	71
Figura 22 – Mesa de deposição fixada ao posicionador.....	73
Figura 23 – Lâmina de alumínio com resistores de aquecimento.	73
Figura 24 – Montagem física da eletrônica de processo.	75
Figura 25 – <i>Software</i> CAM para uso em impressão 3D.....	76
Figura 26 – Ligação entre PC e controlada, PC e interface.....	78
Figura 27 – Controle de temperatura do bico extrusor.....	81
Figura 28 – Controle de temperatura da mesa de deposição.	82
Figura 29 – Tela personalizada para o uso em impressão 3D.	85
Figura 30 – Evolução ao longo dos ensaios com PLA.	88
Figura 31 – Peças com parâmetros e materiais variados.....	89
Figura 32 – Corpo de prova fabricado no equipamento.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dimensionais das amostras produzidas.....	91
Tabela 2 – Médias e desvios padrões das amostras.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados de diferentes equipamentos Stratasys.....	42
Quadro 2 – Resumo das necessidades dos usuários.	49
Quadro 3 – Requisitos dos usuários.	50
Quadro 4 – Requisitos de projeto.	51
Quadro 5 – Especificações de projeto.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	– Duas dimensões ou bidimensional
3D	– Três dimensões ou tridimensional
3DP	– Impressão Tridimensional (<i>Three Dimensional Printing</i>)
ABS	– Polímero Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
CA	– Corrente Alternada
CAD	– Projeto Assistido por Computador (<i>Computer-Aided design</i>)
CAM	– Manufatura Assistida por Computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
CC	– Corrente Contínua
CLP	– Controlador Lógico Programável
CNC	– Comando Numérico Computadorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
DB25	– Conector elétrico D-Sub de 25 pinos (Norma IEEE 1284)
DMA	– Dispositivo Microcontrolado Auxiliar
GND	– <i>Ground</i> , denominação do potencial 0V em um circuito
GX-MAX	– Modelo de placa de controle de movimento da empresa NEVEX
I/O	– <i>Input e output</i>
LASER	– Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação (<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>)
LED	– Diodo Emissor de Luz (<i>Light Emitting Diode</i>)
LENS	– <i>LASER Engineered Net Shaping</i>
LHW	– Laboratório de Hardware
LMP	– Laboratório de Mecânica de Precisão
MA	– Manufatura Aditiva
MODBUS	– Tipo de protocolo de comunicação serial
MOSFET	– Tipo de transistor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
NA	– Normalmente Aberto
NF	– Normalmente Fechado
NPN	– Tipo de transistor (<i>Negative-Positive-Negative</i>)
NTC	– Coeficiente de temperatura negativo (<i>Negative Coefficient Temperature</i>)
PC	– Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PCI	– Placa de Circuito Impresso

PDM	– Projeto de Dissertação de Mestrado
PID	– Proporcional Integral Derivativo
PLA	– Polímero Poliácido Lático
POSMEC	– Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica
PRODIP	– Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
PTFE	– Polímero PoliTetraFluorEtileno
PUMA	– Tipo de robô (<i>Programmable Universal Machine for Assembly</i>)
PWM	– Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
QFD	– Desdobramento da Função Qualidade (<i>Quality Function Deployment</i>).
RP	– Prototipagem Rápida (<i>Rapid Prototyping</i>)
SCARA	– Tipo de robô (<i>Selective Compliant Assembly Robot Arm</i>)
SLM	Fusão Seletiva a Laser (<i>Selective LASER Melting</i>)
SLS	Sinterização Seletiva a LASER (<i>Selective LASER Sintering</i>)
STL	– Formato de arquivo (<i>STereoLithography</i>)
UFSC	– Universidade Federal de Santa Catarina
USB	– Barramento Serial Universal (<i>Universal Serial Bus</i>)
UV	– Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
1.1	OBJETIVOS	26
1.1.1	Objetivo geral.....	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.....	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MOVIMENTAÇÃO ..	29
2.1.1	Controladores CNC baseados em PC	33
2.1.1.1	MACH3	33
2.1.1.2	LinuxCNC.....	35
2.1.2	Limitante na utilização de CNC baseados em PC.....	35
2.2	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	36
2.2.1	Processos baseados em posicionamento cartesiano.....	36
2.2.2	Processos baseados no princípio de FDM.....	39
2.2.2.1	Sistemas comerciais	41
2.2.2.2	Sistemas <i>open source</i>	43
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	PROJETO INFORMACIONAL.....	45
3.1.1	Restrições iniciais da dissertação de mestrado.....	46
3.1.2	Ciclo de vida do produto	46
3.1.3	Clientes do produto.....	48
3.1.4	Necessidades dos usuários	48
3.1.5	Requisitos dos usuários	49
3.1.6	Requisitos do projeto	50
3.1.7	Especificações do projeto	51
4	APRESENTAÇÃO DO POSICIONADOR.....	53
4.1	COMPOSIÇÃO DO <i>HARDWARE</i>	53
4.1.1	Parte mecânica	53
4.1.1.1	Estrutura.....	53
4.1.1.2	Mecanismos	54
4.1.1.3	Acionamentos	55
4.1.2	Parte eletroeletrônica	55
4.1.2.1	Placa controladora de movimento.....	57
4.1.2.2	Dispositivo Microcontrolado Auxiliar	58
4.1.2.3	Circuito de intertravamento	59
4.1.2.4	Fontes de alimentação e <i>drivers</i>	61
4.2	COMPOSIÇÃO DO <i>SOFTWARE</i>	63
4.2.1	<i>Software</i> CNC	64
4.2.2	<i>Software</i> de personalização de telas do CNC	64

4.2.3	<i>Software</i> de programação do DMA	65
5	INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE IMPRESSÃO 3D.....	69
5.1	<i>HARDWARE</i> DO PROCESSO	69
5.1.1	Extrusor de filamento.....	69
5.1.2	Cabeçote extrusor	70
5.1.3	Mesa de deposição	72
5.1.4	Eletrônica de processo.....	73
5.2	<i>SOFTWARE</i> DE PROCESSO	76
6	RESULTADOS OBTIDOS	77
6.1	INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA	77
6.1.1	Placa controladora de movimento.....	77
6.1.2	Funcionamento do DMA.....	79
6.2	INTEGRAÇÃO DE <i>SOFTWARES</i> CAD-CAM-CNC	83
6.3	CAPACIDADE DE REALIZAÇÃO DO PROCESSO.....	86
7	CONCLUSÕES.....	93
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – PRIMEIRA CASA DA QUALIDADE	103
	APÊNDICE B – IMAGENS DO EQUIPAMENTO.....	104
	APÊNDICE C – IMAGENS DO PROCESSO PRODUTIVO	107

1 INTRODUÇÃO

A área de Fabricação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) tem como proposta a integração dos processos de manufatura e adequação da estrutura produtiva aos seus fins para possibilitar melhorias e avanços tecnológicos.

Uma das formas de alcançar esta proposta é por meio da automação dos equipamentos que executam estes processos produtivos. Esta linha de atuação tem sido tema de pesquisa no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e sua divisão de pesquisas avançadas em tecnologia LASER (LMP-LASER) em projetos de sistemas de movimentação.

A automação tornou-se nos últimos anos uma alternativa para realização de processos antes restringidos por limitações técnicas como a pouca versatilidade oferecida pelas máquinas convencionais. Um exemplo da contribuição da automação sobre os equipamentos produtivos é o Comando Numérico Computadorizado (CNC - *Computer Numerical Control*).

Novas técnicas de fabricação têm emergido no cenário produtivo graças aos avanços tecnológicos e difusão dos conhecimentos relacionados com sua utilização. Assim como ocorrido com outros processos de fabricação como fresamento e torneamento, as novas aplicações são passíveis de técnicas de automação. Um destes processos emergentes é a impressão 3D baseada no princípio de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*).

Propõem-se então conciliar as possibilidades oferecidas pela automação por meio da integração de um sistema de impressão 3D a uma arquitetura de posicionamento do tipo cartesiana.

Esta integração do sistema de impressão 3D e posicionador passa necessariamente pela integração entre um *software* destinado ao comando numérico computadorizado do equipamento de movimentação e outro *software* encarregado de traduzir a cinemática do processo de fabricação à linguagem de máquina. Sendo esta última etapa definida como manufatura assistida por computador (CAM - *Computer Aided Manufacturing*).

Além disto, é necessário considerar a interface eletroeletrônica entre o equipamento e o processo de impressão 3D. Tal interface exige o desenvolvimento de um dispositivo capaz de sincronizar as ações relativas ao controle do processo e as movimentações envolvidas.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho encontram-se divididos em geral e específicos, ambos apresentados a seguir:

1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo geral integrar, nos aspectos mecânico, eletroeletrônico e computacional, um sistema de fabricação por processo de impressão 3D a uma arquitetura modular de posicionamento cartesiano.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentro deste contexto estão incluídos os seguintes objetivos específicos que serão executados ao longo desta dissertação de mestrado:

- a) desenvolver dispositivos que executem o processo de impressão 3D;
- b) selecionar e integrar *softwares* para a cadeia CAD-CAM-CNC;
- c) integrar o sistema de impressão 3D ao posicionador cartesiano;
- d) avaliar a integração eletroeletrônica;
- e) avaliar a integração de *softwares*;
- f) avaliar a realização do processo de impressão 3D.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Esta dissertação de mestrado encontra-se estruturada em oito capítulos numerados. O capítulo 1 apresenta a introdução seguida pelos objetivos (gerais e específicos), bem como a descrição da estrutura deste documento.

No capítulo 2 são apresentados os aspectos de revisão bibliográfica relacionada ao tema abordado. Incluem-se neste item os sistemas automatizados de movimentação e os processos produtivos beneficiados pela automação de movimento.

O capítulo 3 descreve a metodologia empregada no desenvolvimento desta dissertação de mestrado. São apresentadas as referências metodológicas e, sobretudo, a fase de projeto informacional a partir da análise do ciclo de vida até as especificações do projeto.

A apresentação do sistema de posicionamento cartesiano, que compreende o capítulo 4, está dividida em dois subtítulos: composição de *hardware* e composição de *software*. Os itens que descrevem o *hardware* estão divididos em: parte mecânica e parte eletroeletrônica. Já o *software* descreve aspectos relativos aos programas e configuração particulares.

Com ênfase na integração do sistema de impressão 3D à arquitetura de posicionamento cartesiano, o capítulo 5 apresenta dois subtítulos. O *hardware* de processo descreve os dispositivos mecânicos e eletroeletrônicos associados ao processo de impressão 3D. Ao ponto que *software* de processo menciona o programa diretamente envolvido com a etapa de manufatura assistida por computador (CAM).

O capítulo 6 compreende a avaliação dos resultados obtidos. Sendo os pontos avaliados relacionados com: a integração eletroeletrônica, a integração de softwares CAD-CAM-CNC e a capacidade de realização do processo de impressão 3D.

No capítulo 7 são descritas as conclusões desta dissertação de mestrado, seguidas pelas sugestões para trabalhos futuros presentes no capítulo 8. Concluem este documento os itens não numerados que são as referências bibliográficas e os apêndices.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica exposta a seguir irá sintetizar as tecnologias de automação em sistemas de posicionamento, bem como os processos de fabricação que podem ser aplicados ao contexto desta dissertação de mestrado.

Sistemas de movimentação são dispositivos aplicados em equipamentos e plantas industriais com intuito de realizar as mais diversas atividades. Estes sistemas são utilizados para hospedar os mais diferentes processos produtivos. O grau de automação e complexidade do equipamento deve atender às necessidades impostas pelo processo.

Um destes processos produtivos será abordado com mais detalhes, pois será integrado ao sistema de posicionamento cartesiano empregado nesta dissertação de mestrado. Para isto equipamentos que executam o processo FDM e técnicas similares serão apresentados, bem como as suas principais características.

2.1 SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MOVIMENTAÇÃO

Sistemas automatizados, que executam movimentações, possuem diferentes construções físicas conforme as características desejadas em sua aplicação final. Neste segmento de máquinas podem ser incluídas desde aquelas que executam trajetórias simples, até aquelas que apresentam diversos graus de liberdade. Contudo, para o contexto desta dissertação de mestrado uma destas construções físicas possui destaque: os posicionadores cartesianos.

Nas máquinas de movimento cartesiano os eixos descrevem trajetórias lineares perpendiculares entre si e são capazes de atingir um volume de trabalho que é resultado do produto dos cursos efetivos dos eixos principais denominados X, Y e Z. Nesta dissertação de mestrado convencionou-se que a interseção dos eixos X e Y forma o plano de movimentação horizontal, enquanto o eixo Z atua no sentido vertical.

Suas aplicações nos setores produtivos são diversificadas, existindo posicionadores com diferentes funções desde a simples movimentação de cargas até processos produtivos específicos tais como usinagem de materiais, soldagem, corte a LASER, aplicação de revestimentos e tratamentos térmicos.

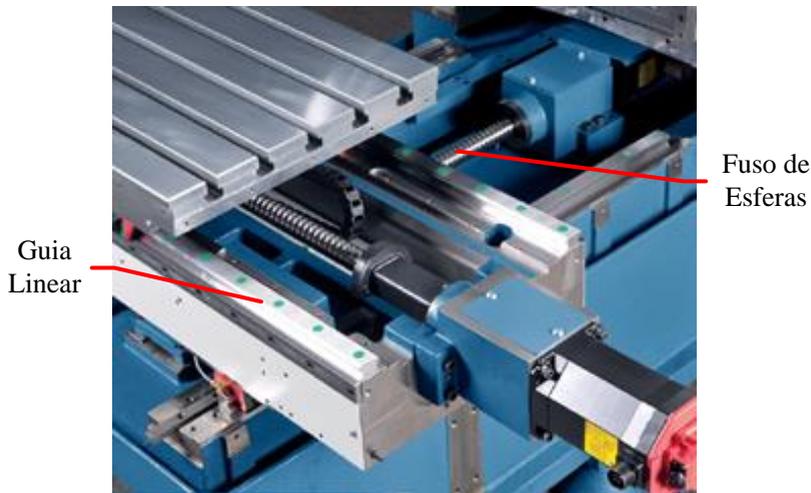
Os posicionadores apresentam diferentes arranjos mecânicos formados por componentes destinados a guiar e transmitir movimento conforme as demandas de projeto. Segundo Altintas et al. (2011) para altas exigências de precisão, as guias para máquinas ferramentas podem

ser do tipo magnética, aerostática em aplicações com baixa carga ou hidrostáticas em situações onde se deseja rigidez e amortecimento. Contudo, cada vez mais as guias lineares de elementos rolantes são aplicadas em sistemas posicionadores, segundo ROMI SA (2013), por serem elementos padronizados, oferecerem praticidade de montagem, confiabilidade e baixa manutenção.

As guias têm intuito de permitir determinados tipos de deslocamento. No caso dos posicionadores cartesianos a trajetória resultante é linear. Este deslocamento é executado por dispositivos de transformação de movimento de rotação em linear, por exemplo, rodas de atrito, pinhão-cremalheira, fuso de esferas e, mais atualmente, por motores lineares, como sugere Altintas et al. (2011).

Quando as aplicações de posicionadores não são restringidas por características específicas como extrema precisão ou elevadíssima velocidade, a utilização do conjunto formado por guias lineares e fusos de esferas (Figura 1) é a configuração mais encontrada em sistemas posicionadores aplicados em máquinas ferramentas atuais Martin ().

Figura 1 – Guias e fusos de esferas em um centro de usinagem.

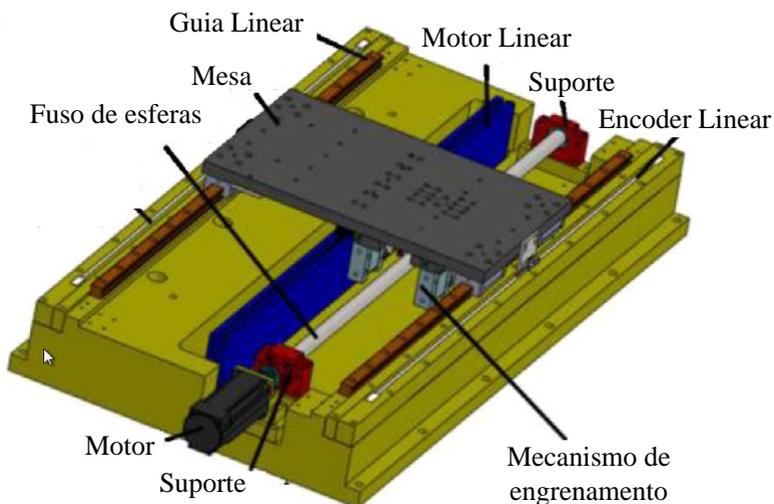


Fonte: ROMI SA (2013).

Eixos de movimentação para aplicações de elevada dinâmica têm sido desenvolvidos para melhorar o desempenho de equipamentos

durante a realização do processo e para redução dos tempos de movimentação em vazio. Estas estratégias de melhoria incluem, por exemplo, o desenvolvimento de unidades de movimentação híbridas (como mostrado na Figura 2) que incorporam motores lineares para deslocamentos rápidos junto a fusos de esferas para avanços com maior demanda de força segundo Okwudire; Rodgers (2013). A inclusão de eixos redundantes também pode ser utilizada para elevar os parâmetros de desempenho do sistema como visto em Neugebauer et al. (2012).

Figura 2 – Conceito híbrido de motor linear e fuso de esferas.



Fonte: Adaptado de Okwudire; Rodgers (2013).

As proporções das máquinas cartesianas em geral estão associadas com as dimensões das peças e em determinadas condições certas configurações são preferíveis. Segundo Ihlenfeldt et al. (2013), em máquinas destinadas às tarefas com movimentações largas (onde existe uma demanda por peças grandes e precisas, como estruturas de aeronaves e navios), predominam as montagens do tipo coluna móvel, pórtico e pórtico elevado.

Em virtude da crescente demanda por máquinas com elevada eficiência energética, as dimensões tendem a ser desenvolvidas para o volume efetivamente ocupado pela peça. Neugebauer et al. (2011)

aponta que este princípio diminui uma ineficiência observada em máquinas de estrutura convencional.

Além dos avanços mecânicos, outros desenvolvimentos melhoram o desempenho de posicionadores, como a evolução dos servomotores que permitem o controle de posição e velocidade com precisão. Estes servomotores podem ser divididos em duas classes: movimento contínuo e movimento discreto (motores de passo).

Embora os motores contínuos possuam vantagens, como maior disponibilidade de torque e velocidade, os motores discretos apresentam uma melhor relação custo/benefício. Atualmente a eletrônica associada aos motores discretos permite expandir sua capacidade de torque e velocidade sem comprometer sua confiabilidade de posicionamento.

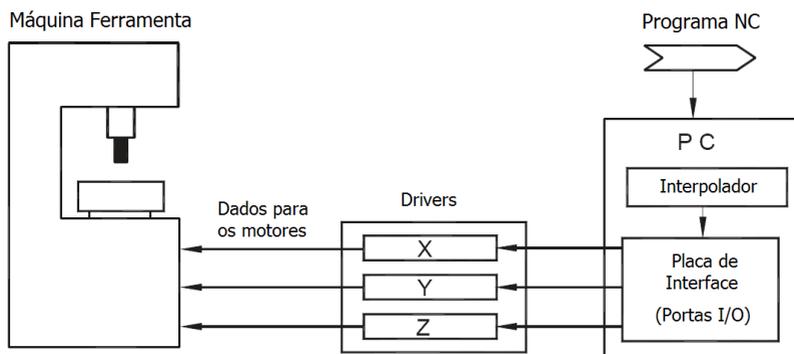
A evolução da eletrônica também permitiu um aumento na capacidade de processamento das unidades computadorizadas incorporadas em máquinas. Isto possibilita maior realização de cálculos, controle sobre eixos de movimentação e gerenciamento de periféricos.

Arquitetura de controle em máquinas CNC pode ser fechada (convencional) ou aberta. Na primeira delas o sistema não permite que o usuário tenha acesso as configurações propositalmente bloqueadas pelo fabricante, sendo inflexível em termos de integração final. No caso da arquitetura aberta as restrições podem ser eliminadas permitindo o uso de diferentes soluções para constituir um sistema, no entanto, sua vulnerabilidade é influenciada pela qualidade individual e de integração dos componentes. Segundo Ramesh et al. (2013) o aspecto de confiabilidade é o principal desafio das arquiteturas abertas, visto que os sistemas CNC fechados provaram ser altamente confiáveis.

Segundo Asato et al. (2002) a arquitetura aberta geralmente inclui a combinação de componentes com diferentes manufaturas (mas com interfaces padronizadas) tornando seu arranjo mais diversificado. Porém, isto acaba por exigir um esforço de integração compatível com o nível de diversidade presente. Um exemplo de arquitetura aberta é o CNC baseado em Computador Pessoal (PC - *Personal Computer*).

Devido aos recursos abundantes e avanços crescentes em torno do PC, o uso dessa tecnologia apresenta vantagens técnicas em termos de *software* e *hardware*. Xu et al. (2012) defendem que estes sistemas flexíveis, baseados em PC, são uma tendência em CNC aberto. O PC, quando necessário, pode ainda ser potencializado por placas dedicadas responsáveis pelo processamento de dados ou geração de sinais elétricos específicos. Como resultado tem-se o aumento do desempenho computacional do sistema e numa configuração semelhante a da Figura 3.

Figura 3 – Controle baseado em PC com placa dedicada.



Fonte: Adaptado de Omirou; Barouni (2005).

A integração das soluções encontradas para as partes mecânicas, eletroeletrônicas e computacionais permitem a construção um sistema CNC com características específicas. Contudo a personalização oferecida pela arquitetura aberta permite elaborar uma concepção aplicável a diferentes usos. Porém, enquanto o posicionador apresenta uma concepção flexível, ao menos no que diz respeito à automação de movimento, os processos de fabricação inevitavelmente apresentam particularidades a serem atendidas.

2.1.1 Controladores CNC baseados em PC

Os processos de fabricação, quando executados por arquiteturas abertas baseadas em PC, podem ser realizados em diferentes programas de comando numérico computadorizado. Estes programas tem a função de interpretar dados relacionados a geometria que deseja-se produzir e transformá-los em ações realizadas pelo sistema responsável pela execução física do processo. Quando utilizados em processos de Manufatura Aditiva, estes controladores devem atender as características do processo.

2.1.1.1 MACH3

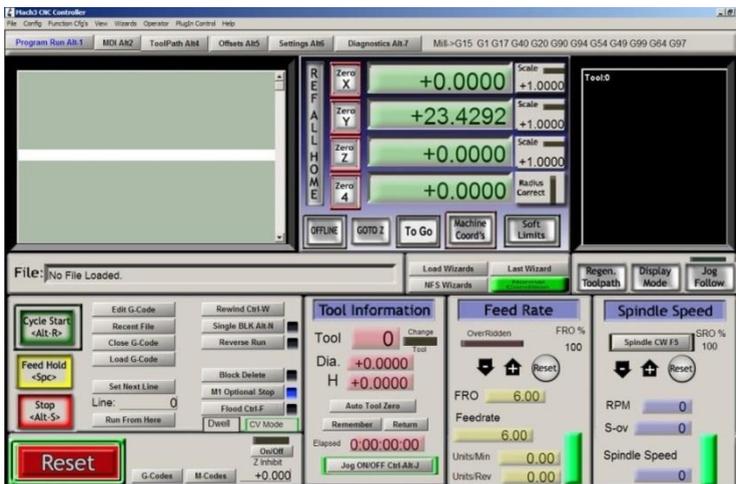
Um dos exemplos de controladores CNC voltados para arquiteturas baseadas em PC denomina-se MACH3. Ele permite

transformar um computador típico em um controlador CNC capaz de processar códigos G. Os comandos gerados permitem controlar motores e outros dispositivos em máquinas como fresadoras, *routers*, mesa de corte a plasmas e similares. Segundo Newfangled Solutions (2014a) MACH3 pode ser customizado e tem sido utilizado em muitas aplicações com vários tipos de *hardware*.

Sua interface é formada por diferentes telas, selecionadas de acordo com as informações desejadas. A tela principal mostra campos nos quais são carregados os códigos G, a posição atual dos eixos entre outros. A tela principal do MACH3 pode ser observada na Figura 4.

A conexão entre o PC e a máquina CNC é por intermédio de placas de interface com comunicação via porta paralela (um padrão que utiliza conectores do tipo DB25). Originalmente a porta paralela foi desenvolvida para comunicação com impressora, sendo assimilada para outros periféricos. Segundo ArtSoft EUA (2010), o crescente desuso da porta paralela exige a utilização de placas controladoras de movimento com Barramento Serial Universal (USB - *Universal Serial Bus*) ou Ethernet para comunicação.

Figura 4 – Tela principal do *software* MACH3.



Fonte: Newfangled Solutions (2014a).

Devido as possibilidade de personalização, este *software* tem encontrado aplicação em processos de MA. O controle simultâneo de eixos de

movimentação permite a movimentação em duas e três dimensões (2D e 3D). Também é possível comandar dispositivos associados ao processo, desde outros eixos de movimentação a elementos como dispensadores com válvulas pneumáticas, como visto em Ren et al. (2014).

2.1.1.2 LinuxCNC

LinuxCNC é um *software open source* que também permite o controle numérico de máquinas utilizando unidades PC. Ele é executado sobre o sistema operacional Linux. Uma das características deste projeto não comercial é o envolvimento da comunidade de desenvolvedores no avanço contínuo das funcionalidades do *software*.

Segundo LinuxCNC.org (2015) são oferecidos pelo *software* as seguintes funções e características:

- a) várias interfaces gráficas de usuário;
- b) interpretador para linguagem de código G RS-274;
- c) sistema de movimentação em tempo real;
- d) um software similar a um Controlador Lógico Programável (CLP) com linguagem *Ladder*;
- e) movimento simultâneo de até 9 eixos;
- f) controle de motores de passo e servomotores em malha fechada pelo *software*;
- g) suporte para sistema não cartesianos como robôs PUMA e SCARA.

A possibilidade de variação das interfaces gráficas, aliadas as ferramentas de programação, são itens que facilitam a integração do LinuxCNC a diferentes processos de fabricação. O LinuxCNC não possui, de forma nativa, ferramentas para o controle de processos de manufatura aditiva, sendo necessária a programação de instruções específicas como visto em Gonçalves (2014).

2.1.2 Limitante na utilização de CNC baseados em PC

A arquitetura baseada na placa controladora de movimento utilizada apresenta um determinado número de entradas e saídas. Para uma máquina CNC básica (tornos e fresadoras simples), com apenas sinais de movimentação dos eixos e acionamento de periféricos, este número de pinos é plenamente viável e suficiente. No entanto, quando se deseja incrementar uma aplicação com sensores, atuadores, painéis e visores, esta gama de entradas e saídas disponíveis pode se tornar um limitante.

Uma das formas de se contornar esta escassez de portas é por meio de placas de expansão. Estes dispositivos utilizam outras portas de comunicação para estabelecer a ligação com o programa CNC. A limitação no número de I/O é agora associada ao dispositivo de expansão e não mais a placa controladora de movimento.

Existe uma gama ampla de dispositivos que podem ser aplicados com o intuito de expandir I/O em equipamentos CNC. Um exemplo são os CLP, estas unidades são responsáveis pelo controle e acionamento direto de inúmeros periféricos. No entanto, a comunicação com o comando central é executado por um protocolo de troca de mensagens que exige poucas conexões físicas de transmissão.

Sistemas de expansão de I/O concebidos para aplicações em arquiteturas abertas também são encontrados comercialmente. Caso do sistema Pokeys, uma placa eletrônica de I/O se comunica com o PC via porta USB. Segundo Polabs (2013), ele é concebido para atuar com o programa CNC MACH3, o sistema inclui um *plugin* (arquivo de configuração) que possibilita a integração entre os envolvidos.

Apesar de convenientes, as soluções dedicadas podem ser limitadas por restrições em *softwares* e *hardwares* proprietários. Uma alternativa é a utilização de sistemas mais flexíveis. Nestes aspectos os sistemas microcontrolados tornam-se uma possibilidade viável, tanto técnica quanto econômica. Muitas vezes o conteúdo disponível e a existência de modelos *open source* tornam esta abordagem mais acessível que a dos sistemas dedicados.

Como o código fonte do projeto encontra-se disponibilizado para ser modificado é permitido adequar suas características. Desta forma é possível personalizar o funcionamento do dispositivo para permitir sua utilização na expansão de I/O do equipamento.

2.2 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Virtualmente qualquer processo de fabricação que se dê por movimentações em dois e três eixos pode ser instalado em um posicionador cartesiano, desde que respeite as limitações inerentes do sistema. A seguir são apresentados alguns exemplos desses processos de fabricação.

2.2.1 Processos baseados em posicionamento cartesiano

A utilização do LASER estende-se a vários processos produtivos voltados diferentes fins Estes processos basicamente empregam a

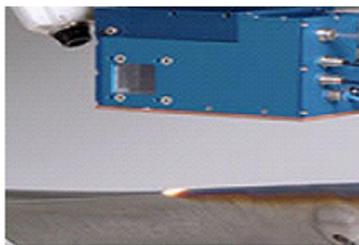
tecnológica LASER como uma fonte de calor, que deve ser movimentada sobre uma área de trabalho.

Esta movimentação pode dar-se pela utilização de posicionadores cartesianos quando restrita a movimentação em três graus de liberdade. Com a evolução das fontes LASER, estes processos tornaram-se mais versáteis devido à diminuição da complexidade em levar o feixe até a área de trabalho (LASER de fibra). A Figura 5 apresenta alguns exemplos de aplicações de LASER no processamento de materiais.

Figura 5 – Aplicações de LASER no processamento de materiais.



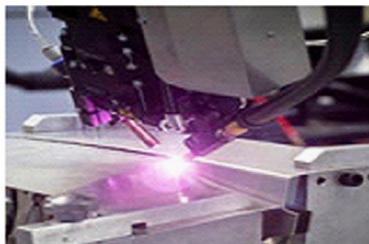
Soldagem de metais



Têmpera de metais



Soldagem de plásticos



Brasagem



Cladding e revestimento



Corte

Fonte: Adaptado de Nasim; Jamil (2014).

Fontes LASER podem ser utilizadas tanto para soldagem de matérias como metais e plásticos quanto para processos de brasagem. A têmpera e revestimento de superfícies metálicas também são exemplos de utilização de LASER como fonte de calor para o processo físico, assim como os processos de corte, onde as fontes LASER também são empregues.

Outra classe de processos que podem ser aplicados em sistemas de movimento cartesianos é a Manufatura Aditiva (MA). Como o nome sugere, ela permite a construção peças e protótipos por meio a adição sucessiva de material.

Os processos de MA, os quais já foram denominados pelo termo prototipagem rápida, podem ser divididos em três tipos, segundo Volpato (2007), conforme a apresentação do material empregado, sendo os processos baseados em: líquido, pó ou sólido. São exemplos de processos baseados em líquido aqueles que utilizam resinas curadas por exposição à luz ultravioleta (UV). Casos onde a matéria-prima é, por exemplo, um pó metálico que será fundido por ação de um feixe LASER, os processos são ditos baseados em pó. No caso dos processos baseados em sólidos o material apresenta-se, por exemplo, na forma grânulos ou filamentos.

O processo é denominado *LASER Engineered Net Shaping* (LENS®) consiste em injetar um pó metálico sobre uma poça de fusão gerada por um LASER de alta potência. A técnica desenvolvida por Sandia National Laboratories (200-) permite obter peças com geometrias complexas originadas pela deposição sucessiva de camadas transversais

Outra aplicação que integra a movimentadores e LASER à Manufatura Aditiva é o processo de Sinterização Seletiva a LASER (SLS - *Selective LASER Sintering*). Segundo Pham; Gault (1998) SLS utiliza um LASER com potência entre 25 e 50 W para fundir os grãos de pó de um material, na sequência, uma nova cobertura é adicionada dando continuidade à sinterização camada a camada. Neste processo a trajetória do LASER é definida por um conjunto óptico de espelhos, sendo a movimentação restrita a distribuição do particulado e a macro-posicionamento.

Contudo, o processo de SLS apresenta várias possibilidades de automação tendo em vista os parâmetros envolvidos, como o controle de temperatura da câmara de construção e distribuição do particulado. Tal automação é recorrente quando se busca controlar o processo para, por exemplo, se obter peças com variações graduais de composição, como proposto por Kulman (2006)

Os equipamentos que executam determinados processo de Manufatura Aditiva podem ser denominados comumente de impressoras 3D. Esse fato pode ser associado à semelhança dos movimentos executados por cabeçotes de deposição com os realizados em impressoras convencionais. Assim como ocorre com os equipamentos, o processo executado também pode receber, de forma análoga, a denominação de impressão 3D.

Em processos como *Selective LASER Sintering (SLS)*, *Selective LASER Melting (SLM)*, *Three Dimensional Printing (3DP)* e *Stereolithography (SL)* a fabricação do componente ocorre imersa num substrato. Tal característica exige o uso de dispositivos específicos para retenção e distribuição de pós ou líquidos. Estes dispositivos específicos tornam o equipamento ainda mais complexo.

Cada um destes processos conta com particularidades a serem respeitadas no momento da integração, por exemplo, soldagem e brasagem podem exigir um canal para alimentação de material de adição. O corte a LASER apresenta bocais que injetam um gás para auxiliar o processo (oxigênio, nitrogênio, argônio, combinações de gases ou até mesmo ar comprimido) segundo Dubey; Yadava (2008).

A diversidade de dispositivos necessários para incorporar cada um dos processos citados anteriormente a um posicionador tornar esta uma tarefa complexa. Esta ação dependerá da interface entre o equipamento e processo em termos mecânicos. A inclusão de uma eletroeletrônica específica e reconfiguração/mudança dos *softwares* da cadeia CAD-CAM-CNC também serão aspectos importantes .

2.2.2 Processos baseados no princípio de FDM

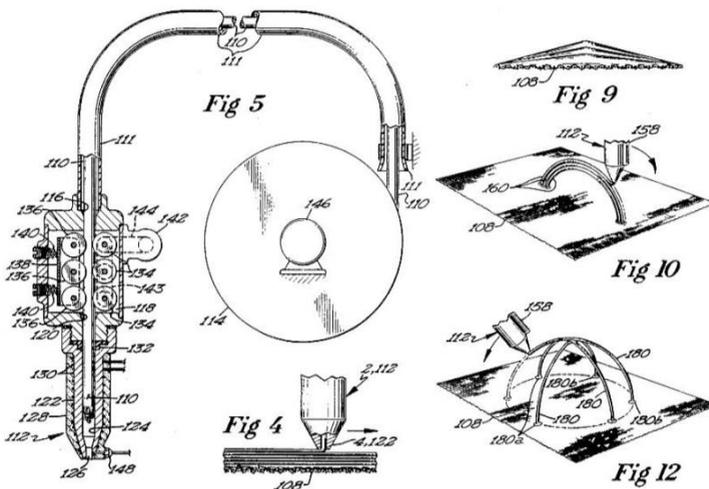
Em 1989, Steven Scott Crump desenvolveu um processo no qual um sistema de polias movimentava um filamento armazenado em uma bobina. Este filamento, guiado inicialmente por uma tubulação, é inserido em um bico dotado de um sistema de aquecimento e depois depositado sobre uma superfície. Seu patenteamento ocorreu em 1992 sobre domínio da empresa Stratasys Inc. com denominação de *Fused Deposition Modeling*. Na patente constam representações parciais do equipamento e do processo, como mostrado na Figura 6.

O método baseado no princípio do processo FDM consiste em fundir um filamento de um termoplástico em um bico extrusor especificamente concebido para fazer a extrusão do material. O material fundido é depositado sobre uma superfície na forma de um filete contínuo que segue a trajetória programada até a sua conclusão. Quando

é necessária uma interrupção do fluxo de deposição, o filamento é retraído no sentido contrário.

Nas etapas seguintes, incrementos verticais são adicionados entre o bico de extrusão e a mesa de deposição para construção camada a camada até a obtenção tridimensional completa da peça. Segundo Pham; Gault (1998) os sistemas baseados em FDM podem incluir dois bicos extrusores, um para o material da peça e outro para um material de suporte. Este último é empregado como estrutura de suporte para elementos ou peças sobrepostas. Após a construção da peça o material de suporte é descartado por remoção mecânica ou química, restando então o modelo final constituído material escolhido para sua fabricação.

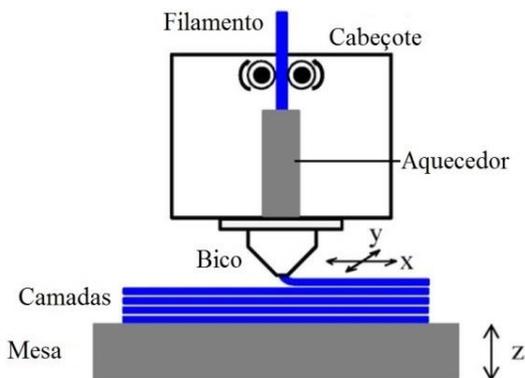
Figura 6 – Ilustrações da patente gerada por Crump em 1992.



Fonte: SCOTT (1992)

As movimentações exigidas, mostradas na Figura 7, incluem basicamente deslocamentos em um plano seguido por um incremento na direção normal. Na representação destaca-se a movimentação do bico pelos eixos X e Y, responsável pela deposição do filamento sobre a superfície de mesa. Na impressão da primeira camada o bico é afastado da mesa por um incremento correspondente à espessura da camada. A movimentação incremental em Z promove o valor de espessura das camadas seguintes. O conjunto identificado como cabeçote comporta o sistema de aquecimento e o bico.

Figura 7 – Cinemática para um processo baseado em FDM.



Fonte: Adaptado de Ahn et al. (2009).

Executar o processo exige que o bico extrusor seja movimentado de tal forma que o mesmo descreva trajetórias determinadas, dispondo de ao menos três graus de liberdade (X, Y e Z). A capacidade do posicionador de atender com precisão a geometria do componente a ser impresso terá influência direta sobre determinados parâmetros do processo, como por exemplo, a espessura da camada, largura da extrusão e velocidade de deposição, parâmetros estes que tem reflexo associado à qualidade das peças segundo Anitha et al. (2001).

2.2.2.1 Sistemas comerciais

Em virtude dos direitos autorais sobre o processo FDM, a maioria dos equipamentos comerciais está atrelada a empresa Stratasys. No entanto, com o vencimento gradual das patentes esta tecnologia está sendo explorada por outros fabricantes.

Os modelos comerciais apresentam características que procuram atender diferentes seguimentos de mercado. A gama de equipamentos oferecida atende a diferentes tipos de consumidores. O fabricante Stratasys dispõe de diferentes equipamentos. As opções variam conforme os tipos de material da peça e das estruturas de suporte, espessura de camada e tamanho da peça. O Quadro 1 resume estes dados para alguns dos equipamentos deste fabricante em particular.

Quadro 1 – Dados de diferentes equipamentos Stratasys.

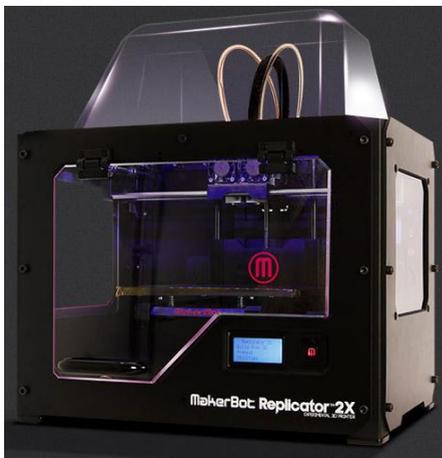
Modelo	Material peça ¹	Material suporte ¹	Esp. de camada (mm)	Tamanho da peça (mm)
Mojo	ABS <i>plus</i>	SR-30 <i>soluble</i>	0,17	127x127x127
uPrint SE	ABS <i>plus</i>	SR-30 <i>soluble</i>	0,254	203x152x152
Objet24	Rigid Opaque	FullCure® 705	0,28	240x200x150
Dimesion 1200es	ABS <i>plus</i>	SST 1200es BST 1200es	0,254 0,33	254x254x305

Notas: ¹Nomenclaturas baseadas em informações do fabricante.

Fonte: Stratasys Inc. (2014)

A empresa MakerBot também conta com uma linha de equipamentos voltados a impressão 3D. Modelos como o MakerBot Replicator 2X (Figura 8) são compactos e que prometem facilidade de utilização. Este modelo, especificamente, possui área de trabalho de 246 x 152 x 155 mm, espessura de camada de 0,1 mm e dois extrusores para possibilitar o uso de cores diferentes na construção da peça.

Figura 8 – Impressora MakerBot Replicator 2X.



Fonte: MakerBot (2014).

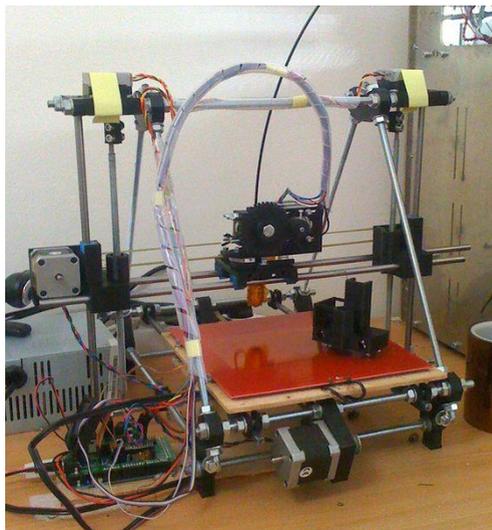
Nota-se em muitos modelos a preocupação manter a área de trabalho isolada. O fechamento do equipamento em torno do processo, além de garantir a segurança do operador, contribui para estabilidade do sistema, pois contaminações do ambiente de impressão são reduzidas.

2.2.2.2 Sistemas *open source*

Na última década uma nova proposta de equipamentos baseados no processo de deposição de filamentos vem sendo difundida no mercado. Trata-se das impressoras 3D *open source* que possuem os projetos de *hardware*, eletrônica e *software* abertos. Esta proposta de impressora de baixo custo iniciou com o projeto RepRap, que é ainda o modelo mais difundido, segundo RepRap (2014a).

A principal característica destas impressoras é o baixo custo dos componentes. Em geral apresentam um conceito mecânico conservador baseado em movimentações do tipo cartesianas. Seus eixos de utilização componentes simples como guias cilíndricas de deslizamento com buchas de contato metálicas ou poliméricas. Um exemplo de impressora de baixo custo é o modelo Prusa Mendel 2, mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Impressora 3D Prusa Mendel 2.



Fonte: “Prusa Mendel (iteration 2)” (2014).

O sistema eletroeletrônico também apresenta soluções simples baseada no uso de microcontroladores, *drivers* simples e motores de passo convencionais. Os *softwares* de CAM e de controle do equipamento muitas vezes são *open source*.

Outra característica é o uso de peças fabricadas pelo próprio processo FDM. Ou seja, uma impressora pode ter peças fabricadas a partir de outra impressora já existente. Isto faz com que estes equipamentos sejam muitas vezes chamados de auto replicantes.

Segundo Pearce (2014a), impressoras de baixo custo são capazes de fabricar componentes de equipamentos científicos com 100 μm de resolução. Isto tornaria as impressoras 3D um recurso indispensável para a maioria dos laboratórios que buscam fabricar suas próprias ferramentas científicas.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo descreve os métodos utilizados para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. Nele são listadas as principais referências metodológicas, os requisitos, restrições, bem como os critérios que serviram para avaliar os resultados alcançados.

O projeto de um equipamento automatizado incluir diferentes áreas de conhecimento para sua execução. A variedade de elementos presentes tende a gerar uma barreira para o desenvolvimento das soluções possíveis. Não somente a escolha de soluções individuais a serem empregadas, mas também a compatibilidade entre elas passam a ser importante. Para auxiliar neste contexto aspectos metodológicos foram empregados.

Muitos autores propõem diferentes estratégias e ferramentas metodológicas que definem as etapas de elaboração de um projeto de produto. No entanto seu objetivo comum é auxiliar a busca por soluções que sejam capazes de atender da melhor forma possível às necessidades impostas pelo problema.

Modelos de metodologia têm sido aplicados em instituições de ensino e empresas como forma de auxiliar no entendimento e na prática do processo de criação. Um destes modelos de referência é conhecido como Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP), apresentado por Back et al. (2008).

Outras sistematizações buscam perspectivas que permitem melhorar a visão sobre o projeto em determinadas áreas. Um exemplo é a análise baseada em trabalhos de pesquisa e desenvolvimento realizados no Laboratório de Hardware (LHW - UFSC). O objetivo desta sistematização descrita por Reckmann (2009) é orientar o desenvolvimento de projetos de automação de máquinas com acionamento eletromecânico, mostrando ênfase no posicionamento.

3.1 PROJETO INFORMACIONAL

O projeto informacional compreende a etapa responsável pela análise o ciclo de vida do produto, necessidades e requisitos dos clientes, requisitos e especificações de projeto. Nesta etapa o termo projeto será utilizado como referência ao processo de concepção de um produto. O termo produto, por sua vez, será utilizado para designar o equipamento oriundo da integração do sistema de impressão 3D com a unidade de posicionamento cartesiano.

3.1.1 Restrições iniciais da dissertação de mestrado

Durante a fase de projeto de dissertação de mestrado (PDM) foram definidas restrições iniciais. Estas restrições compreendem os itens ou situações, que devido a fatores técnicos e econômicos, não podem ser inseridos ou excluídos do contexto desta dissertação de mestrado.

Um das restrições iniciais é a utilização de um sistema mecânico até então composto por uma unidade de movimentação linear de dois eixos (X e Y) localizada no laboratório LMP-Laser Este conjunto é predefinido como base para o posicionador cartesiano. Sendo que na sua condição inicial inexistia o eixo de movimentação vertical.

Espera-se que o sistema apresente uma arquitetura dita modular, que promova facilidades na modificação da utilização final do posicionador cartesiano. Sendo assim, um processo de fabricação que se dê por movimentações em dois e três eixos poderia ser aplicado. No entanto, a estrutura mecânica disponibilizada não é voltada para processos com forças de atuação elevadas. Logo, somente os processos cujas forças inerentes são consideravelmente menores que os esforços da própria movimentação devem ser aplicados a este contexto.

No âmbito eletroeletrônico as restrições iniciais compreendem a utilização de motores de passo, mantendo a configuração do sistema mecânico base disponibilizado. Este limitante associa-se principalmente ao tamanho dos motores de passo utilizados e não as suas características eletromecânicas Também limita-se a utilização do sistema CNC à uma arquitetura aberta baseada em PC, sobretudo em função do custo associado a aquisição de um sistema convencional.

Com relação ao sistema de impressão 3D foi predefinida a utilização de material termoplástico sobre a forma de filamentos, excluído, por exemplo, o uso de matérias-primas granuladas. A forma de aquecimento do material também foi limitada a utilização de resistências elétricas.

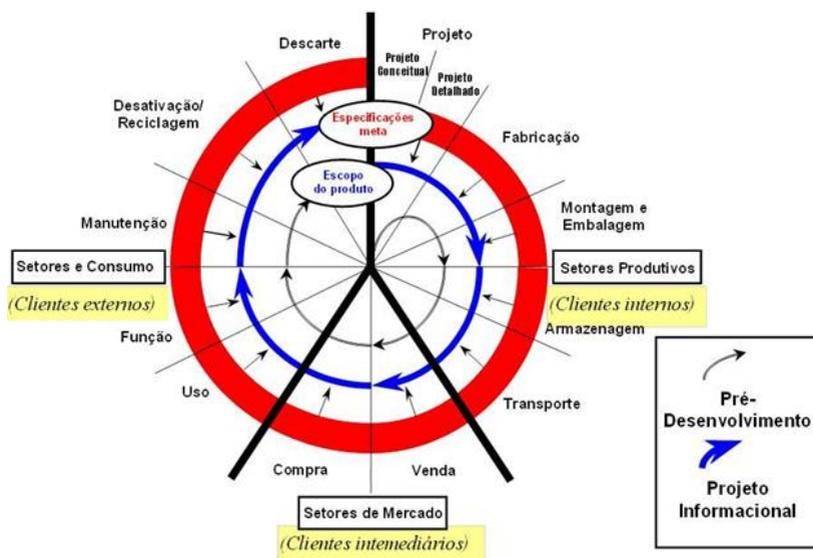
3.1.2 Ciclo de vida do produto

O ciclo de vida consiste das etapas pelas quais o produto é obtido, inserido no mercado, consumido e descartado. Sua análise permite identificar os diversos setores e clientes envolvidos e assim definir as suas respectivas necessidades. Segundo Fonseca (2000) esta análise consiste em identificar as atividades de organização e planejamento,

passando pelas fases de manufatura, utilização e assistência, bem como a reciclagem e descarte final.

A Figura 10 mostra uma visão geral sobre o ciclo de vida de um produto, os setores envolvidos e a classificação dos clientes afetados ao longo do curso da espiral. As áreas de projeto, fabricação, montagem, embalagem e armazenagem correspondem às áreas de planejamento e fabricação do produto, os chamados clientes internos. Suas necessidades estão diretamente relacionadas com facilidades de desenvolvimento e de produção.

Figura 10 – Ciclo de vida do produto.



Fonte: Adaptado de Fonseca (2000).

No contexto desta dissertação de mestrado a área de transporte, venda e compra não foi considerada na análise do ciclo de vida. O motivo é o fato de o produto ser desenvolvido para o uso dentro da própria instituição em que será concebido, tendo fins didáticos e não comerciais.

Os clientes externos englobam os indivíduos que serão afetados direta ou indiretamente pelo uso do produto, suas funções, manutenção, a desativação/reciclagem e por fim o descarte final dos materiais e componentes. Logo, este grupo de clientes prioriza facilidades na

utilização, na troca de componentes, na desmontagem e nas possibilidades de reuso ou reciclagem.

3.1.3 Clientes do produto

Com base no ciclo de vida do produto foi possível definir os clientes do produto. Os setores produtivos englobam, dentre outros, as etapas de projeto. Os clientes afetados nesta área compreendem o autor desta dissertação de mestrado e os demais envolvidos diretamente à concepção. Devido a contribuição e norteio das atividades de projeto, inserem-se também como clientes o orientador e coorientador desta dissertação de mestrado. Os principais anseios destes clientes são o atendimento dos objetivos geral e específicos associados ao produto durante a fase de projeto de dissertação de mestrado (PDM).

Outros clientes internos são responsáveis pelas etapas de fabricação e montagem do produto. Estes são em sua grande maioria técnicos dos laboratórios de fabricação da instituição. As necessidades destes colaboradores são que o produto seja fabricado pelos processos produtivos disponibilizados, respeitando sua capacidade produtiva. Os setores associados ao transporte e armazenagem também são oriundos da instituição. O produto deve respeitar os limites dimensionais e de massa manipuláveis pelos clientes destas áreas.

Os clientes externos do produto são todos os indivíduos que possam usufruir de alguma forma dos seus benefícios e funcionalidades (professores, pesquisadores e alunos da instituição) As áreas de manutenção, desativação e reciclagem estão diretamente ligadas ao suporte oferecido pela instituição e como consequência provável, serão atividades realizadas por membros ligados ao próprio laboratório.

3.1.4 Necessidades dos usuários

O desenvolvimento de um projeto está diretamente relacionado com as expectativas e anseios de seus usuários. As necessidades dos usuários são expressões espontâneas dos usuários potenciais dos produtos ou dos diferentes setores, relacionadas com o projeto ou com o produto. Segundo Fonseca (2000) a necessidade, como expressão espontânea (na forma de desejos) dos clientes internos, externos e intermediários, implica num conceito amplo, que vai desde expressões confusas e ambíguas, até frases diretas, com fundamento técnico específico.

A coleta destas informações foi obtida a partir de entrevistas com os diferentes usuários. O levantamento dos materiais e métodos de fabricação disponíveis também foi incluído nestas necessidades. As restrições iniciais da dissertação de mestrado também foram observadas nesta etapa.

As necessidades dos usuários são apresentadas em diferentes variações linguísticas, dependendo do grau de conhecimento técnico ou a familiarização com tema proposto para a dissertação de mestrado. A seleção e agrupamento das necessidades foram realizados para eliminar as repetições, obtendo apenas as informações consideradas relevantes para a execução da dissertação de mestrado. O Quadro 2 apresenta o resumo das necessidades dos usuários:

Quadro 2 – Resumo das necessidades dos usuários.

Necessidades dos usuários	
Baixo custo	CNC baseado em PC
Modularidade	Utilizar controlador MACH3
Componentes padronizados	Aquecimento controlado
Utilizar materiais disponíveis	Utilizar 2 tipos de termoplástico
Fácil manutenção	Resolução mínima de 0,02 mm
Fácil operação	Avanço de 2000 mm/mim
Confiabilidade	Segurança com intertravamento
Motor de passo nos eixos X e Z	Atingir temperaturas necessárias
Utilizar rede elétrica disponível	Aquecer bico de deposição
Baixa vibração	Usar filamento termoplástico
Mostrar variáveis de processo	Fabricação por métodos simples
Fácil montagem	Agradável esteticamente
Organizado	Silencioso

Fonte: Próprio autor.

3.1.5 Requisitos dos usuários

As necessidades dos usuários são descritas conforme informadas durante a coleta das informações. Elas fornecem uma visão ampla dos fatores tidos como importantes. Devido as diferentes origens, estas informações permanecem diversificadas mesmo após serem resumidas e excluídas as repetições.

Essas informações foram então organizadas e “traduzidas” para uma linguagem comum ao contexto desta dissertação de mestrado. A padronização linguística destas informações originou os chamados requisitos dos usuários. O Quadro 3 apresenta os requisitos dos usuários organizados em três classes: básicos, do ciclo de vida e específicos.

Quadro 3 – Requisitos dos usuários.

Classe de requisitos	Requisitos dos usuários
Requisitos básicos	Custo
	Confiabilidade
	Ergonomia
	Estética
	Padronização
	Segurança
Requisitos do ciclo de vida	Fabricabilidade
	Montabilidade
	Transportabilidade
Requisitos específicos	Modularidade
	Arquitetura CNC
	Controle de temperaturas
	Nível de vibração
	Quantidade de termoplásticos
	Resolução
	Tipo de alimentação elétrica
	Tipo de Motorização
Velocidade	

Fonte: Próprio autor.

3.1.6 Requisitos do projeto

Os requisitos dos usuários depois de organizados são vinculados às características da dissertação de mestrado no intuito transformá-los em atributos tecnicamente mensuráveis. Ao expressar os requisitos dos usuários em uma linguagem de engenharia obtêm-se os requisitos de projeto.

Segundo Fonseca (2000) os requisitos de projeto buscam vincular desejos e necessidades dos usuários às características de técnicas,

formais, de funcionamento, de uso, entre outras, do produto que vai ser projetado. O Quadro 4 apresenta estes requisitos de projeto.

Quadro 4 – Requisitos de projeto.

Requisitos de projeto
Área útil de trabalho
Ausência de cantos vivos
Custo
Diâmetro do filamento
Documentação técnica
Facilidade de utilização
Intertravamento (Parada de emergência)
Isolamento elétrico
Manutenção
Materiais disponíveis
Resolução
Taxa de falhas
Temperatura da mesa
Temperatura do bico
Tensão de alimentação
Tipo de CNC
Tipo de controlador CNC
Tipo de termoplástico
Utilizar motores de passo
Velocidade
Velocidade de deposição

Fonte: Próprio autor.

3.1.7 Especificações do projeto

Segundo Fonseca (2000) as especificações de projeto são os requisitos de projeto convenientemente especificados, que designam o resultado final da fase informacional. Seu objetivo é definir um direcionamento básico que oriente a execução do projeto.

A hierarquização dos requisitos de projeto foi realizada utilizando-se a primeira casa da qualidade (Apêndice A), baseada no método de Desdobramento da Função Qualidade (QFD – *Quality*

Function Deployment). Tal hierarquização é baseada nas relações estabelecidas entre os requisitos de usuários e requisitos de projeto.

Após a hierarquização dos requisitos de projeto foi feito seu comparativo com a problemática original e as restrições iniciais da dissertação de mestrado. O objetivo foi incluir sua importância ao contexto, decidindo quais requisitos de projeto efetivamente integrarão as especificações. Também foram definidas as metas específicas (parâmetros alvo) dos requisitos de projeto.

Ao final do processo de hierarquização, seleção e definição de metas específicas dos requisitos de projeto, obteve-se a listagem das especificações de projetos, apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 – Especificações de projeto.

	Especificação	Meta específica
1	Custo	< R\$ 4000,00
2	Tipo de CNC	Baseado em PC
3	Materiais disponíveis	> 75% do total
4	Velocidade	> 3000 mm/min
5	Resolução	0,02 mm
6	Área útil de trabalho	200x200x200 mm
7	Tipo de termoplástico	ABS e PLA
8	Tipo de controlador CNC	MACH3
9	Velocidade de deposição	10 mm ³ /min
10	Tensão de alimentação	220 V AC
11	Utilizar motores de passo	Em X, Y e Z
12	Diâmetro do filamento	1,75 mm
13	Temperatura do bico	Mínimo 250 °C
14	Intertravamento (Parada de emergência)	< 1s (tempo de parada)
15	Temperatura da mesa	Mínimo 120 °C
16	Facilidade de utilização	Qualitativo
17	Ausência de cantos vivos	0 superfícies cortantes
18	Taxa de falhas	< 1 Falha/50 h
19	Manutenção	10 h/mês
20	Isolamento elétrico	> 1 GΩ
21	Documentação técnica	Manual de operações

Fonte: Próprio autor.

4 APRESENTAÇÃO DO POSICIONADOR

Nos capítulos a seguir serão apresentados os componentes e as características do posicionador cartesiano utilizado nesta dissertação de mestrado.

4.1 COMPOSIÇÃO DO *HARDWARE*

Para apresentar as características de *hardware*, o equipamento foi dividido em duas partes. Nos capítulos a seguir serão apresentadas as partes mecânica e eletroeletrônica.

Como a nomenclatura sugere, a parte mecânica inclui os elementos estruturais e mecanismos de movimentação. Na parte eletroeletrônica são apresentados os itens responsáveis pelo funcionamento elétrico e eletrônico do sistema.

4.1.1 Parte mecânica

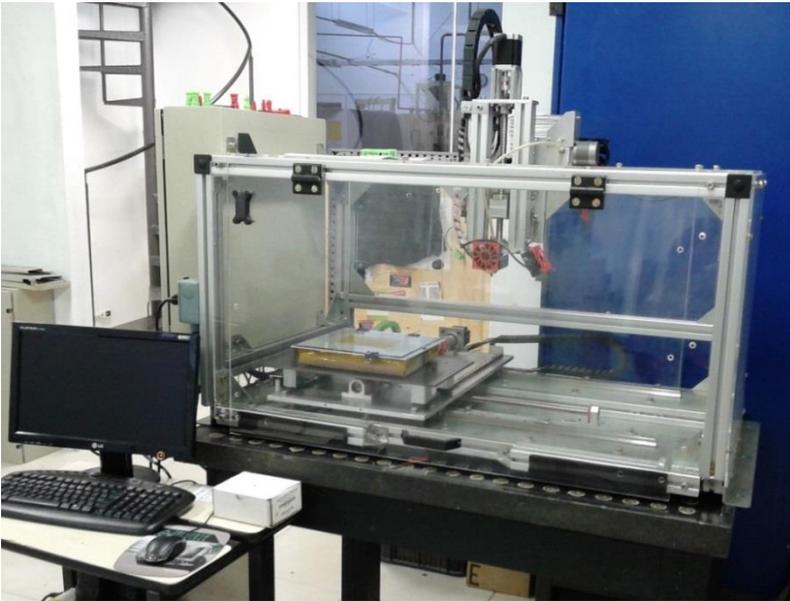
A composição da parte mecânica encontra-se dividida em três grandes grupos: estrutura, mecanismos e acionamentos. O grupo estrutura representa os elementos que propiciam suporte aos demais dispositivos, formando o corpo do equipamento. Os mecanismos e acionamentos são os itens que possuem funções específicas que possibilitam as movimentações controladas em um equipamento automatizado.

4.1.1.1 Estrutura

Como base principal o equipamento conta com uma mesa com tampo de granito sustentada por quatro pés de aço providos de elementos elastoméricos para absorção de vibração e regulagem de altura. A massa do tampo de granitos se opõe às forças dinâmicas causadas pelas acelerações das massas da mesa de coordenada X-Y.

O sistema de posicionamento encontra-se montado sobre o tampo de granito. Na parte inferior da montagem mecânica uma chapa metálica sustenta os componentes dos eixos X e Y. Quatro perfis modulares de alumínio erguem-se das extremidades dando suporte ao nível superior da montagem mecânica. As traves longitudinais superiores atuam como fixação para o eixo Z e demais elementos. Em uma das laterais, fixado aos perfis, encontra-se o gabinete elétrico do equipamento. A Figura 11 mostra o arranjo mecânico final do posicionador cartesiano.

Figura 11 – Visão geral do posicionador cartesiano.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 11 também mostra a interface do operador com o equipamento, realizada por meio de um computador com monitor. Para a entrada de dados e manipulação dos recursos do CNC são utilizados teclado e mouse. A proximidade destes itens permite ao operador visualizar simultaneamente o funcionamento do *software* CNC e a execução do processo. Mais figuras da constituição mecânica do equipamento podem ser observadas no Apêndice B.

4.1.1.2 Mecanismos

A movimentação do equipamento conta com um princípio de projeto semelhante para os três eixos de movimentação. Para executar a função de guiar são utilizadas guias translativas lineares baseadas no princípio de rolamento. As guias lineares empregadas usam patins com esferas recirculantes. Cada conjunto de guias lineares permite o deslocamento em um grau de liberdade e restringe os demais.

Para transformação do movimento de rotação dos acionamentos em movimento linear empregam-se fusos com castanhas dotadas de esferas recirculantes. As extremidades dos fusos encontram-se apoiadas sobre dois pontos. Um deles, dito fixo, possui dois rolamentos cujas superfícies externas estão alojadas em um bloco de alumínio que forma o suporte. O outro suporte possui apenas um rolamento alojado de tal forma que as suas laterais não possuam assentamento que restrinja a movimentação no sentido axial do fuso. Essa configuração possibilita aliviar a tensão resultante da expansão térmica do conjunto, motivo pelo qual este suporte recebe a denominação de livre.

A ligação dos fusos com os acionamentos não apresenta elementos transformadores que modificam as grandezas de torque e velocidade, como por exemplo, os redutores planetários. A transmissão de potência ocorre por meio de acopladores do tipo flexível (eixo Z) e tipo foles (eixos X e Y). Em ambos os eixos os fusos apresentam diâmetro de 16 mm e passo de 5 mm.

4.1.1.3 Acionamentos

Na fronteira entre o sistema eletroeletrônico e o sistema mecânicos encontram-se os acionamentos. São eles os responsáveis por transformar energia elétrica e comandos em energia mecânica que promove a movimentação. Estes conversores eletromecânicos, simplesmente chamados de motores elétricos, são aplicados com a função de garantir o posicionamento dos eixos de movimentação.

Para os eixos de movimentação são empregados motores de passo com resolução de $1,8^\circ$. Esta característica permite atingir, ao longo de uma rotação completa, no mínimo 200 posições distintas de parada. Segundo Kalatec Automação (2014a) os motores empregados, modelo KTC-HT23-400, apresentam comprimento de 76 mm, flange com padrão NEMA 23 e ligação elétrica com oito fios disponíveis.

Em função da configuração adotada no *driver* de acionamento, os motores empregados necessitam de 400 comandos de movimentação (pulsos) para cada rotação completa. Levando-se em conta a forma de acoplamento e o passo dos fusos utilizados, a resolução do eixos de movimentação linear é de 0,0125 mm.

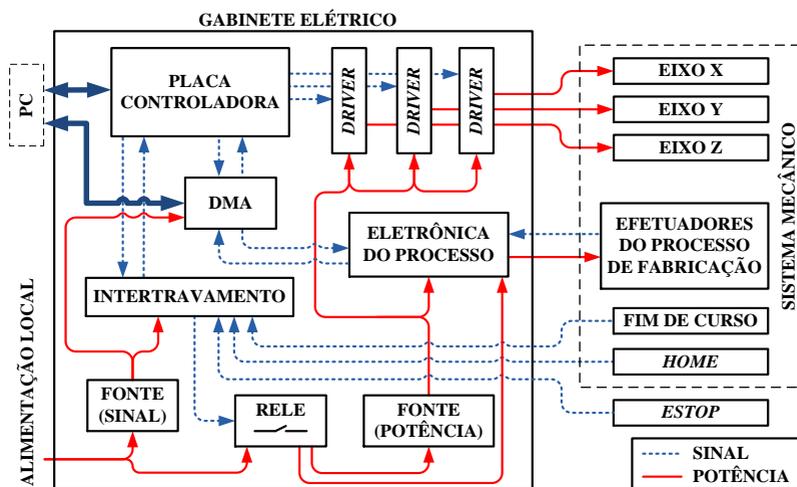
4.1.2 Parte eletroeletrônica

Os principais elementos que constituem o conjunto elétrico e eletrônico do sistema estão montados no gabinete elétrico. São

dispositivos responsáveis pelo gerenciamento e comando do equipamento. Embora externos ao gabinete, somam-se ainda a esta classificação os elementos efetadores do processo de fabricação. Os motores, devido a sua natureza eletromecânica também são apresentados neste contexto.

Para ilustrar a correlação entre estes elementos a Figura 12 mostra o esquema simplificado do gabinete elétrico. A representação também se expande a elementos externos ao gabinete, englobando os itens, como o PC e o sistema mecânico.

Figura 12 – Configuração (simplificada) do gabinete elétrico.



Fonte: Próprio autor.

Na parte superior direita da Figura 12 estão representados os eixos de movimentação principal do sistema (eixos X, Y e Z). Abaixo são mostrados os periféricos responsáveis pelo processo hospedado (bloco intitulado de efetadores do processo) onde se incluem os elementos associados a impressão 3D. Por fim há os sinais de fim de curso, *home* e parada de emergência (*Estop*), os quais são dirigidos ao bloco de intertravamento presente no gabinete elétrico.

Os itens presentes dentro do bloco principal, que representa o gabinete elétrico, estão descritos com mais detalhes nas secções a seguir:

4.1.2.1 Placa controladora de movimento

A placa controladora de movimento (ou simplesmente controladora) é um dos elementos que pode ser considerado (junto ao PC) como o cérebro do equipamento. Responsável por transformar a informação digital vinda do PC em impulsos elétricos, a placa controladora de movimento é quem gerencia o comando dos motores. Além disto, também são de sua responsabilidade as entradas e saídas (I/O - Inputs/Outputs) digitais presentes no equipamento (embora outros dispositivos também possam conter I/O).

O modelo presente no equipamento é denominado de GX-MAX, fabricado pela empresa nacional NEVEX Tecnologia Ltda. A opção por este elemento foi motivada pela capacidade de controlar até seis eixos simultaneamente, dispor de comunicação via USB ou Ethernet e disponibilizar saídas e entradas de sinais. A disponibilidade deste item também contribui para sua escolha. Este dispositivo apresenta várias conexões externas como mostra a Figura 13.

Figura 13 – Placa controladora de movimento GX-MAX.



Fonte: Nevex Tecnologia Ltda (2013).

Dentre todas as conexões destacam-se o USB, na extremidade superior esquerda da Figura 13, que realiza a ligação da controladora com o PC. Os conectores com entradas e saídas (extremidade inferior

direita) e a ligação para os sinais enviados aos *drivers* dos motores seguem o padrão DB25.

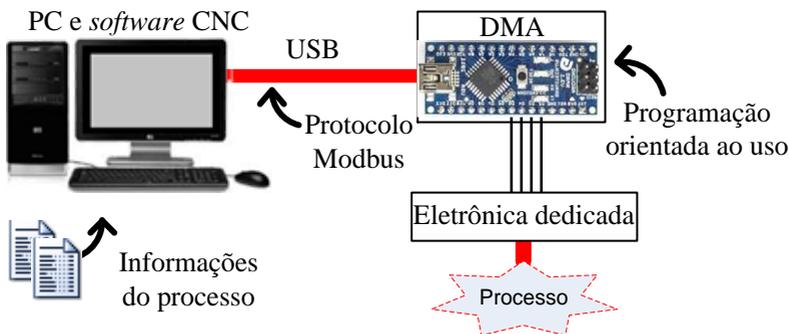
4.1.2.2 Dispositivo Microcontrolado Auxiliar

Para possibilitar este incremento de I/O e também uma maior capacidade de processamento de informações pelo equipamento foi desenvolvido um Dispositivo Microcontrolado Auxiliar (DMA). As bases deste dispositivo são a utilização de um microcontrolador de baixo custo e o código aberto do projeto Arduino MODBUS Slave.

O projeto Arduino MODBUS Slave desenvolvido por Jpmzometa (2013) é um exemplo de aplicação *open source* que utiliza uma plataforma microcontrolada como dispositivo I/O. Nele um microcontrolador torna-se um escravo em uma rede de comunicação MODBUS. Apesar do projeto não ser voltado para aplicações em máquinas CNC, o protocolo MODBUS está difundido em muitos equipamentos aplicados no setor industrial.

A Figura 14 apresenta o contexto de ligações do DMA no equipamento. Nela os transdutores e atuadores presentes no equipamento são conectados a um microcontrolador por intermédio de uma eletrônica dedicada. Este por sua vez comunica-se com o PC por meio de uma porta USB, excluindo a utilização da placa de controle de movimento para essa função em particular.

Figura 14 – Contexto das ligações do DMA no equipamento.



Fonte: Próprio autor.

Desta forma informações do processo, contidas no código de execução da peça, podem ser transferidas do CNC para o DMA. No DMA as informações são processadas para determinar as ações. Considerando que o microcontrolador conta com portas do tipo digital e analógicas, estas ações podem ser desde o acionamento de um relé, até a leitura de transdutores.

4.1.2.3 Circuito de intertravamento

Cada componente em uma máquina automatizada desempenha um papel, muitas vezes, vital para o correto funcionamento do sistema. Em casos mais específicos, alguns destes elementos estão associados à segurança do equipamento, do ambiente e do operador.

Além disso, o próprio sistema pode assumir condições indesejadas. Um exemplo de condição indesejada seria uma movimentação além dos limites estabelecidos de curso. Condições indesejadas ou de mau funcionamento são situações na qual o equipamento deve ser preventivamente contido.

Logo, o sistema somente pode entrar em operação quando condições favoráveis são alcançadas. O papel de liberar o equipamento para atuação é responsabilidade do circuito de intertravamento. Nele as condições lógicas são testadas e quando devidamente satisfeitas propiciam a liberação para a atuação das funções do sistema.

O objetivo do circuito de intertravamento é utilizar a informação fornecida por diferentes elementos para liberar o sistema. A informação é proveniente de componentes específicos, como por exemplo, o *software* CNC. Botões de emergência e sensores de fim de curso também se encaixam como fonte de informação.

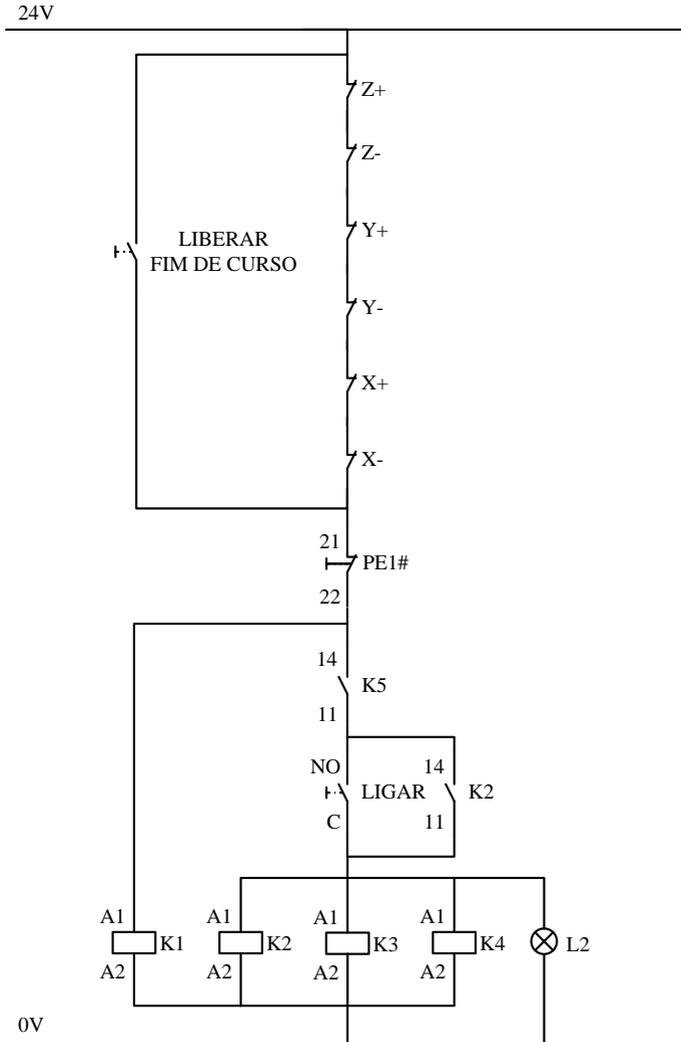
Na Figura 15 está representado o circuito de intertravamento adotado no equipamento. Os contatos elétricos representam as informações fornecidas por diferentes elementos do sistema.

O circuito inicia-se com a linha de 24 V que alimenta as chaves de fim de curso de cada eixo. Os contatos normalmente fechados (NF) Z+, Z-,... e X- estão dispostos em série, assim qualquer um deles quando acionado, irá alterar os estado desta parte. O contato normalmente aberto (NA) denominado Libera Fim de Curso é utilizado para cancelar, eletricamente, esta alteração de estado. Esta ação é utilizada pelo usuário para reverter uma situação de extrapolação do limite de movimentação.

O botão NF PE#1 corresponde ao botão de emergência. O contato K5 é um sinal enviado por um relé quando o PC está conectado e operando o sistema. O botão Ligar aciona o sistema elétrico e em ação

conjunta, o contato K2 garante a permanência do circuito atuando como uma espécie de retenção elétrica.

Figura 15 Circuito de intertravamento.



Fonte: Próprio autor.

Na parte inferior do circuito encontram-se os relés que efetivamente executam as ações do intertravamento sobre o equipamento. Conforme a condições anteriores são atendidas, os relés podem ou não serem acionados. Os seus respectivos contatos estão ligados a pontos estratégicos do sistema. Estes contatos permitem suspender imediatamente o fornecimento de energia para determinados setores do equipamento.

Quando o suprimento de energia é cortado pelo intertravamento ocorre à interrupção de ações consideradas potencialmente perigosas. Neste caso, o suprimento de energia para movimentação de todos os motores e para o funcionamento da eletrônica do processo produtivo realizado é interrompido imediatamente. Simultaneamente o gabinete elétrico envia um sinal ao PC informando sobre a situação de emergência cessando também a execução por parte do *software* CNC.

4.1.2.4 Fontes de alimentação e *drivers*

As fontes de alimentação são elementos responsáveis por adequarem os parâmetros da rede elétrica local às aplicações no equipamento. Estes parâmetros basicamente são a tensão e corrente que devem ser fornecidas aos componentes elétricos internos.

Duas classificações são impostas às fontes de alimentação presentes no equipamento. As fontes de sinal são aquelas que fornecem energia aos elementos de baixo consumo como microcontrolares e relés. Já as fontes de potência suprem itens como os *drivers* e seus motores, cuja demanda por energia é maior. Enquanto os elementos de baixo consumo são atendidos com poucos watts, os de grande consumo estão acima das centenas de watts.

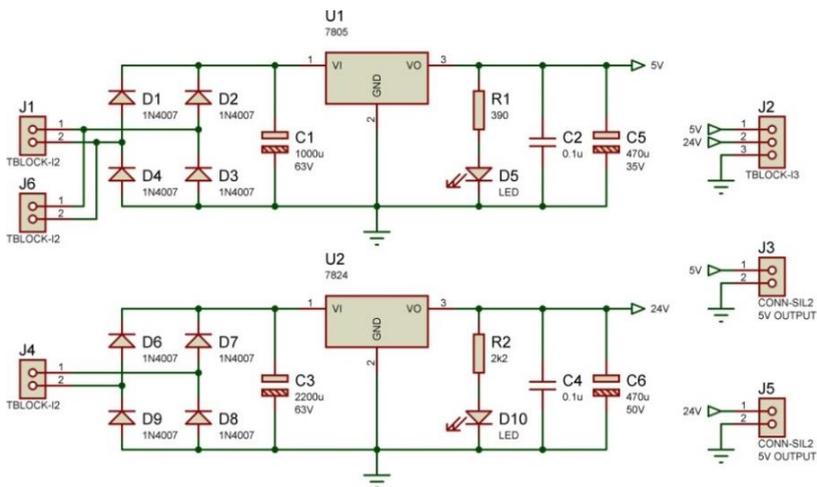
A fonte de sinal do equipamento é composta por circuito regulador de tensão montado especificamente para esta finalidade. Este circuito, mostrado na Figura 16, basicamente retifica a tensão de corrente alternada (CA) oriunda de transformador abaixador conectado a rede local e a regula para um valor tensão com corrente contínua (CC) desejado.

A esquerda da Figura 16 estão situados os conectores de entrada (J1, J6 e J4). Ao lado os diodos retificadores (D1 a D4; D6 a D7), seguidos dos reguladores de tensão (U1 e U2). Os capacitores (C1 a C6) trabalham na estabilização das tensões de entrada e saída. Os LED de indicação (D5 e D10) e os conectores de saída (J2, J3 e J5) completam o esquemático. A escolha por este modelo de fonte de sinal deu-se pelo fato de atender os valores de tensão (5 e 24 V) e de corrente (até 1A)

necessários. Considerando o custo de fontes comerciais com saída dupla, a relação custo-benefício oferecida pelo circuito também favoreceu sua seleção.

Como solução para a demanda dos componentes de potência optou-se pela utilização de uma fonte chaveada comercial. O valor de tensão (52 V) e corrente (10 A) provido pela fonte atende os três motores que acionam os eixos principais de movimentação.

Figura 16 – Circuito da fonte de sinal



Fonte: Próprio autor.

Atuando em conjunto com os motores têm-se os *drivers* modelo STR8 (Figura 17). Sua seleção foi motivada pela variedade de configurações, desde a corrente até a resolução possível para os motores. O intervalo de alimentação vai de 24 a 75 V CC e as entradas digitais são do tipo diferencial segundo Applied Motion (2012).

Os *drivers* são alimentados pela fonte CC de 52 V. A resolução selecionada foi de meio-passo e a corrente nominal ajustada para os motores foi de 2,38 A. A configuração de ligação das bobinas é utilizada em paralelo para possibilitar regimes de rotação maiores como orienta Kalatec Automação (2014b).

Somente uma configuração em um dos *drivers* difere das demais utilizadas. Para o eixo Z o valor da corrente com o motor estático é de 70 % (da corrente nominal ajustada), contra os 50 % selecionados para

os eixos X e Y. Essa escolha deu-se pelo fato do eixo que está na vertical ter sua massa móvel sustentada diretamente pelo fuso. O esforço resultante da gravidade soma-se então ao oriundo da movimentação do próprio sistema. Uma corrente maior na condição estática prover mais torque para evitar o deslocamento indesejado do eixo de movimentação.

Figura 17 – *Driver STR8* instalado no equipamento.



Fonte: Próprio autor.

COMPOSIÇÃO DO SOFTWARE

Três *softwares* foram necessários para obtenção de arquitetura que possibilitasse adequar as configurações do sistema CNC ao processo produtivo e ao usuário final. Basicamente utilizou-se o *software* CNC propriamente dito, um *software* auxiliar para personalização da interface CNC e um terceiro para programação do Dispositivo Microcontrolado Auxiliar.

Enquanto o *software* CNC também é utilizado pelo usuário durante o funcionamento do posicionador cartesiano, os demais *softwares* ficam restritos ao uso durante a fase de desenvolvimento. Isto se deve ao fato das configurações realizadas nestes *softwares* não

precisarem ser modificadas depois de programadas. Estes casos são apresentados a seguir, sendo que detalhes específicos da programação não serão aprofundados.

4.1.3 Software CNC

O principal *software* de funcionamento do equipamento é denominado MACH3, que atua sobre plataforma Windows e permite transformar um computador pessoal em um sistema CNC segundo Newfangled Solutions (2014a).

Como principais vantagens em sua utilização tem-se a facilidade de personalização dos seus parâmetros. Os recursos oferecidos permitem ao usuário modificar suas características sem a necessidade de intervenção do fornecedor ou outro serviço especializado para *startup*.

Dentre as configurações essenciais estão a parametrização de resolução, velocidade e aceleração dos eixos de movimentação. A determinação das entradas e saídas de sinais, onde inclui-se a interligação das paradas de emergência. E numa situação mais específica o uso dos recursos de comunicação com outros dispositivos via protocolos, como por exemplo, MODBUS.

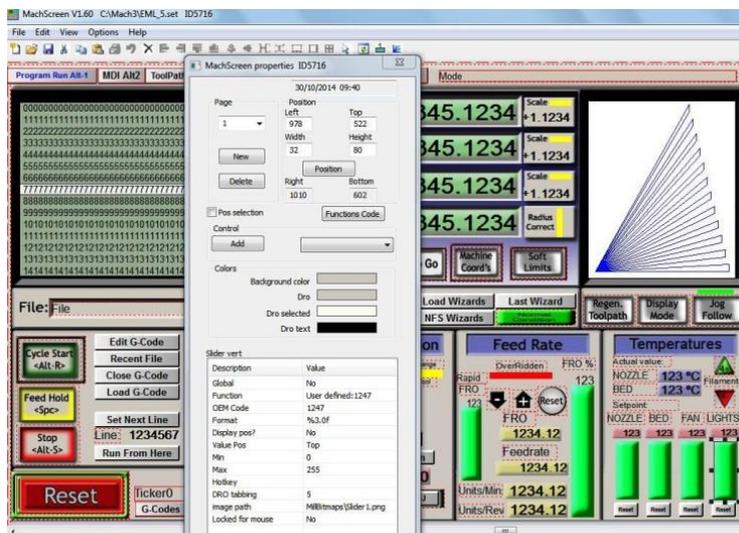
4.1.4 Software de personalização de telas do CNC

Por ser um *software* CNC de uso voltado para máquinas de usinagem convencionais as informações apresentadas pelo MACH3 são relativas a esta aplicação. No entanto, existe a possibilidade de personalizar sua interface com o usuário para diferentes finalidades. Tal modificação é possível graças a programas para edição de telas ou *screen designers*.

Segundo Newfangled Solutions (2014b) um dos programas mais robustos para essa finalidade é denominado MachScreen, desenvolvido por Dietz (2014). A interface do *software* de edição (Figura 18) permite modificar os elementos gráficos das diversas telas do *software* CNC.

Além da modificação dos campos originais tanto no aspecto físico quanto funcional, a personalização permite inserir novos recursos. Existe a liberdade de excluir itens pouco utilizados para criação de novos elementos gráficos voltados para a aplicação final, razão pela qual foi selecionado este *software*.

Figura 18 – Tela do *software* MachScreen.



Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Software de programação do DMA

O Dispositivo Microcontrolado Auxiliar é baseado na utilização dos microcontroladores Atmega328P, pertencentes à família AVR fabricados pela Atmel Corporation. Esta característica possibilita utilizar diferentes *softwares* destinados à programação destes componentes. O próprio fabricante oferece uma plataforma de desenvolvimento, denominada Atmel Studio, para a criação de projetos e programação de seus componentes, disponibilizado por Atmel Corporation (2015).

Em virtude das referências utilizadas para o desenvolvimento do código empregado no DMA optou-se pela utilização de outro ambiente de programação. Foi utilizado um programa *open source* baseado na linguagem *processing*, popularizado como Arduino. A linguagem empregada neste *software* (Figura 19) permitiu a inclusão de funções destinadas ao uso no equipamento, como a comunicação MODBUS.

Figura 19 – Tela do *software* durante a programação do DMA.

The screenshot shows the Arduino IDE interface for the sketch 'EML_5_Modbus_Control'. The code includes several preprocessor directives and variable declarations. The error messages at the bottom indicate that the variables 'PIDN' and 'PIDB' are not declared in their respective scopes.

```

EML_5_Modbus_Control
File Edit Sketch Tools Help
EML_5_Modbus_Control
#define SensBed A0
#define Fan 10
#define Lights 11

//Declaração de variáveis:
//Para leitura do termistor:
int VoM, VoB; // Integer value of voltage reading
float RM=5600.0, RB=5600.0; // Fixed resistance in the voltage divider
float R1N=100000.0, T1N=298.15, bN=3990.0, R1B=100000.0, T1B=298.15, bB=3990.0;
float RctN, T2N, T2SetN, R2N, RtB, T2B, T2SetB, R2B;

//Para ação do PID:
float TempMozzle, TempBed;
double SetpointN, InputN, OutputN, SetpointB, InputB, OutputB;
PID PIDN(&InputN, &OutputN, &SetpointN, 1, 8, 1, DIRECT);
double KpN=9.98, KiN=0.499, KdN=49.92;

'PID' does not name a type
EML_5_Modbus_Control:196: error: 'PIDN' was not declared in this scope
EML_5_Modbus_Control.ino: In function 'void ExecutarPIDBed()':
EML_5_Modbus_Control:218: error: 'PIDB' was not declared in this scope
138 Arduino Nano w/ ATmega328 on COM7
  
```

Fonte: Próprio autor.

O DMA foi desenvolvido como base em um código *open source* para transformar o microcontrolador em um dispositivo de comunicação MODBUS. O projeto Arduino MODBUS Slave proposto por Jpmzomet (2013) inclui as funções básicas de comunicação e endereçamento de variáveis. Este código permite que usuários personalizem sua rotina para à aplicação desejada assim como ocorre em um CLP convencional.

Dentro deste código base foram inseridas novas linhas de comando. O objetivo desta ação foi permitir que o *software* CNC comunique-se com o DMA. Com a comunicação estabelecida foi possível enviar comandos específicos inseridos durante o funcionamento do equipamento. Dentre os comandos possíveis estão o acionamento de saídas digitais, variação das saídas que atuam por Modulação da Largura de Pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) e a definição de valores em variáveis armazenadas no DMA.

Outra funcionalidade inserida na programação do DMA foi o controle em malha fechada. A estratégia de controle do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) permite comandar uma saída de acordo com a leitura obtida por um transdutor ligado ao processo. A

inclusão de funções do tipo PID foi possível graças ao projeto disponibilizado por Beauregard (2014).

5 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE IMPRESSÃO 3D

Para verificar o funcionamento do sistema de impressão 3D foi realizada sua integração com o posicionador cartesiano. Os resultados desta etapa visam fornecer elementos para analisar quão eficiente pode ser uma arquitetura modular em uma situação real, além de destacar pontos positivos e negativos associados a integração.

Foi definido que o método de impressão 3D de polímeros, baseados na técnica de FDM, seria o processo produtivo a ser integrado ao sistema de posicionamento cartesiano. O principal motivo que levou a escolha da impressão 3D foi a susceptibilidade do processo a automação. Como aspecto negativo tem-se que a aquisição do material processado em forma de filamento é onerosa do ponto de vista custo por quilograma.

Para executar o processo de impressão 3D vários dispositivos e códigos de programação precisaram ser desenvolvidos. Estes elementos podem ser divididos em duas classes distintas. O *hardware* de processo constitui os elementos físicos encarregados do processo de fabricação. Já a parte de *software* envolve os programas inerentes ao uso da impressão 3D e as personalizações necessárias para adaptar o comportamento do equipamento ao processo hospedado.

5.1 *HARDWARE* DO PROCESSO

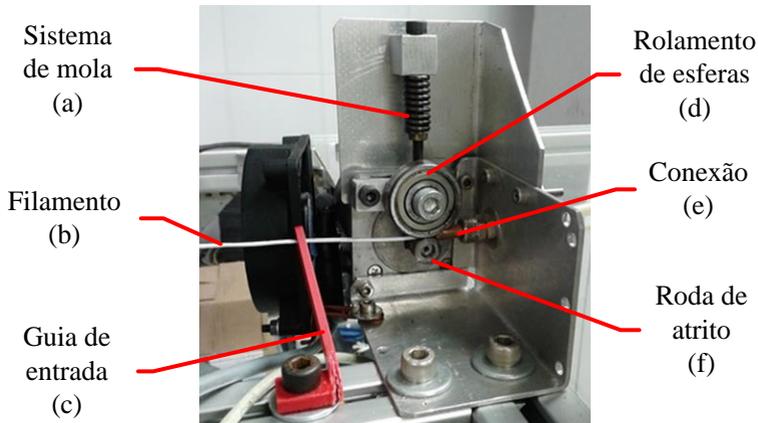
Os elementos físicos que atuam na execução do processo de impressão 3D são basicamente constituídos pelos elementos apresentados a seguir:

5.1.1 Extrusor de filamento

Devido à utilização de filamento, foi desenvolvido um dispositivo destinado à alimentação deste material. A denominação extrusor de filamento contempla os elementos mecânicos responsáveis por movimentar, de forma controlada, o filamento. Na Figura 20 é mostrada a montagem do sistema de avanço do filamento.

A roda de atrito ou polia tratora (f), responsável por movimentar o filamento (b), está diretamente acoplada ao eixo de um motor de passo e foi fabricada na forma de um cilindro com ranhuras longitudinais. O diâmetro no ponto de contato e a rotação do motor de passo determinam a quantidade e velocidade de avanço do filamento.

Figura 20 – Imagem do extrusor contendo filamento.



Fonte: Próprio autor.

Um guia de entrada (c) é utilizado na assegurar a posição inicial do filamento em relação ao dispositivo de avanço. Para manter o contato e evitar o escorregamento do filamento, emprega-se um rolamento de esferas (d) pressionado contra a roda de atrito pela ação de um sistema de mola (a). O filamento impulsionado pela roda de atrito é conduzido para o interior de uma conexão (e) que está ligada a um tubo flexível. Este tubo direciona o filamento até o cabeçote extrusor.

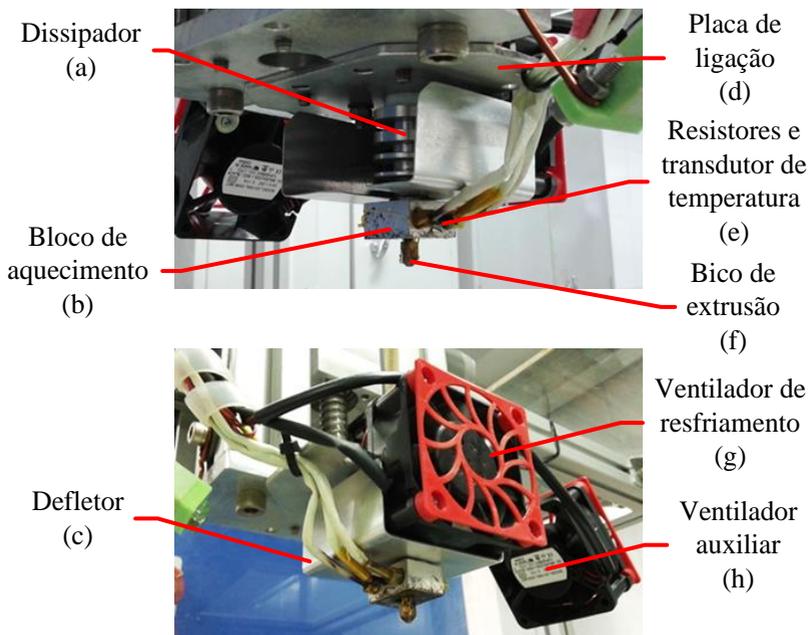
5.1.2 Cabeçote extrusor

Localizado na extremidade inferior do eixo Z, o conjunto denominado cabeçote extrusor engloba diversos elementos, que pode ser observado na Figura 21. Este cabeçote extrusor é acoplado ao restante do equipamento por interfaces de resfriamento. Sua extremidade superior está conectada a uma placa de ligação (d) por meio de discos de politetrafluoretileno (PTFE). Estes discos são utilizados como isoladores térmicos, visto que a temperatura empregada poderia ser transferida para o restante da estrutura.

O tubo flexível com o filamento é acoplado a um canal metálico de 45 mm de comprimento com furo concêntrico de 2 mm. Este canal está provido de uma rosca externa M6 para montagem. Um dissipador (a) cilíndrico de alumínio envolve maior parte do corpo do canal. Na

extremidade inferior encontra-se o bloco de aquecimento (b) e o bico de extrusão (f).

Figura 21 – Imagens do cabeçote extrusor.



Fonte: Próprio autor.

O bloco de aquecimento, fabricado em alumínio, é provido de um furo roscado. Em uma extremidade está montado o tubo do canal metálico. Na outra extremidade está montado o bico de extrusão. O aquecimento deste bloco se dá por dois resistores de fio de carbono. A temperatura é monitorada por um transdutor de temperatura do tipo *Negative Temperature Coefficient* (NTC). Resistores e transdutor de temperatura (e) estão posicionados no interior do bloco de aquecimento.

O bico de extrusão é fabricado em latão com sextavado externo e sua montagem ao bloco de aquecimento é feita por uma rosca M6. A forma cônica externa, achatada na extremidade inferior permite delimitar a área frontal do bico.

Outros elementos também são destacados na Figura 21. O ventilador de resfriamento (g) localizado à frente da montagem encobre

todo o corpo do dissipador e a parte acima da placa de ligação. Seu objetivo é contribuir para resfriamento dos elementos ligados fisicamente ao bloco de aquecimento evitando o sobreaquecimento dos demais itens. Um defletor de alumínio (c) evita que o fluxo de ar atinja os elementos de aquecimento e a área de trabalho.

O ventilador auxiliar (h) é um item de uso facultativo que não está diretamente relacionado com o bico aquecido. Ele é empregado quando se deseja a retirada de calor da área de trabalho em determinadas condições. Seu acionamento e intensidade são selecionados via *software* CNC de forma manual ou automática (quando presentes no código de execução da peça).

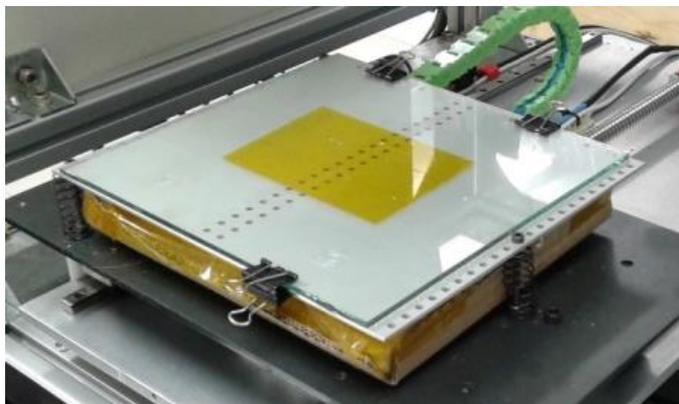
5.1.3 Mesa de deposição

Após ser aquecido e extrudado através do bico, o material oriundo do filamento é depositado sobre uma superfície plana localizada sobre a mesa X Y. Esta superfície é constituída por uma placa de vidro comum. Em situações em que não se obtém uma aderência adequada do material impresso sobre a placa de vidro, esta pode ainda ser recoberta por soluções químicas ou fitas adesivas.

Os constantes ciclos de aquecimento e resfriamento interferem no posicionamento da mesa de deposição em virtude da dilatação térmica dos elementos envolvidos. Para possibilitar a regulagem do plano perpendicular ao eixo Z há um sistema de ajuste de posicionamento, compostos por três parafusos e três molas helicoidais. O aperto dos parafusos aproxima a mesa contra a base do posicionador enquanto o conjunto de molas a mantém em posição. Este sistema também garante a segurança da instalação, pois, caso o eixo Z atinja a superfície, a mesa será deslocada para baixo evitando que a placa de vidro ou o bico de extrusão sejam danificados. A montagem deste sistema sobre os eixos X e Y do posicionador pode ser observada na Figura 22.

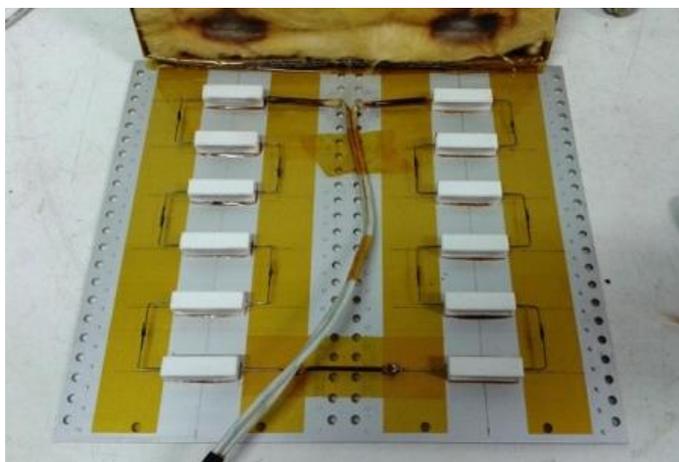
Imediatamente abaixo da placa de vidro encontra-se a base aquecida, constituída por uma lâmina de alumínio. Sob esta lâmina são fixadas 12 resistências elétricas com adesivo epóxi. Estes elementos resistivos promovem o aquecimento da lâmina de alumínio e por condução de calor à placa de vidro. Abaixo da lâmina de alumínio, uma camada de fibra de vidro garante o isolamento térmico entre a parte inferior do conjunto e a mesa de coordenadas. Os componentes responsáveis pelo aquecimento da mesa de deposição são mostrados na Figura 23.

Figura 22 – Mesa de deposição fixada ao posicionador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Lâmina de alumínio com resistores de aquecimento.



Fonte: Próprio autor.

5.1.4 Eletrônica de processo

A execução do processo produtivo exige que o sistema de impressão 3D atenda as demandas que são supridas pelos elementos descritos anteriormente. No entanto, o extrusor de filamento, o bico de

extrusão e a mesa de deposição ainda dependem de elementos eletroeletrônicos para executarem suas funções. Ao conjunto formado por estes elementos é dado o nome de eletrônica de processo, de modo a diferenciá-la dos demais itens que são inerentes ao posicionador.

Uma das formas de estabelecer os itens necessários para o desenvolvimento da eletrônica de processo é listar as funções relacionadas a ela. Resumidamente o sistema deve atender aos seguintes requisitos:

- a) controle da velocidade de avanço do filamento;
- b) aquecimento do termoplástico no bico extrusor;
- c) aquecimento da mesa de deposição;
- d) controle de velocidade do ventilador auxiliar (opcional).

Para a movimentação do filamento optou-se pelo uso de um motor de passo em virtude da disponibilidade e custo-benefício. A instalação dessa solução inclui além do motor de passo, um *driver*, uma fonte de alimentação 24 V CC e o cabeamento necessário.

O aquecimento do bico de extrusão é realizado por dois resistores de fio de carbono de $4,7 \Omega$ ligados em série. Sua alimentação é provida pela mesma fonte utilizada para o motor de passo. Para dosar a energia fornecida pela fonte às resistências é utilizado um transistor do tipo MOSFET, modelo IRF530. O bico de extrusão também conta com um transdutor de temperatura NTC que apresenta resistência interna de $10 \text{ k}\Omega$ a 25°C .

A mesa de deposição, em virtude da sua área, exige uma potência maior para atingir a temperatura de regime, em comparação com o bico de extrusão. A sua alimentação é feita diretamente da rede de 220 V CA. O controle da energia fornecida para o aquecimento da mesa é realizado com auxílio de um relé de estado sólido. Um transdutor de temperatura, idêntico ao empregado no bico de extrusão, também está incorporado à mesa de deposição.

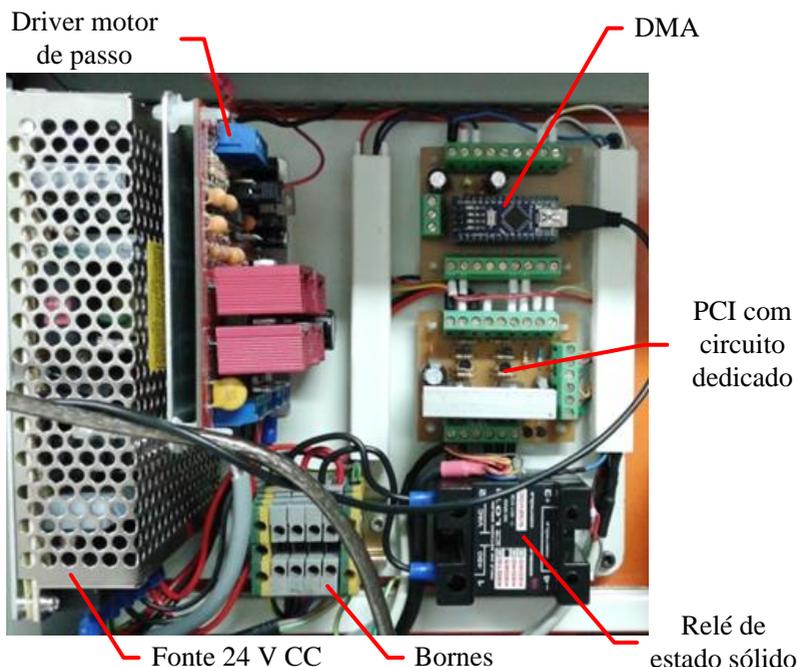
No controle de velocidade do ventilador auxiliar empregou-se um transistor bipolar NPN, modelo BC337. A alimentação é feita pela fonte de 24 V. Esta variação da vazão de ar fornecida pelo ventilador é restrita ao ventilador auxiliar. O ventilador de resfriamento (montado junto ao dissipador) é alimentado continuamente enquanto o sistema de impressão 3D opera.

Todos os componentes associados ao processo de impressão 3D são gerenciados pelo DMA, com exceção do motor de passo do sistema de alimentação de filamento, este é comandado diretamente pela placa controladora de movimento. No entanto, as saídas e entradas do DMA nem sempre são compatíveis com os elementos conectados a elas. Esta

interligação é realizada por uma placa de circuito impresso (PCI) desenvolvida especificamente para esta configuração eletroeletrônica.

Nesta PCI, com circuito dedicado, estão todos os transistores citados anteriormente, bem como as conexões de entrada dos transdutores de temperatura antes do sinal destes chegarem ao DMA. Esta placa e os demais elementos citados são mostrados na Figura 24, que expõem sua montagem no equipamento.

Figura 24 – Montagem física da eletrônica de processo.



Fonte: Próprio autor.

A montagem física da eletrônica de processo encontra-se concentrada em uma parte específica do gabinete elétrico. Desta forma é possível remover todos os elementos associados ao processo de forma simplificada. Assim é possível, caso o equipamento sofra uma readequação, a hospedagem de outro processo produtivo.

Embora o DMA encontre-se localizado junto à eletroeletrônica do processo, ele pode ser considerado como parte integrante do

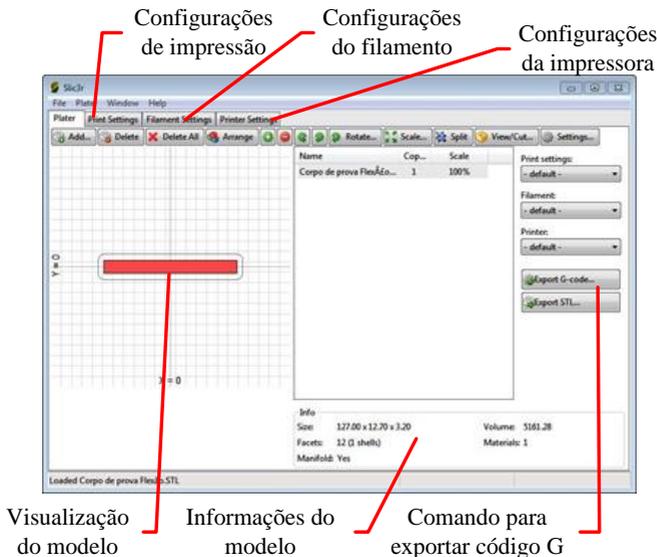
equipamento. Ele é um item fundamental para a flexibilidade de aplicação do posicionador em diferentes processos. No entanto, as funções de movimentação do equipamento são independentes da presença do DMA, pois são executadas por outros elementos.

5.2 SOFTWARE DE PROCESSO

O *software* de processo compreende o programa CAM no qual o modelo computadorizado da peça é empregado para definir as sequências de fabricação. Sua responsabilidade é utilizar as informações do modelo para gerar as ações de movimentação e operações realizadas pelo equipamento.

Dentre as opções disponíveis a escolha recaiu sobre o *software* Slic3r, versão 1.1.7. Trata-se de um gerador de código G *open source* desenvolvido para impressoras 3D por Ranellucci (2014). Os critérios que favoreceram sua seleção foram à disponibilidade (não requer uso de licença paga) e a variedade de parâmetros configuráveis. A tela inicial do *software* Slic3r é mostrada na Figura 25.

Figura 25 – *Software* CAM para uso em impressão 3D.



Fonte: Próprio autor.

6 RESULTADOS OBTIDOS

O presente capítulo aborda os resultados obtidos no decorrer desta dissertação de mestrados. Estes resultados são avaliados com o intuito de obter os pontos negativos e positivos, bem como os aspectos esperados ou não.

6.1 INTEGRAÇÃO ELETROELETRÔNICA

A integração eletroeletrônica define a capacidade do equipamento de funcionar adequadamente, sob o aspecto elétrico e eletrônico. Esta integração, se considerado apenas os elementos simples, depende basicamente da compatibilidade entre os níveis de tensão e corrente exigidos. No entanto, alguns elementos são mais específicos e possuem particularidades. Os itens mais expressivos para esta integração eletroeletrônica são avaliados a seguir:

6.1.1 Placa controladora de movimento

Dentre os componentes presentes no gabinete elétrico, a placa controladora de movimentação é o item de maior particularidade. Difere dos sistemas CNC até então utilizados no LMP-LASER, cujo PC utilizava uma porta paralela para envio dos sinais.

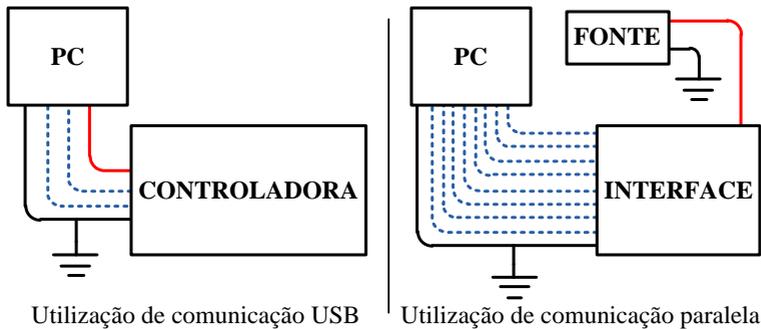
A placa controladora GX-MAX utiliza uma comunicação USB 2.0 que oferece uma velocidade teórica de 60 MB/s. A comunicação paralela por sua vez, atua com três MB/s. O cabo de comunicação USB também oferece a possibilidade de alimentar a placa controladora com 5 V, ao passo que a comunicação paralela exige uma fonte externa tendo em vista que somente conduz sinais lógicos com baixa capacidade de corrente. A Figura 26 ilustra esquematicamente esta diferença de utilização entre a controladora GX-MAX e uma placa de interface convencional.

Dentre os aspectos positivos de utilização (comparado com uma interface convencional) a GX-MAX oferece maior número de I/O. As 10 saídas (além das 12 exclusivas para os eixos) e 12 entradas garantem uma expansão considerável de ligações. O uso de interfaces convencionais limita-se a 12 saídas (incluído os eixos) e 5 entradas.

Um das alternativas para expansão de I/O é a utilização de uma segunda porta de comunicação paralela. Esta estratégia apresenta o emprego de duas interfaces convencionais como visto em Cherem et al. (2010). Esta proposta, em comparação com o uso da controladora GX-

MAX, apresenta desvantagens como o aumento no número de ligações e a necessidade de um PC com duas portas paralelas.

Figura 26 – Ligação entre PC e controlada, PC e interface.



Fonte: Próprio autor.

Uma característica particular da placa controladora são as saídas empregadas no acionamento dos eixos que utilizam sinais diferenciais. Nelas o comando é conduzido por dois canais distintos, a tensão entre os dois corresponde à tensão de acionamento da entrada do *driver*. Diferentemente de placas de interface simplificadas, onde o comando é geralmente enviado por um único canal aos *drivers*, esta característica confere maior imunidade a ruídos eletromagnéticos.

No entanto, aspectos negativos também são associados ao uso da placa controladora utilizada no equipamento. Dentre os inconvenientes lista-se principalmente o custo de aquisição se comparado ao sistema convencional. Em alguns casos uma placa de interface para comunicação paralela simples pode possuir valor de 10 a 15 vezes menor que uma controladora sofisticada.

A diferença de custo entre uma placa controladora e uma placa convencional de interface atribui-se principalmente a necessidade de processamento extra. Como a geração de sinais elétricos passa a ser responsabilidade da placa controladora e não mais da saída paralela do PC, este sistema exigirá um microcontrolador embarcado.

Além dos aspectos econômicos, um limitante técnico também foi encontrado na aplicação da placa controladora GX-MAX. Este diz respeito à não execução de uma função de segurança outrora encontrada nas interfaces de comunicação paralela convencionais.

Uma configuração nativa do *software* CNC permite atribuir a uma saída, um sinal com forma de onda quadrada e frequência constante de 12,5 kHz. Este sinal (conhecido como *Charge pump*) é emitido somente quando o *software* CNC está funcionando corretamente. Com uma eletrônica adequada é possível utilizar este sinal como parte do sistema de segurança que habilita o equipamento. Isto por que o *Charge pump* oferece uma possibilidade do *software* CNC desativar o equipamento

Na placa controladora utilizada não foi possível configurar esta função de forma satisfatória. Apesar do *software* virtualmente permitir a atribuição de uma saída como *Charge pump*, não havia a existência de um sinal correspondente em termos de *hardware*. Sem o sinal de onda quadrada (ou qualquer outra mudança de estado) na saída *Charge pump* da placa controladora esta função simplesmente não atua. Numa consulta ao fabricante, o mesmo afirmou que o produto atender tal função. Contudo nenhuma das tentativas de configuração do exemplar disponível obteve êxito na utilização do *Charge pump*.

Como alternativa ao *Charge pump* convencional adotou-se o uso de outro método de intertravamento. Uma lógica foi implementada para interligar o *software* CNC com a controladora. Utilizando os recursos de programação nativos atribui-se o estado de uma saída da placa controladora ao estado do botão virtual “*Reset*”. Esta saída foi conectada a um dos relés presentes no circuito de intertravamento. Assim, ao entrar em um estado de emergência, o *software* muda o estado indicado em “*Reset*”, por consequência, atua sobre o intertravamento promovendo a parada do equipamento.

6.1.2 Funcionamento do DMA

Para avaliar o funcionamento do Dispositivo Microcontrolado Auxiliar foram consideradas as funções por ele executadas. Foram avaliados os seguintes aspectos durante a utilização do DMA:

- a) facilidade para estabelecer comunicação;
- b) estabilidade da comunicação;
- c) execução dos comandos enviados;
- d) desempenho do controle PID.

O estabelecimento da comunicação entre o PC e o DMA depende da interligação física e digital das partes envolvidas. Em termos físicos a comunicação é executada pela utilização do cabo USB. No meio digital os parâmetros de configuração introduzidos no *software* CNC é que determinam o sucesso da comunicação.

A estabilidade desta comunicação depende da integridade da interligação física por cabo. Além disso, a transferência de dados entre DMA e o *software* CNC também deve permanecer constante. Uma vez conectado ao PC e com o *software* CNC devidamente configurado a comunicação seria automaticamente estabelecida com o DMA. No entanto, foram identificadas duas situações onde a estabilidade da comunicação foi interrompida. A primeira ocorre após as reinicializações do PC e a segunda durante a utilização do *software* CNC.

As reinicializações, sejam elas intencionais ou a pedido do próprio sistema operacional, interrompem a comunicação. Esta interrupção cessa a troca de dados entre PC e DMA. Na segunda situação a interrupção ocorre durante a operação, já com o *software* CNC ativo, ou seja, mesmo após uma comunicação inicial bem sucedida com o DMA.

Para ambos os casos os efeitos são identificados tanto no funcionamento do *software* CNC quanto no DMA. As informações sobre o processo, expostas nas telas CNC personalizadas deixam de ser atualizadas. O DMA tem suas saídas desativadas por uma função em sua programação que detecta a interrupção da comunicação. Assim todas as ações de processo atreladas ao DMA são canceladas.

A perda da estabilidade na segunda situação é tida como uma falha grave do sistema. A duração desta interrupção pode provocar o colapso do processo uma vez que suas condições não são mais controladas. Esta situação foi presenciada duas vezes durante uma utilização total de aproximadamente 120 horas (segundo as estatísticas de manutenção do próprio *software* CNC).

Devido à baixa taxa de ocorrências não foi possível estabelecer um padrão de comportamento da segunda situação. As causas aceitáveis para este erro podem ser atribuídas à interferência durante a comunicação USB. Instabilidades de processamento do próprio *software* CNC ou do sistema operacional também podem ser relevantes.

Para reestabelecer a comunicação em ambos os casos é necessário reaplicar os valores da comunicação entre DMA e PC. Este processo é feito através de uma janela de configuração no *software* CNC. Nela é necessário conferir os valores exibidos e aplicar as configurações. Após o restabelecimento da comunicação o funcionamento do DMA retorna ao normal.

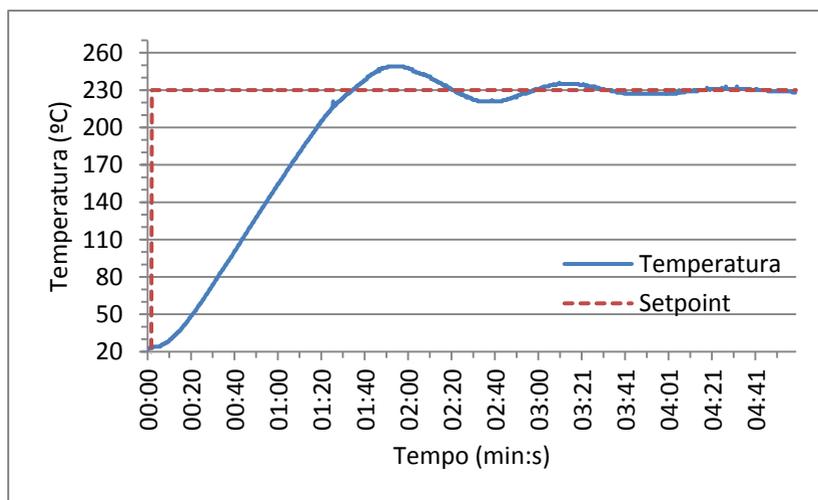
Os comandos enviados ao DMA podem ser processados de forma direta ou indireta. Os comandos ditos diretos são aqueles no qual a informação oriunda do *software* CNC é um valor diretamente enviado a

uma saída do DMA. Já os comandos indiretos são aqueles que precisam de alguma conversão até chegar ao seu destino final. São exemplos de indiretos os parâmetros de temperatura usados no controle PID ou em saídas PWM. Diferentemente dos diretos, os comandos indiretos sofrem um processamento maior dentro do DMA, sendo assim mais susceptíveis a erros de programação e execução. Ambos os comandos, diretos e indiretos, foram executados pelo DMA de forma esperada.

Para averiguar o desempenho do controle PID, a comunicação com o DMA foi transferida para um programa supervisorio *open source*, disponibilizado em ScadaBR (2014). O programa supervisorio foi configurado para determinar os valores alvo (*setpoint*) das temperaturas e coletar as informações fornecidas pelos transdutores.

A Figura 27 mostra o gráfico de resposta da temperatura do bico de extrusão em uma malha fechada PID, onde dois sinais podem ser observados. O *setpoint* é caracterizado por uma linha que muda de valor abruptamente, no início do ensaio seu valor é zero, quando o operador insere o novo valor a ser atingindo, este muda imediatamente. A segunda curva corresponde ao valor real da temperatura coletada pelo transdutor localizado no interior do bloco de aquecimento. O controle basicamente procura igualar a resposta do transdutor com o valor estabelecido no *setpoint*.

Figura 27 – Controle de temperatura do bico extrusor.



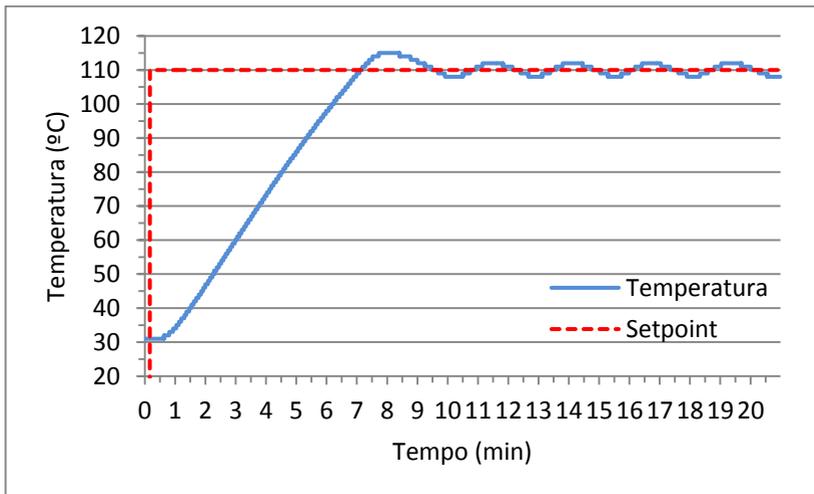
Fonte: Próprio autor.

No início do ensaio o sistema encontra-se a temperatura ambiente, próximo aos 25 °C. Após o *setpoint* ser alterado para o valor de 230 °C, o controle PID atua provocando a elevação de temperatura medida. Com 2 minutos ocorre o ponto máximo da resposta que atinge 249 °C ultrapassando o valor de *setpoint*. Esta extrapolação (*overshoot*) não é necessariamente indesejada, pois sistemas com baixo *overshoot* podem ter uma resposta lenta.

Após 3 minutos o sistema já apresenta um amortecimento considerável. A resposta do sistema após este ponto encontra-se entre um valor mínimo de 227 °C e máximo de 233 °C. Nestas condições, com *setpoint* de 230 °C, o erro de atuação do controle PID está situado na faixa de 2,6 %.

A mesma abordagem foi utilizada para obter a resposta do sistema de controle em malha fechada a mesa de deposição (Figura 28). O gráfico é similar ao anterior, no entanto, seus valores e comportamento são diferentes. O valor de *setpoint* foi estabelecido em 110 °C. A escala de tempo possui um intervalo maior, isto se deve ao fato da mesa de deposição apresentar um comportamento de aquecimento lento.

Figura 28 – Controle de temperatura da mesa de deposição.



No ensaio apresentado na Figura 28 a temperatura inicial da mesa foi de aproximadamente 30 °C. Logo após inicia-se a ação do controle PID que provoca a elevação dos valores até o valor máximo (*overshoot*) de 115 °C aos 8 minutos. A partir dos 11 minutos o sistema passou a apresentar um comportamento oscilatório constante, situado entre 108 e 112 °C. Considerando o *setpoint* de 110 °C, o erro de controle sobre a temperatura da mesa de deposição está situado na faixa de 3,6 %.

O transdutor de temperatura encontra-se situado no centro da mesa de deposição. Um orifício na base aquecida permite seu contato com a superfície inferior do vidro. Não foram incluídas compensações no intuito de obter-se a temperatura na superfície na qual ocorre a deposição do material termoplástico. Devido à utilização de um único transdutor, a temperatura informada corresponde ao valor obtido no local de medição e não a um valor médio da superfície.

Os valores utilizados no controle PID foram baseados em modelos teóricos, obtidos a partir da resposta do sistema em malha aberta. Devido às simplificações do modelo teórico e as influências externas, o resultado obtido teoricamente pode apresentar discrepância em relação à aplicação real. O comportamento do sistema de controle de temperatura, em ambos os casos, pode ser melhorado pelo refinamento dos parâmetros utilizados. No entanto, estes aspectos de sintonização dos parâmetros não foram abordados. Considerou-se que os resultados encontrados até então foram suficientes para comprovar a capacidade do DMA de executar o controle PID em malha fechada.

Com base no período de utilização e nas condições empregadas o DMA apresentou resultados esperados. Os requisitos de acionar saídas, controlar variáveis e fornecer os valores coletados em transdutores foram atendidos. O uso do DMA permitiu expandir o desempenho do equipamento, comprovando que uma plataforma microcontrolada *open source* pode ser utilizada para solucionar tarefas de automação, como defendido por Pearce (2014b).

6.2 INTEGRAÇÃO DE *SOFTWARES* CAD-CAM-CNC

A integração entre os *softwares* que são utilizados possui importância vital para a utilização do equipamento. Sem a compatibilidade entre as sucessivas etapas pela qual o modelo passa, desde o conceito até a fabricação, seria impossível obter um equipamento funcional.

O conceito de integração entre CAD-CAM-CNC é uma das limitações encontradas na manufatura atual. Como os fabricantes de

CNC podem utilizar diferentes versões de código G, muitas vezes existem dificuldades em empregar certos *softwares* nesta sequência.

Os resultados obtidos após a integração dos *softwares* utilizados no equipamento mostram que, inevitavelmente, foi necessário promover determinadas modificações/personalizações. No entanto, estas ações apresentam diferentes graus de aprofundamento, conforme a função desempenhada pelo *software*.

Na etapa de CAD o critério de compatibilidade basicamente recai sobre a capacidade de exportar o modelo para um formato de arquivo específico. Neste caso o arquivo deve ser do tipo *STereoLithography* (definido pela extensão stl), compatível com exigência do *software* CAM utilizado. Embora opcional, a possibilidade de modificar a resolução de detalhes do modelo torna-se interessante. Modelos com geometrias complexas e muito detalhadas tendem a exigir maior poder de processamento, podendo tornar sua manipulação digital muito lenta.

A inserção do *software* CAM no contexto depende, obviamente, da sua vocação inicial. As soluções concebidas para o processo de impressão 3D apresentam a vantagem de já incluírem em sua programação boa parte das funções utilizadas para este fim. Para traduzir as informações do modelo em códigos de máquina é utilizado um elemento do *software* chamado pós-processador.

O *software* CAM utilizado (apresentado na secção 5.2) já conta com um pós-processador que permite gerar um código G compatível com as funções utilizadas na maioria das impressoras *open source*. Este código G, disponível em RepRap (2014b), inclui tanto os comandos básicos, quanto as funções específicas para o processo de impressão 3D. Por estes motivos a adequação do *software* CAM foi consideravelmente superficial.

A integração do sistema de impressão 3D ao posicionador cartesiano dependeu fortemente da configuração do *software* CNC. Esta adequação permitiu executar as ações necessárias ao processo. Os principais exemplos de ações são o controle de temperatura e a movimentação do filamento.

O controle de temperatura fica a cargo do DMA, como descrito mais detalhadamente na secção 6.1.2. No entanto, é necessário que o valor de temperatura desejado seja transferido do código G para o DMA. Esta variável do processo, assim como os demais comandos executados pelo DMA, é transferida pela interpretação das funções M.

A integração do *software* CNC consiste em descrever as funções M que estarão presentes no código G. Esta ação é possibilitada por um

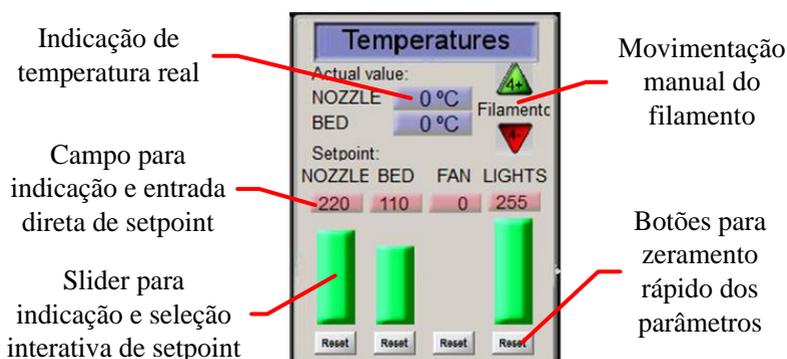
recurso do próprio *software*, no qual um arquivo de programação permite definir como uma função é interpretada.

Por exemplo, quando uma linha contendo “M104 P230” é encontrada, o CNC procura um arquivo com a denominação M104. Neste arquivo está definido que o valor que acompanha a letra P, no caso 230, deve ser enviado para um determinado endereço. Este endereço é uma variável de armazenamento dentro do DMA que corresponde ao valor da temperatura do bico de extrusão. Isto comprova que programação do *software* CNC pode expandir o desempenho do equipamento (devido às funcionalidades incorporadas pela programação), assim como defendido por Asato et al. (2002).

O controle de movimentação do filamento depende de outra estratégia de integração. O *software* CAM define o filamento como um quarto eixo do equipamento. Assim, foi necessário conectar o extrusor de filamento diretamente à placa controladora de movimento, assim como ocorre com os eixos de movimentação.

A adequação do *software* CNC ainda inclui a modificação da interface com o operador. Esta ação, permitida pelo *software* de personalização de telas (descrito na seção 4.1.4), assegura a visualização dos parâmetros de processo. A Figura 29 mostra uma modificação introduzida no *software* CNC para permitir a visualização e manipulação dos recursos do equipamento, visando sua aplicação no processo de impressão 3D.

Figura 29 – Tela personalizada para o uso em impressão 3D.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros relacionados ao processo que foram programados para serem exibidos no *software* CNC foram importantes para a interação com o usuário. Eles forneceram a informação na tela principal, que é mais utilizada durante a execução do processo. Esta característica dispensa a necessidade do usuário alternar constantemente entre visualizações para a busca das informações. Além disto, também é possível alterar os dados com o cursor do *mouse* ou nos campos de entrada do *setpoint*, dispensando a digitação por extenso de códigos G específicos.

O processo de integração dos *softwares* envolvidos apresenta uma série de fatores que dificultam sua realização pelo usuário final. Cada aplicação tende a exigir modificações específicas para permitir o uso de um determinado *software* ou mesmo de um determinado equipamento CNC. Este problema ainda pode ser agravado quando os *softwares* proprietários inflexíveis são utilizados.

Em virtude das dificuldades que a integração de *software* CAD-CAM-CNC pode gerar, reconheceu-se a necessidade de evolução neste aspecto. O uso de novas estratégias de transferência de dados padronizadas possibilitaria um aumento de significativo da compatibilidade entre *softwares* e equipamentos, assim como concluiu Minhat et al. (2009).

6.3 CAPACIDADE DE REALIZAÇÃO DO PROCESSO

Com a integração dos *softwares* envolvidos foi possível estabelecer atividades práticas de impressão 3D para verificar a capacidade do equipamento e das soluções de automação propostas.

Os primeiros passos foram a verificação da movimentação controlada do filamento, comparando o comando inserido no *software* CNC com a real movimentação ocorrida no filamento. Outra etapa necessária foi verificação de funcionamento dos elementos que promovem os pontos de aquecimento presentes no equipamento.

Inicialmente o extrusor foi abastecido por meio de uma operação manual na qual o filamento é inserido entre a roda de atrito e o rolamento. O filamento utilizado inicialmente foi de PLA, de coloração verde e diâmetro de 3 mm. Por um comando específico no CNC este filamento foi avançado até o ponto de aquecimento para aguardar o início do processo.

O controle de avanço deste filamento pela roda de atrito permite definir a quantidade de material que é depositada em cada região. Para transpor distâncias sem que ocorra a deposição de material, o filamento

é retraído por um valor preestabelecido de comprimento e a uma determinada velocidade. Desta forma a retração do filamento permite suspender a extrusão do material nos pontos desejados.

Para verificar a capacidade de extrusão do material pelo bico extrusor e sua aderência sobre a mesa de deposição foi utilizado um modelo simples de peça. Este modelo é composto por um retângulo com 40 x 30 mm com uma elipse central, cujo objetivo é forçar a movimentação simultânea em dois eixos. A espessura do modelo é tal que permitiu a execução de apenas uma camada com 0,3 mm de espessura. O desenvolvimento e a utilização desta geometria deram-se pela escassez de padrões de teste para impressão camada única.

Na etapa inicial o modelo foi importado para a etapa CAM, no qual foram utilizados os parâmetros de processo sugeridos (*default*) pelo *software* e as recomendações do fabricante Filamentos 3D Brasil. O código G originado foi importado para o *software* CNC para execução do programa peça.

O primeiro resultado mostrou que foi possível promover a extrusão e adesão parcial do material à superfície da mesa. No entanto, a continuidade do filete depositado não foi completa, apresentando áreas com vazios (ensaio nº 1 da Figura 30). Pela observação do teste, foi possível notar uma resistência a movimentação do filamento por parte da roda de atrito. Realizou-se então a elevação gradativa da temperatura do bico de 190 °C até 215 °C a fim de tornar o material mais fluídico. O melhor aspecto visual foi obtido no ensaio número 4 (de um total de 6), apresentado na Figura 30, utilizando-se temperatura de 205 °C.

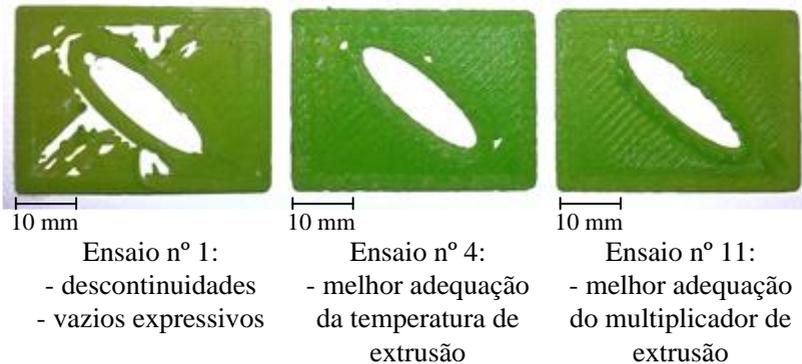
Neste ensaio foi possível notar melhoria nas condições gerais de fabricação do modelo. A continuidade da deposição permitiu o fechamento quase total da área a ser preenchida. Os vazios, antes bem aparentes, ficaram concentrados ao final do percurso realizado para o preenchimento interno.

Contudo, pequenos vazios situados ao longo das intercepções do contorno externo e do preenchimento indicavam uma falta pontual de material. A correção destes detalhes foi realizada pela modificação do multiplicador de extrusão (*extrusion multiplier*). Este parâmetro calibra a quantidade de material extrudado. Devido à variação dimensional do próprio filamento, o comprimento extrudado não corresponde ao volume esperado de material.

Nos ensaios seguintes (do número 7 ao 12) foi variado de 1,01 a 1,06 o multiplicador de extrusão. O ensaio número 11 (Figura 30) alcançou melhor resultado estético com relação à quantidade de material

depositado. Nesta condição o multiplicado de extrusão utilizado possui valor de 1,05.

Figura 30 – Evolução ao longo dos ensaios com PLA.



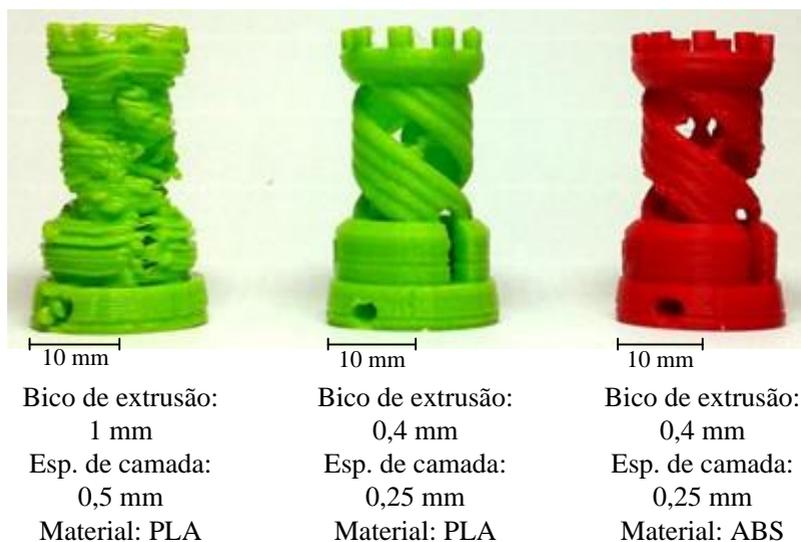
Fonte: Próprio autor.

Para averiguar a capacidade do equipamento de executar modelos tridimensionais foram produzidas peças com tamanhos e geometrias variadas. Para exibir os melhores resultados obtidos após experimentação dos parâmetros de processo, foi escolhido um elemento comum, similar a uma peça utilizada em jogos de xadrez. Esta peça de aspecto cilíndrico possui altura de 35 mm e diâmetro de 20 mm.

A construção de peças contendo sucessivas camadas depositadas também contou com a variação do diâmetro do orifício de extrusão. Foi inicialmente utilizado um bico com diâmetro de 1 mm, a fim de verificar de forma mais rápida e expressiva o mecanismo de deposição. O resultado deste ensaio, apresentado à esquerda da Figura 31, mostra um modelo de acabamento menos detalhado (devido às camadas de 0,5 mm).

No centro da Figura 31 também é apresentado o mesmo modelo, mas obtido a partir de um bico com orifício de 0,4 mm. O nível de detalhes que podem ser executados aumentou, assim como a melhoria da acomodação entre as camadas sucessivas. Este modelo conta com uma espessura de camada de 0,25 mm. Ao seu lado encontra-se outra peça com as mesmas características, no entanto fabricada a partir de ABS de coloração vermelha. As etapas do processo de fabricação de outra peça podem ser observadas no Apêndice C.

Figura 31 – Peças com parâmetros e materiais variados.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez estabelecida a parametrização do *software* CNC, o parâmetros de entrada do processo de impressão 3D podem ser variados conforme a necessidade estabelecida por cada tipo de material ou pela modificação sistemática das variáveis para estudar sua influência sobre o processo.

Além dos exemplares produzidos durante as fases iniciais de utilização do equipamento, outras peças também foram produzidas. Em uma colaboração com um mestrando também do POSMEC, foram fabricados seis corpos de prova. Estas amostras foram destinadas a ensaios relacionados às propriedades mecânicas. Seu objetivo foi fornecer mais dados ao mestrando colaborador, no intuito prover mais uma fonte para comparação de resultados. Em contrapartida, foram cedidos resultados relativos às amostras fabricadas.

O modelo de corpo de prova (Figura 32) utilizado possui comprimento de 127 mm, largura de 12,7 mm e espessura de 3,2 mm. A fabricação destas amostras foi dividida em dois grupos, conforme os parâmetros de processo. Devido ao fato dos parâmetros de processo serem alvo de estudo do mestrando colaborador, o autor desta

dissertação de mestrado reserva o direito de não divulgá-los explicitamente. Resume-se que as amostras do grupo “A” são fabricadas com velocidades de deposição “lentas”, quando comparadas aos valores padrão utilizados no *software* CAM Slic3r. O grupo “B” de amostras apresenta velocidades de deposição três vezes mais elevadas e espessura de camadas 40 % maior.

Figura 32 – Corpo de prova fabricado no equipamento.



Fonte: Próprio autor.

Todas as amostras foram fabricadas a partir de PLA de cor verde, fornecido pelo mestrando colaborador. A disposição do modelo no momento da fabricação definiu o comprimento da amostra ao longo do eixo X e a largura ao longo do eixo Y. Conseqüentemente, a espessura da amostra foi resultado da movimentação incremental do eixo Z.

Após o fornecimento das amostras, o mestrando colaborador disponibilizou os resultados dimensionais obtidos, apresentados na Tabela 1. Cada grupo conta com três peças, estas são acompanhadas por seus respectivos valores de comprimento, largura e espessura.

Considerando que o número de amostras de cada grupo é pequeno é precipitado estabelecer relações absolutas entre estes resultados e os parâmetros utilizados na fabricação. No entanto, para as amostras analisadas, algumas relações podem ser destacadas.

Os valores de comprimento estão abaixo do valor de referência para todas as amostras. Contudo, o mesmo não se repete para a largura do corpo de prova, dimensão sempre acima do valor de referência. Esta divergência não poderia ser atribuída a uma retração sistemática do material resfriado, pois o efeito nas duas dimensões seria análogo. Como as amostras possuem a mesma orientação de posicionamento durante a fabricação, não é possível afirmar se os comportamentos dos eixos X e Y influenciaram nas variações dimensionais apresentadas.

Tabela 1 – Valores dimensionais das amostras produzidas.

Grupo	Nº Peça	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
A	1	126,58	13,05	3,17
A	2	126,69	13,00	2,98
A	3	126,46	12,85	3,09
B	1	126,49	13,14	3,10
B	2	126,85	13,03	3,20
B	3	126,62	13,13	3,17

Fonte: Próprio autor.

A partir destes dados foi possível determinar os valores médios e os desvios padrões dos dois grupos de amostras, ambos apresentados na Tabela 2. Os valores médios dos grupos “A” e “B” seguem o mesmo comportamento. As dimensões correspondentes à largura são maiores que o valor alvo, porém os valores médios de comprimento e espessura são inferiores a referência.

Tabela 2 – Médias e desvios padrões das amostras.

	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Valor de referência	127,00	12,70	3,20
Média (Grupo A)	126,58	12,97	3,08
Média (Grupo B)	126,65	13,10	3,16
Desvio padrão (Grupo A)	0,12	0,10	0,10
Desvio padrão (Grupo B)	0,18	0,06	0,05

Fonte: Próprio autor.

Os desvios padrões do grupo “A” estão situados próximos uns aos outros, sendo que o comprimento apresenta a maior dispersão destes valores. A variação dos parâmetros de processo que difere as amostras

do grupo B de seu antecessor provocou em geral a queda de valor dos desvios padrões. No entanto, o desvio padrão do comprimento no grupo “B” passou de 0,12 para 0,18 mm. Essa relação sugere que o eixo X (ou montagem dos componentes desta direção) sofre uma influência negativa associada ao aumento da velocidade de deposição.

7 CONCLUSÕES

A automação é um dos elementos essenciais para a melhoria dos processos produtivos. Graças a ela é possível estabelecer novos patamares quando se busca a melhoria tanto do equipamento, quanto do resultado final. Contudo a automação exige o emprego de diferentes áreas de conhecimento, o que pode dificultar a integração das soluções encontradas.

As soluções de automação desenvolvidas para impressão 3D permitiram a execução do processo produtivo, por meio do atendimento das funções necessárias. O extrusor de filamento possibilitou a movimentação do material termoplástico de forma controlada, assegurando a entrega ao dispositivo seguinte.

O cabeçote extrusor atendeu as funções básicas que podem lhe ser atribuídas, como por exemplo, garantir o fluxo do filamento até o bico de extrusão. A possibilidade de aquecer o material termoplástico dentro do intervalo de temperatura especificado para o mesmo está atrelada ao controle de temperatura empregado. Esta capacidade de controle também se estende a mesa de deposição, cujo sistema de aquecimento alcançou o valor de temperatura esperado.

Os ensaios realizados com o equipamento mostraram que as estas soluções de automação são capazes de atender a execução do processo de impressão 3D. Dentro das limitações inerentes do processo foi possível obter peças com geometrias variadas e com diferentes materiais.

Os *softwares* selecionados e utilizados, sobretudo para as etapas de CAM e CNC, permitiram a obtenção de peças, gerada por CAD, pelo processo de impressão 3D. Este resultado foi alcançado devido à compatibilidade existente ao longo da cadeia de *softwares* e à integração existente entre o sistema de impressão 3D e o posicionador cartesiano.

Avaliando-se a integração sob o aspecto eletroeletrônico concluiu-se que foi possível executar movimentações controladas, permitindo o uso do PC para obtenção de uma arquitetura CNC aberta. A funcionalidade da integração eletroeletrônica também foi observada na interação entre o posicionador e o sistema de impressão 3D. Isto permite que os parâmetros do processo (por exemplo, temperatura do bico extrusor) sejam reconhecidos e executados fisicamente.

Tal integração do sistema de impressão 3D com o posicionador depende também da utilização do DMA. A versatilidade proporcionada pela programação orientada ao uso permitiu definir as suas funções. Por

meio do DMA foi possível implementar a leitura de transdutores, o processamento de informações e ações de controle em malha fechada.

Considerando que a programação, tanto do *software* CNC quanto do DMA podem ser modificadas pelo usuário final, suas funções podem ser alteradas ou expandidas tornando o equipamento uma plataforma modular para uso em outros processos.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Muitos aspectos complementares ainda podem ser abordados dentro do universo dos elementos envolvidos. Estes aspectos podem ser relacionados exclusivamente com o equipamento, com o processo de impressão 3D ou mesmo com a continuidade de estudos sobre aspectos de integração entre eles.

Em relação ao equipamento sugere-se o aprofundamento do seu comportamento mecânico, levantando-se, por exemplo, as características associadas com a velocidade, aceleração e esforços sobre os eixos de movimentação. Estes estudos permitiriam conhecer a dinâmica do equipamento e obter o máximo desempenho dos motores.

A impressão 3D apresenta uma série parâmetros de processo que atuam como fatores de influência sobre o resultado final. Muitos destes fatores estão relacionados ao controle de temperatura exigido. Uma sugestão é a calibração rigorosa e o refinamento dos parâmetros de controle em malha fechada para tornar o processo mais confiável.

A integração entre equipamento e processo apresenta uma relação forte com os *softwares* utilizados. A etapa CAM é determinante para o comportamento do processo durante sua execução. Nesta dissertação de mestrado, somente um *software* CAM foi utilizado. Uma sugestão de trabalhos futuros é a utilização de outros geradores de código G, buscando melhor eficiência no processamento do modelo e no uso dos recursos de automação presentes no equipamento.

REFERÊNCIAS

AHN, D.; KWEON, J.-H.; KWON, S.; SONG, J.; LEE, S. Representation of surface roughness in fused deposition modeling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 5593–5600, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013609002039>>. Acesso em: 11/6/2013.

ALTINTAS, Y.; VERL, A.; BRECHER, C.; URIARTE, L.; PRITSCHOW, G. Machine tool feed drives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 2, p. 779–796, 2011. CIRP. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850611002125>>. Acesso em: 17/7/2012.

ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 118, p. 385–388, 2001.

APPLIED MOTION. **Hardware Manual STR4 & STR8**. 2012.

ARTSOFT EUA. **Mach3 Controle de CNC. A instalação do software e configuração**. 2010.

ASATO, O. L.; KATO, E. R. R.; INAMASU, R. Y.; PORTO, A. J. V. Analysis of open CNC architecture for machine tools. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 24, n. 3, p. 1–7, 2002.

ATMEL CORPORATION. Atmel Studio. Disponível em: <<http://www.atmel.com/tools/atmelstudio.aspx?tab=overview>>. Acesso em: 5/1/2015.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. DA. **Projeto integrado de produtos. Planejamento, Concepção e Modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.

BEAUREGARD, B. Arduino PID Library. Disponível em: <<http://playground.arduino.cc/Code/PIDLibrary>>. Acesso em: 13/7/2014.

CHEREM, L. P.; BONACURSO, N. G.; GESSER, F. J. Desenvolvimento de uma mesa birrotativa modular para integração com fresadoras CNC de baixo custo visando usinagens de modelos complexos em cinco eixos simultâneos. **Revista Técnico Científica do IFSC**, v. 2, n. 01, p. 24–32, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ifsc.edu.br/index.php/rtc/article/viewFile/962/644>>. .

DIETZ, K. Program MachScreen. Disponível em: <http://www.kd-dietz.com/klausphp/pages/eng/machscreen/description/ms_description.html>. Acesso em: 17/7/2014.

DUBEY, A. K.; YADAVA, V. Laser beam machining - A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 6, p. 609–628, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695507002325>>. Acesso em: 10/8/2012.

FONSECA, A. J. H. **Sistematização do processo de obtenção das especificações de projeto de produtos industriais e sua implementação computacional**, 2000. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78276>>. .

GONÇALVES, J. F. O. **Impressora 3D com LinuxCNC**, 2014. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

IHLENFELDT, S.; EGUIA, J.; OLARRA, A.; et al. Machine tools for large parts. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, p. 731–750, 2013.

JPMZOMETA. Arduino Modbus Slave. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/jpmzometa/arduino-mbrt/arduino-modbus-slave>>. Acesso em: 13/12/2013.

KALATEC AUTOMAÇÃO. **MOTOR DE PASSO KTC-HT23/NEMA 23: Dados dimensionais e curvas de torque x revolução**. 2014a.

KALATEC AUTOMAÇÃO. **Motores: Ligação Paralela e Ligação Série**. 2014b.

KULMAN, C. **Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes**

funcionais., 2006. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www.tede.ufsc.br/teses/PEMC0931.pdf>>. .

LINUXCNC.ORG. LinuxCNC: Software for realtime control. Disponível em: <<http://www.linuxcnc.org/>>. Acesso em: 2/2/2015.

MAKERBOT. MakerBoat Replicator 2X. Disponível em: <<http://store.makerbot.com/replicator2x>>. Acesso em: 16/10/2014.

MARTIN, C. A. **Acionamentos de avanço para máquinas-ferramentas. Notas de Aula.** Florianópolis, .

MINHAT, M.; VYATKIN, V.; XU, X.; WONG, S.; AL-BAYAA, Z. A novel open CNC architecture based on STEP-NC data model and IEC 61499 function blocks. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 3, p. 560–569, 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584508000598>>. Acesso em: 20/9/2013.

NASIM, H.; JAMIL, Y. Diode lasers : From laboratory to industry. **Optics & Laser Technology**, v. 56, p. 211–222, 2014.

NEUGEBAUER, R.; IHLENFELDT, S.; FRIES, U.; WABNER, M.; RAUH, S. New High-Speed Machine Tool Structure by Holistic Mechatronic Systems Design. **Procedia CIRP**, v. 1, p. 307–312, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282711200056X>>. .

NEUGEBAUER, R.; WABNER, M.; RENTZSCH, H.; IHLENFELDT, S. Structure principles of energy efficient machine tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 4, n. 2, p. 136–147, 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175558171100071X>>. Acesso em: 12/8/2013.

NEVEX TECNOLOGIA LTDA. **GX - MAX Manual do Usuário.** 2013.

NEWFANGLED SOLUTIONS. Mach3. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/software/mach3/>>. Acesso em: 17/9/2014a.

NEWFANGLED SOLUTIONS. Screensets. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/software/downloads-updates/screensets/>>. Acesso em: 15/7/2014b.

OKWUDIRE, C.; RODGERS, J. Design and control of a novel hybrid feed drive for high performance and energy efficient machining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, p. 391–394, 2013.

OMIROU, S. L.; BAROUNI, A. K. Integration of new programming capabilities into a CNC milling system. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 21, n. 6, p. 518–527, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584504001012>>. Acesso em: 20/9/2013.

PEARCE, J. M. RepRap for Science - How to Use, Design, and Troubleshoot the Self-Replicating 3-D Printer. **Open-Source Lab**. p.95–162, 2014a. Elsevier.

PEARCE, J. M. Open-Source Microcontrollers for Science: How to Use, Design Automated Equipment With and Troubleshoot. **Open-Source Lab**. p.59–93, 2014b. Elsevier.

PHAM, D. .; GAULT, R. . A comparison of rapid prototyping technologies. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 38, n. 10-11, p. 1257–1287, 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695597001375>>. .

POLABS. **PoKeys Pulse engine documentation**. 2013.

Prusa Mendel (iteration 2). Disponível em: <http://reprap.org/wiki/Prusa_Mendel>. Acesso em: 27/8/2014.

RAMESH, R.; JYOTHIRMAI, S.; LAVANYA, K. Intelligent automation of design and manufacturing in machine tools using an open architecture motion controller. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 32, n. 1, p. 248–259, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612512000982>>. Acesso em: 13/5/2015.

RANELLUCCI, A. Slic3r G-code generator for 3D printers. Disponível em: <<http://slic3r.org/>>. Acesso em: 4/8/2014.

REN, X.; ZHANG, Q.; LIU, K.; LI, H.; ZHOU, J. G. Modeling of pneumatic valve dispenser for printing viscous biomaterials in additive manufacturing. **Rapid Prototyping Journal**, v. 20, n. 6, p. 434–443, 2014. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/RPJ-03-2013-0025>>. .

REPRAP. Welcome to RepRap.org. Disponível em: <<http://reprap.org/wiki/RepRap>>. Acesso em: 1/9/2014a.

REPRAP. G-code. Disponível em: <<http://reprap.org/wiki/G-code>>. Acesso em: 1/9/2014b.

ROMI SA. **Linha Romi D**. Santa Barbara D'oeste, 2013.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Laser Engineered Net Shaping: Manufacturing Technologies. Disponível em: <<http://www.sandia.gov/mst/pdf/LENS.pdf>>. .

SCADABR. ScadaBR; Downloads. Disponível em: <<http://www.scadabr.com.br/?q=node/64>>. Acesso em: 8/10/2014.

SCOTT, C. S. APPARATUS AND METHOD FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL OBJECTS. , 1992. Disponível em: <<http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=5121329A&KC=A&FT=D>>. .

STRATASYS INC. Stratasys: 3D printers. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/3d-printers>>. Acesso em: 14/7/2014.

VOLPATO, N. Os principais processos de prototipagem rápida. **Prototipagem Rápida: Tecnologias e aplicações**. p.272, 2007. Blucher.

XU, X.; LI, Y.; SUN, J.; WANG, S. Research and Development of Open CNC System Based on PC and Motion Controller. **Procedia Engineering**, v. 29, p. 1845–1850, 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705812002342>>. Acesso em: 20/9/2013.

APÊNDICE A – PRIMEIRA CASA DA QUALIDADE

RC: Requisitos do Cliente		Direcionador de melhoria >>>>																					
		↑	↓	↕	↑	↓	↕	↑	↓	↕	↑	↓	↕	↑	↓	↕	↑	↓	↕	↑	↓	↕	
básicos	Custo	3																					
	Confiabilidade		1																				
	Ergonomia		1																				
	Estética	1		1																			
	Padronização			3	3	1	3	1															
	Segurança	1	9	9		3	9	9	9	1	1		3				9	3	3				
	Fabricabilidade	9	1	3	1	1				1	9	3		1	1	1							
	Montabilidade	3	1	1	1					1	3	1											
	Transportabilidade	3	1																				
	específicos	Modularidade	1	1	1	3	1	1	1			3						9	9	3			
		Arquitetura CNC			9			1	1	1	1	1						9	3			3	
		Controle de temperaturas	3	1	3				1						9	9	3			9			9
		Nível de vibração	1											3								1	3
		Quantidade de termoplásticos			1	9									9	9				1	1	9	9
		Resolução	1		3	1								9								3	3
		Tipo de alimentação elétrica											3	3		1	1	9					1
		Tipo de Motorização	3		3	1							3	3			3	1				9	9
		Velocidade	3		3	1							3			3	1				1	3	9
		Unidade	mm ²	adm	RS	mm	adm	adm	adm	adm	Obm	adm	%	mm	N°	°C	°C	V	adm	adm	adm	adm	mm/min
	Grau de importância (req. produto)	32	13	48	25	9	20	22	10	11	38	33	12	21	24	27	39	29	30	26	36	28	
Percentual	6,0	2,4	9,0	4,7	1,7	3,8	4,1	1,9	2,1	7,1	6,2	2,3	3,9	4,5	5,1	7,3	5,4	5,6	4,9	6,8	5,3		
Posição ocupada	6	17	1	12	21	16	14	20	19	3	5	18	15	13	10	2	8	7	11	4	9		

Correlação entre requisitos de cliente e de produto	
Forte	9
Moderado	3
Fraco	1
Inesistente	

Correlação	
++	Post. Forte
+	Post. Fraco
.	Inesistente
-	Neg. Fraco
--	Neg. Forte

Direcionador de melhoria	
↕	não importa a variação do valor
↑	quanto maior o valor melhor
↓	quanto menor o valor melhor

APÊNDICE B – IMAGENS DO EQUIPAMENTO

Figura B1 – Visão traseira do equipamento.



Figura B2 – Visão a partir da lateral direita do equipamento

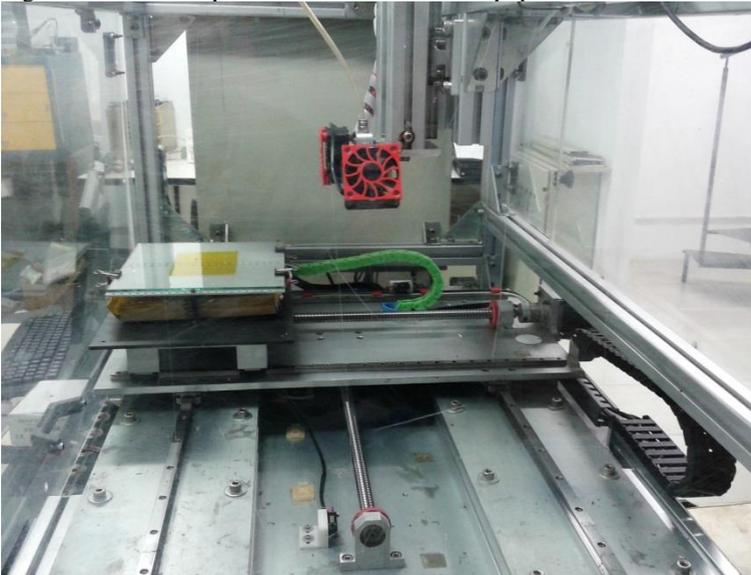


Figura B3 – Mecanismos e acionamentos do eixo Y.



Figura B4 – Cabeçote extrusor localizado na extremidade inferior do eixo Z.

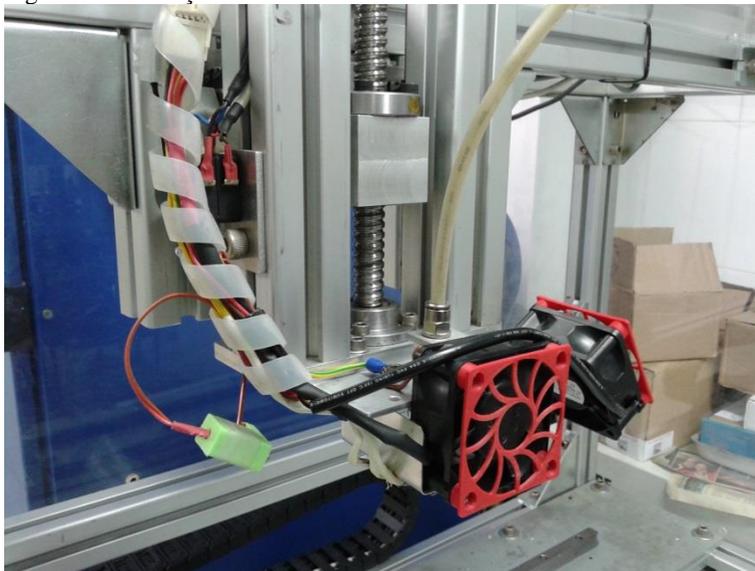
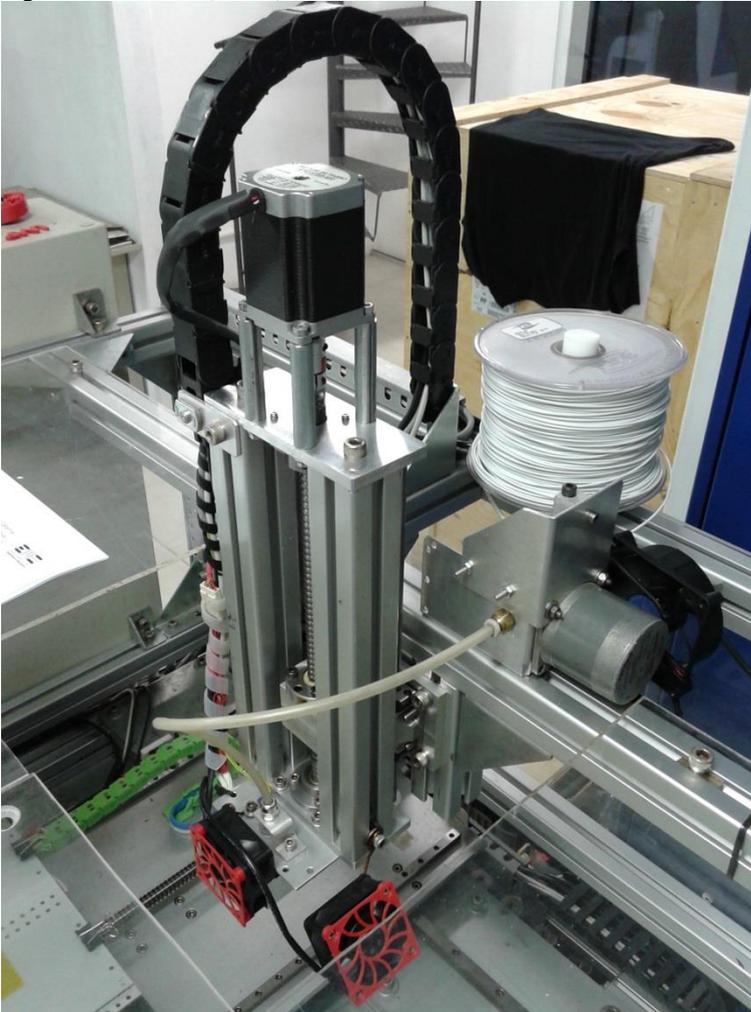


Figura B5 – Eixo Z (centro), extrusor e bobina de filamento (direita).



APÊNDICE C – IMAGENS DO PROCESSO PRODUTIVO

Figura C1 – Etapa de alinhamento da mesa de deposição.



Figura C2 – Uma das amostras impressas pelo equipamento nos testes iniciais.

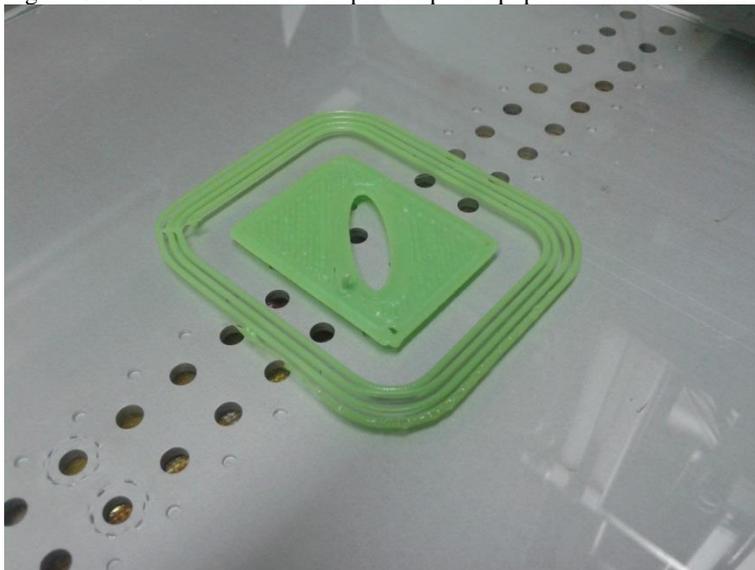


Figura C3 – Início da impressão de uma peça com geometria complexa.

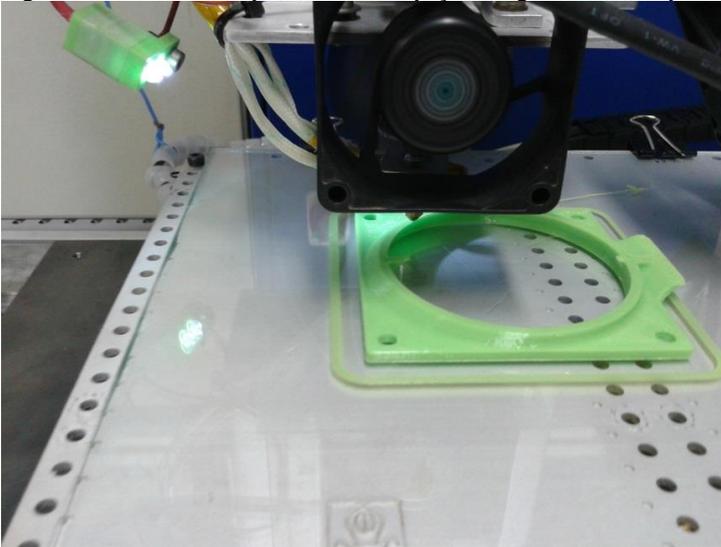


Figura C4 – Estado de fabricação avançado da peça apresentada na figura anterior.

