



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

ARTHUR RAULINO KRETZER

**Implementação
do Controle
de Posição e Avaliação
de Precisão do Eixo
Linear da Base de
Fabricação de uma Máquina
de Manufatura Aditiva**

**Florianópolis - SC
2018**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE
CURSO SUPERIOR DE**

ARTHUR RAULINO KRETZER

**IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE POSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE
PRECISÃO DO EIXO LINEAR DA BASE DE FABRICAÇÃO DE UMA
MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos para obtenção do título de
engenheiro Mecatrônico.

Professor Orientador: Roberto
Alexandre Dias, Dr.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2018.

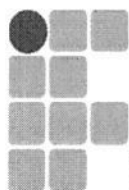
Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Kretzer, Arthur

IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE POSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DO EIXO LINEAR DA BASE DE FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA / Arthur Kretzer ; orientação de Roberto Dias. - Florianópolis, SC, 2018.
50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.

1. Manufatura aditiva. 2. Sinterização seletiva a laser. 3. Fusão seletiva a laser. 4. Controle de Posição. 5. Precisão de eixo linear. I. Dias, Roberto. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **ARTHUR RAULINO KRETZER**, matrícula nº **141004021-6**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE DE POSIÇÃO E AVALIAÇÃO DE PRECISÃO DO EIXO LINEAR DA BASE DE FABRICAÇÃO DE UMA MÁQUINA DE FUSÃO/SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 12 de dezembro de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Roberto Alexandre Dias

AGRADECIMENTOS

À Alkimat Ltda. pelos recursos e oportunidade de trabalho e estudo.

Ao Laboratório de Metrologia e ao Núcleo de Sistemas Embarcados e Distribuídos pelos recursos disponibilizados.

Ao professor André Roberto de Sousa pelas orientações em metrologia.

Ao Roberto Alexandre Dias pela orientação deste trabalho.

Aos meus familiares pelo investimento na minha educação e suporte emocional.

À minha namorada, Marina Dardenne, pelo apoio ao longo de todo este trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) está inserida no contexto da manufatura avançada e da indústria 4.0, áreas que estão recebendo muitos investimentos com o intuito de fomentar diversas inovações industriais que englobam o desenvolvimento de fotônica, semicondutores, energia limpa e materiais leves. No Brasil, a maioria das empresas ainda não utilizam as tecnologias de manufatura avançada. A MA se diferencia dos principais métodos de fabricação, que são os processos de moldagem, subtração, união ou divisão, já que se baseia na adição sucessivas de camadas. Diversas tecnologias de MA foram desenvolvidas. Dentre elas, há a fusão de leito de pó, que possui as categorias de sinterização seletiva a laser (SLS), sinterização direta de metal a laser (DMLS), fusão seletiva a laser (SLM) e fusão por feixe de elétrons (EBM). O presente trabalho propõe a implementação do controle de posição e avaliação da precisão do eixo do leito de pó de uma máquina de SLS/SLM. Os objetivos do trabalho foram alcançados, porém alterações no projeto de máquina são sugeridos para fabricação de peças com requisitos mais elevados. O projeto foi realizado na Empresa Alkimat Tecnologia Ltda., como tema de um trabalho de conclusão de curso.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Sinterização seletiva a laser. Fusão seletiva a laser. Controle de Posição. Precisão de eixo linear.

ABSTRACT

The additive manufacturing (AM) is inserted in the context of advanced manufacturing and industry 4.0, areas that are receiving many investments aiming to foment lots of industrial innovations that includes photonics development, semiconductors, clean energy and light materials. In Brazil there is a different picture since a good portion of Brazilian companies are not using advanced manufacturing technologies. The AM is different from the main manufacturing methods, since it is based in successive layer addition. Many AM technologies were developed. They are classified as: photopolymerization, material extrusion, material jetting, binder jetting, powder bed fusion, laminated object manufacturing and directed energy deposition. Inside powder bed fusion there are the categories of selective laser sintering (SLS), direct metal laser sintering (DMLS), selective laser melting (SLM) and electron beam melting (EBM). This work proposes the implementation of a powder bed position control of a SLS/SLM machine and the evaluation of the position precision obtained. The objectives were achieved, however changes in the machine design are suggested for fabrication of better-quality workpieces. This project was developed at Alkimat Tecnologia Ltda., as an undergraduate project.

Key-words: *Additive Manufacturing. Selective Laser Sintering. Selective Laser Melting. Position Control. Linear axis precision.*

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	7
2.OBJETIVOS.....	9
2.1.Objetivo principal.....	9
2.2.Objetivos específicos	9
3.REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
3.1.Fusão seletiva a laser e sinterização seletiva a laser	10
4.RECURSOS DO PROJETO.....	15
4.1.Movimentação do leito	18
4.2.Servoacionamento	20
4.3.Servodriver	21
4.4.Controlador lógico programável	23
5.DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO.....	26
5.1.Configuração do servodriver	26
5.2.Configuração do CLP	27
5.3.Aparato e Metodologia experimental.....	28
6.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
7.CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS.....	42
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO ELÉTRICO.....	44
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA ESPECIAL DO CLP.....	45
APÊNDICE C – AQUISIÇÕES DOS TRENS DE PULSOS	46
APÊNDICE D – PONTOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS	48

1.INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como “impressão 3D” (VOLPATO, 2017), faz parte das tecnologias inseridas no contexto da manufatura avançada, que engloba o desenvolvimento da fotônica, semicondutores, energia limpa e materiais leves. A manufatura avançada é a vertente americana da indústria 4.0, programa de incentivos à inovação industrial do governo alemão que investe na integração de empresas e universidades para alavancar o crescimento da indústria. Hoje, os três líderes de investimentos em inovação na indústria são Alemanha, China e EUA, que juntos investiram mais de 1 bilhão de dólares em incentivos à inovação nos últimos anos. Para o futuro próximo, somente a China pretende investir mais de 1,2 bilhão de dólares em incentivos no programa de desenvolvimento *Made in China* (MiC), que tem como objetivo consolidar o país como a potência industrial do século XXI através da melhoria da qualidade de seus produtos pela inovação. Já no Brasil o cenário é bastante distante dos países citados, sendo assim, surgem algumas iniciativas como a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) e o Senai-Cimatec, que são esforços para trazer a indústria 4.0 ao cenário empresarial brasileiro (ARBIX, 2017).

Diferentemente dos processos de fabricação principais que trabalham com moldagem, subtração (ou remoção), união ou divisão, a manufatura aditiva trabalha com a adição de camadas sucessivas de material a partir de modelos tridimensionais, os quais podem ser obtidos através de sistemas CAD (*computer aided design*). As aplicações da manufatura aditiva são variadas e abrangem áreas como a automobilística, aeroespacial, de produtos eletrônicos, produtos elétricos e médica. Dentro desse contexto, diversas empresas propuseram métodos de fabricação diferenciados, cada um com suas características de custo, tempo de produção, resolução de camadas e capacidade de trabalhar com materiais metálicos, poliméricos, cerâmicos ou compósitos. Os principais métodos hoje se baseiam nas técnicas de: fotopolimerização em cuba, extrusão de material, jateamento de material, jateamento de aglutinante, fusão de leito de pó, adição de lâminas e deposição com energia direcionada. (VOLPATO, 2017) A fusão de leito de pó é baseada em feixes de energia que fundem seletivamente regiões de um leito de pó, que pode ser metálico, polimérico ou cerâmico. As principais tecnologias que se inserem nesse conceito são a sinterização seletiva a laser (*Selective Laser Sintering - SLS*), sinterização direta de metal a laser (*Direct Metal Laser Sintering - DMLS*), fusão

seletiva a laser (*Selective Laser Melting - SLM*) e fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting - EBM*) (TIWARI, 2013).

Dentro desse contexto, a Alkimat Tecnologia Ltda., que já atua há mais de oito anos no mercado de impressão 3D, é a primeira empresa brasileira a desenvolver uma máquina de SLS e agora está investindo no desenvolvimento da sua primeira máquina de SLM e SLS com fomento da Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP). Além desse investimento, a empresa já recebeu incentivos para inovação tecnológica da FAPESC e também do CNPq.

A empresa cedeu os recursos para realização desse projeto, assim, tem-se como objetivo implementar o controle de posição do eixo do leito de pó e avaliar os resultados obtidos com o controle de posição da máquina de SLS/SLM em desenvolvimento.

2.OBJETIVOS

Os objetivos foram separados em objetivo principal e objetivos específicos.

2.1.Objetivo principal

- a) Configurar um *servodriver*, implementar o controle de posição do eixo da base de fabricação e avaliar o resultado de precisão de posicionamento obtido.

2.2.Objetivos específicos

- a) Programar o controlador lógico programável para controle de posição por pulso e direção;
- b) Fazer as ligações elétricas entre o controlador lógico programável e o *servodriver*;
- c) Configurar o *servodriver* para atender ao requisito de resolução de posicionamento.
- d) Avaliar a precisão de posicionamento do eixo após a implementação do controle.

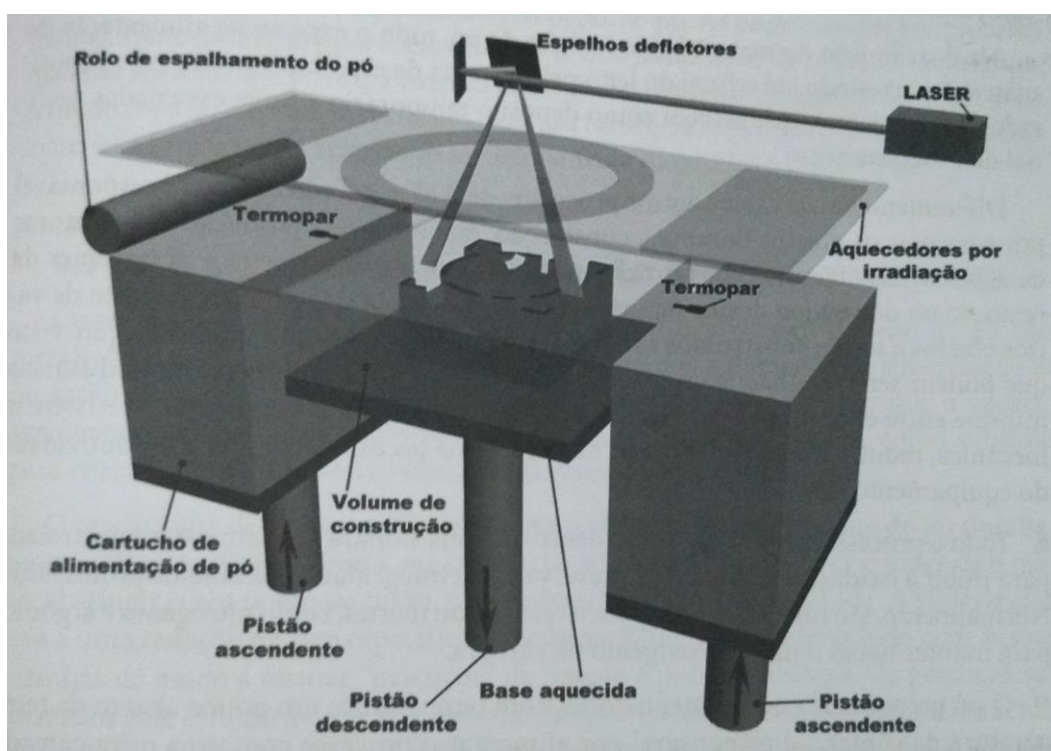
3.REFERENCIAL TEÓRICO

Antes de delinear o problema, relatou-se aqui as tecnologias de fusão seletiva a laser e sinterização seletiva a laser.

3.1.Fusão seletiva a laser e sinterização seletiva a laser

Os processos de fusão e sinterização seletiva a laser estão baseados na fabricação por camadas em um leito de pó a partir de um modelo 3D computacional. Ambos possuem um sistema típico que utiliza um sistema de varredura X-Y (conhecido como sistema galvanométrico) automático composto por dois espelhos refletores de alta dinâmica que direciona um feixe de laser dentro de uma área onde está depositado o material, possuem também um sistema de alimentação de pó, um sistema que espalha o pó sobre o leito, uma base de fabricação com movimento no eixo Z, uma câmara com atmosfera inerte controlada e um pré-aquecimento do material. A Figura 1 ilustra um sistema típico de fusão de leito de pó não metálico.

Figura 1 - Sistema típico de fusão de leito de pó não metálico.



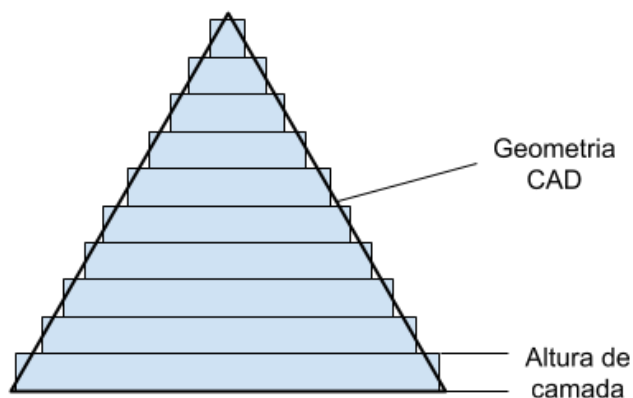
Fonte: retirada de Volpato (2017).

Como ilustrado na Figura 1, a alimentação do pó é realizada por pistões, que levantam finas camadas pré-aquecidas por aquecedores de irradiação que são carregadas por um rolo de espalhamento, o qual se movimenta por cima do leito.

Assim, além de transportar o material, o rolo ainda é responsável pela compactação do pó.

Para cada camada, o laser incide sobre o material seguindo trajetórias geradas a partir de modelos 3D computacionais. Esses modelos, geralmente em formato de arquivo STL (*Stereolithography*), são fatiados em seções transversais por um *software* CAM. Para cada seção transversal, é gerada uma trajetória que percorre o perímetro da geometria e outra que percorre o seu preenchimento de acordo com as configurações definidas pelo usuário. Essas informações são, então, transformadas em códigos de máquina para execução do processo. A Figura 2 ilustra o fatiamento de uma peça em camadas.

Figura 2 - Fatiamento de uma geometria.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com a incidência do laser sobre o material, ele pode sinterizar ou fundir, dependendo de fatores como tipo de material (cerâmico, metálico ou polimérico), características do material (absorção do laser, presença de aglutinante) e da energia depositada no material (pré-aquecimento, potência do laser). Assim, em processos cujo foco é sinterizar, deve-se observar o mecanismo de sinterização.

A sinterização pode ocorrer em fase sólida e em fase líquida. Na primeira, com a elevação da temperatura do material, a sinterização ocorre em um ponto em que o material ainda não atingiu sua temperatura de fusão, mas as partículas vizinhas interagem entre si o suficiente para que apareçam “pescoços” de ligação entre elas. Esse resultado é devido a um fenômeno de transporte de massa que tem como meios a difusão superficial, difusão volumétrica e diluição, para citar alguns. Esse fenômeno ocorre de maneira lenta e vai na contramão da velocidade de varredura do laser. Portanto, a sinterização de fase sólida é utilizada em alguns processos cujo propósito é utilizar cerâmicas. Já a sinterização de fase líquida ocorre geralmente com dois

materiais, um aglutinante e outro estruturante, mas pode acontecer com um único material que se funde parcialmente. No primeiro caso, o material aglutinante funde-se e aglutina os dois materiais, já no segundo, o material se funde parcialmente e preenche também parcialmente os vazios entre as partículas de pó. Já no processo de fusão seletiva a laser, o pó é completamente fundido formando uma poça líquida que escoar entre os vazios das partículas (VOLPATO, 2017).

Para esses processos, diversos materiais foram desenvolvidos e testados. Os mais comuns dos polímeros são as poliamidas 11 e 12 (conhecidas como náilon), nas quais ainda podem ser colocados aditivos para melhorar as suas características mecânicas ou de absorção da energia do laser. Enquanto para os metais, podem ser citadas as ligas de Ti6Al4V, utilizada em peças funcionais, médicas e odontológicas, a liga de AlSi10Mg, utilizada nas indústrias automobilística e aeroespacial, e o Aço inox 17-4, utilizado para fabricação de peças funcionais, insertos para moldes de injeção e motores. Tiwari (2013) coloca que o tamanho médio mínimo de partículas de pós metálicos usados nos processos de SLM são de 20 μm . Isso indica um tamanho mínimo de camadas que o processo pode atingir para esses pós, já que o sistema de espalhamento da máquina descartaria uma quantidade razoável de matéria-prima caso a camada fosse menor do que o tamanho médio de partículas.

Dentre os fabricantes de máquinas de SLM, a 3D Systems e a SLM Solutions, indicam que seus produtos alcançam camadas mínimas de até 10 μm . (3D SYSTEMS, 2018 e SLM SOLUTIONS, 2018).

As aplicações dos processos de SLS/SLM com polímeros e metais são variadas e abrangem indústria médica, aeroespacial e automobilística. No Brasil, foram produzidas peças de poliamida 12 para proteção da eletrônica em antenas do projeto BDA (*Brazilian decimetric array*) desenvolvido pelo INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais). A Figura 3 ilustra essa aplicação.

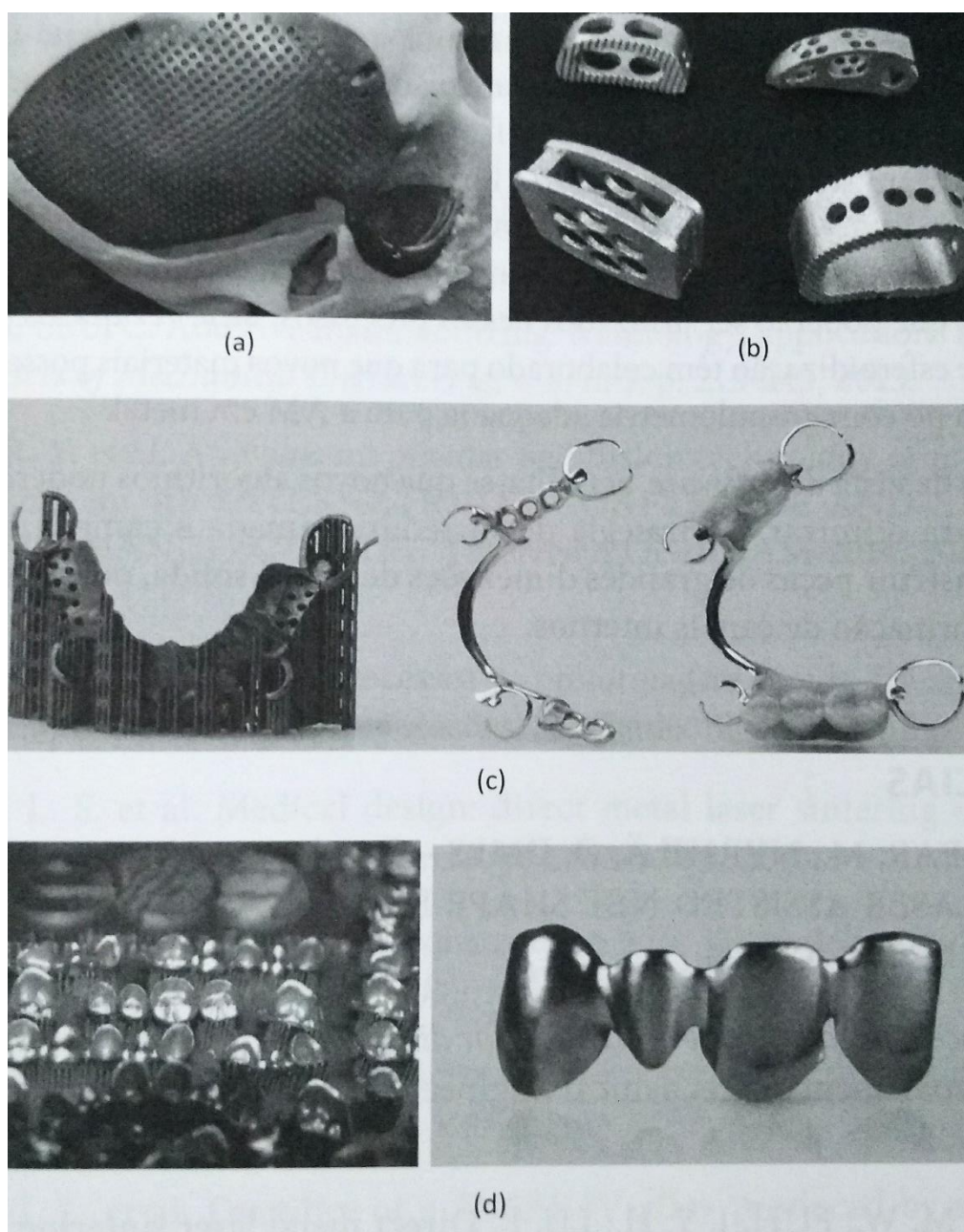
Figura 3 - Antenas e peça fabricada para o encapsulamento.



Fonte: retirada de Volpato (2017).

Já a Figura 4 ilustra aplicações nas áreas médica e odontológica, utilizando materiais metálicos biocompatíveis, como Ti6Al4V e Co-Cr-Mo.

Figura 4 - Exemplos de aplicação nas áreas médica e odontológica: próteses customizadas em Ti6Al4V para uso no tratamento de deformidade de crânio (a), implantes customizados intervertebrais lombares em Ti6Al4V (b), próteses em Co-Cr-Mo na área odontológica (c), plataforma de construção para área odontológica e produto final polido (d).



Fonte: retirada de Volpato (2017).

Para as aplicações em produtos finais é dada atenção, entre outros fatores, às características de resistência mecânica e acabamento superficial das peças, que podem ser modificados no pós-processamento através de tratamento térmico,

têmpera ou tratamento de superfícies, como jateamento ou polimento. Entretanto, a qualidade desejada da peça pode ser atingida já ao final da fabricação, caso sejam observadas as características do processo, como porosidade da peça. Como exemplo, o acabamento superficial pode ser melhorado através da parametrização de camadas finas no processo, pois isso garante uma maior fidelidade geométrica da peça (VOLPATO, 2017) e maior regularidade na sua superfície (SHI et al, 2016). Além disso, Sufiiarov (2017) aponta que a espessura de camada afeta a resistência a tração de peças fabricadas por SLM, observando que a resistência mecânica da peça aumenta na medida em que a espessura de camada diminui em processos de SLM.

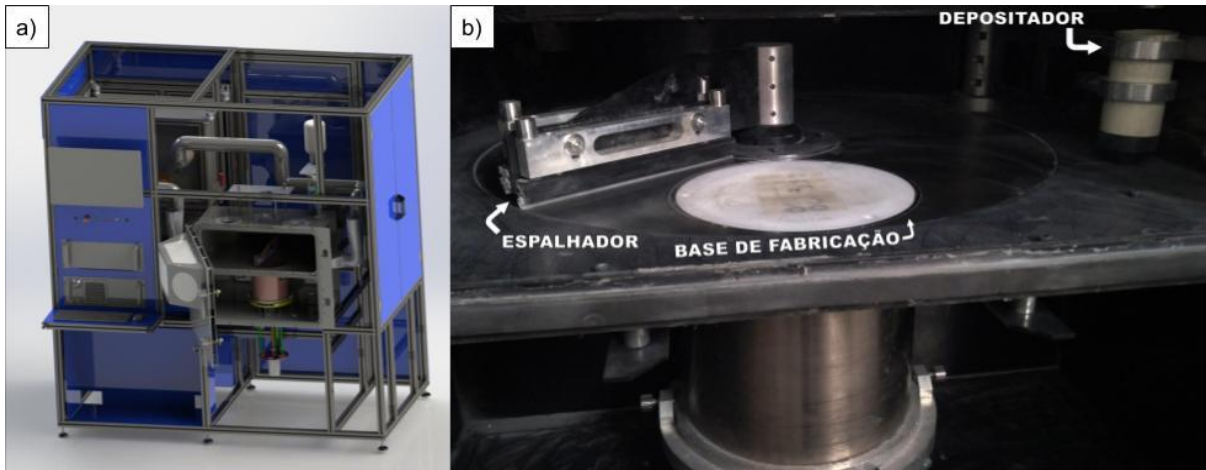
Com os conceitos de SLM e SLS definidos dentro do contexto da manufatura aditiva, pode-se prosseguir para a definição do problema.

4.RECURSOS DO PROJETO

O trabalho foi desenvolvido a partir da estrutura mecânica da máquina de SLM/SLS desenvolvida pela Alkimat. O projeto CAD da máquina e uma foto do seu interior estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura mecânica da máquina de SLM/SLS desenvolvida pela Alkimat.

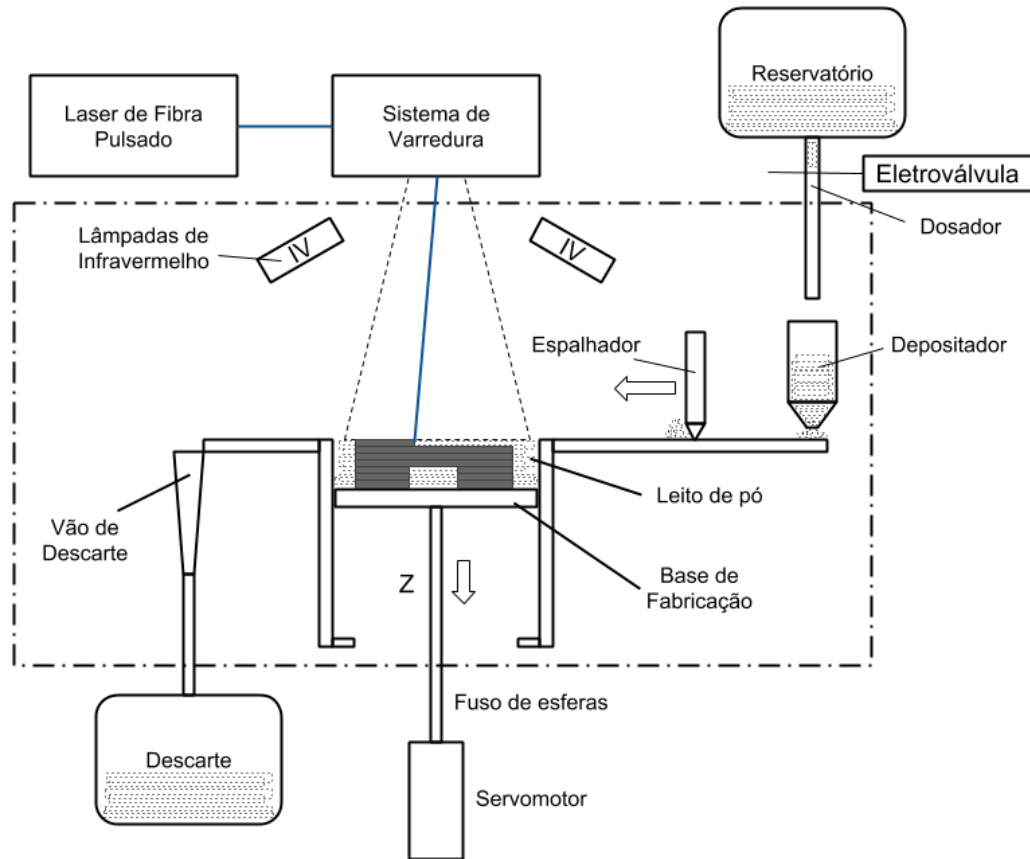
a) visão geral da máquina no CAD; b) visão interna da câmara de fabricação.



Fonte: elaborada pelo autor.

O funcionamento da máquina está baseado na sinterização/fusão por camadas em um leito de pó. Ela utiliza um sistema de varredura que direciona um feixe de laser dentro de uma área circular (base de fabricação) onde está depositado o material. Na Figura 6 é possível observar o esquema construtivo da máquina e seus sistemas.

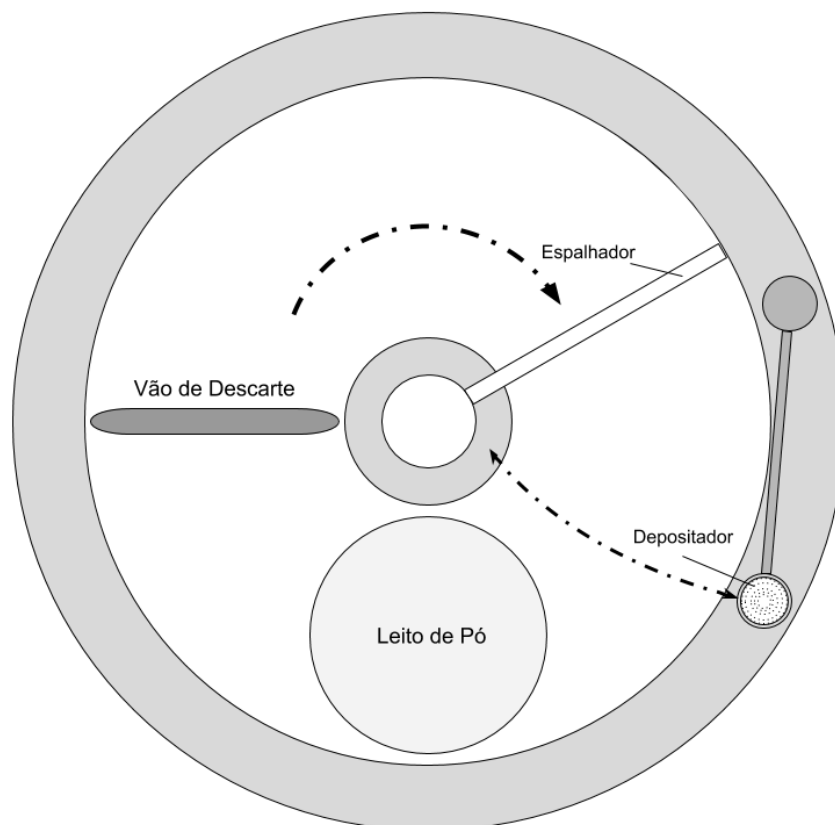
Figura 6 - Esquema construtivo da máquina e seus sistemas.



Fonte: elaborada pelo autor.

A deposição é feita pelo dosador, depositador, espalhador e o eixo do leito de forma automática. Sequencialmente, o primeiro regula a quantidade de pó que será depositada ao abrir, por um tempo determinado, a conexão entre o reservatório e o copo de deposição, o segundo faz a deposição uniforme do pó no caminho do espalhador, formando um arco, o eixo da base de fabricação realiza o deslocamento correspondente à espessura da camada, e, por fim, o terceiro aplica a camada no leito, movimentando-se em uma trajetória circular. Na Figura 7 está ilustrada a visão superior da máquina, focada na deposição de pó.

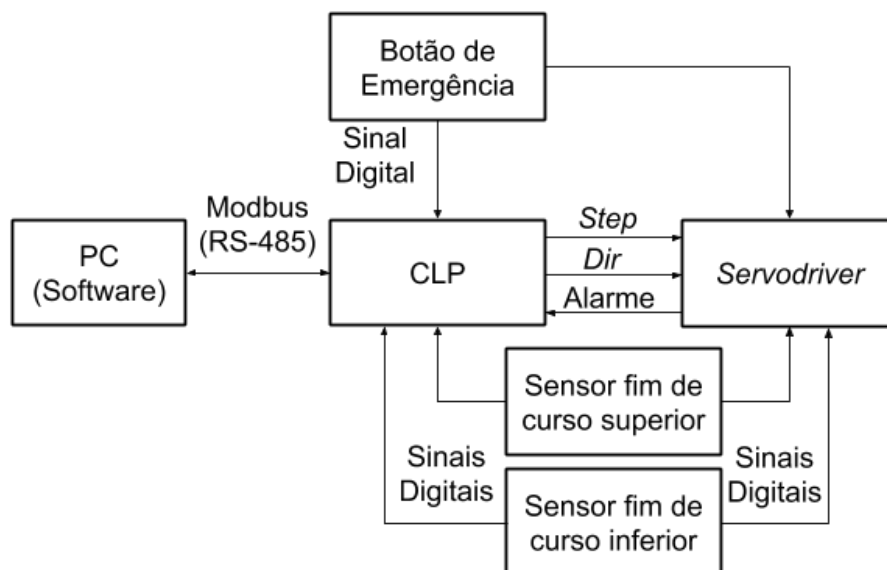
Figura 7 - Visão superior da máquina, focada na deposição de pó.



Fonte: elaborada pelo autor.

O CLP é comandado por um *software* em um sistema Windows que foi desenvolvido pela empresa. Esse programa prepara os modelos tri-dimensionais exportados de um programa CAD das peças que serão fabricadas, configura o sistema para executar a fabricação e se comunica com CLP via MODBUS para que este se dedique ao controle dos eixos, sistemas de segurança da máquina e sistema de controle de atmosfera. São enviados para o CLP as configurações da movimentação, como velocidade dos eixos e espessura de camada. Além disso, o *software* se encarrega de comandar o início do processo de deposição de pó e indicar quando o laser concluiu o seu trabalho, para que o CLP se encarregue de depositar mais uma camada de pó. O controlador lógico programável por sua vez envia para o *software* a informação de que a deposição de pó foi concluída para que assim sejam enviadas as configurações de camada para o laser executar o processo de sinterização seletiva. Na Figura 8 é apresentado o diagrama de sinais simplificado da máquina, em que só estão ilustrados os sinais de interesse entre CLP, PC, *servodriver* da base de fabricação e periféricos.

Figura 8 - Diagrama de sinais simplificado



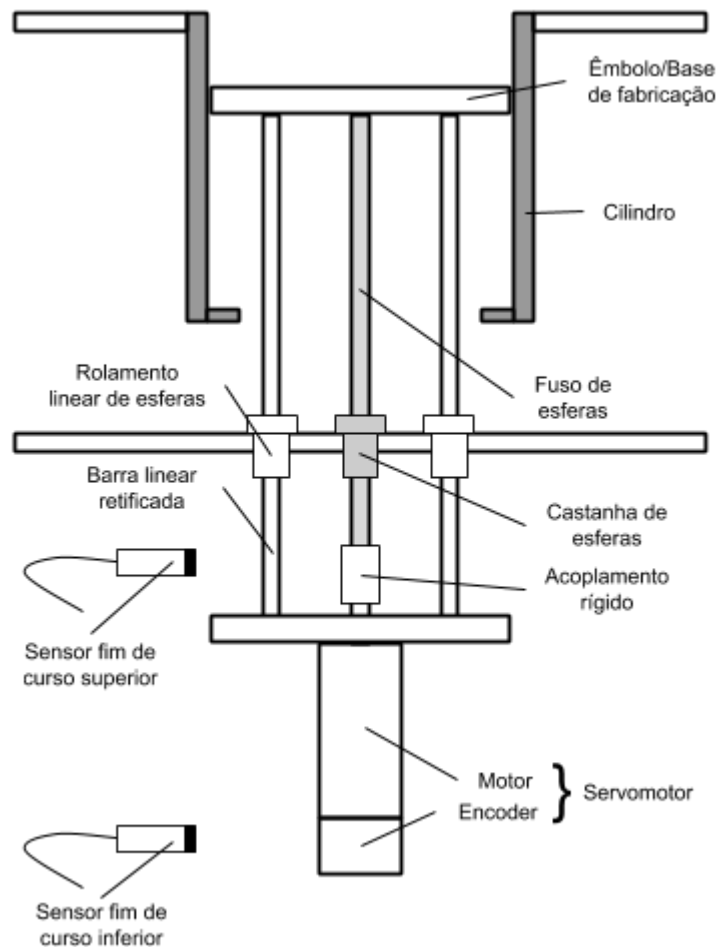
Fonte: elaborada pelo autor.

Para alcançar os objetivos diante o que foi apresentado, foi necessário revisar o funcionamento do mecanismo de movimentação da base de fabricação, do servoacionamento e do CLP. As seções a seguir estão dedicadas a esse estudo.

4.1.Movimentação do leito

O movimento do leito de pó é gerado a partir do conjunto do servomotor e fuso de esferas, que fazem o êmbolo se deslocar para cima ou para baixo. A Figura 9 ilustra o mecanismo.

Figura 9 - Mecanismo de movimentação do leito de pó.



Fonte: elaborada pelo autor.

A base de fabricação movimenta-se em conjunto com o fuso de esferas, barras lineares retificadas e o servomotor por dentro de um cilindro vazado de inox fixado na estrutura, enquanto a castanha de esferas e os rolamentos lineares ficam fixos em uma chapa rígida que compõe a estrutura da máquina. Também nesse contexto, os sensores fim-de-curso delimitam o curso do eixo nos dois sentidos e, adicionalmente, o sensor superior é utilizado no controle de posição para referenciar a posição inicial.

Nesse mecanismo de movimentação, o fuso de esferas é responsável pela transformação do movimento circular do motor em movimento linear, ou seja, na medida que o motor rotaciona, o êmbolo é deslocado linearmente. A direção do movimento é guiada por duas barras lineares retificadas que passam por rolamentos lineares de esferas, enquanto o sentido do deslocamento é determinado pelo sentido de giro do motor. Para esse mecanismo, o sentido horário de rotação do motor

corresponde ao movimento ascendente. O deslocamento é dado pela relação entre o número de voltas, representado pela Equação 1.

$$d = v * p \quad (1)$$

Onde:

p = passo em mm/voltas

v = número de voltas dadas

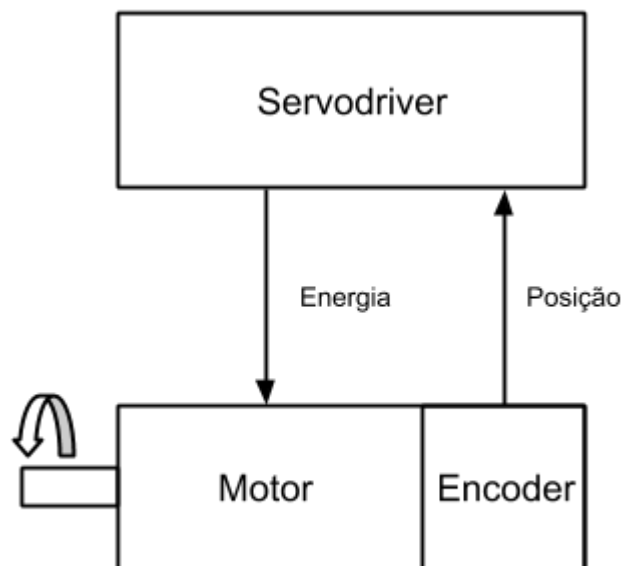
d = deslocamento resultante em mm

Neste caso, o fuso possui passo de 5 mm, sendo assim, a cada giro do fuso o êmbolo é deslocado em 5 mm.

4.2.Servoacionamento

O servoacionamento representa o conjunto *servodriver*, motor e *encoder*. O *servodriver* (modelo ASDA-A2) é responsável por controlar o motor em malha fechada a partir do sinal de posição enviado pelo *encoder*, que, nesse caso, é rotativo e mede a posição a partir da rotação do eixo do motor (modelo ECMA-C206-04). A Figura 10 ilustra o funcionamento do servoacionamento.

Figura 10 – Diagrama do Servoacionamento



Fonte: elaborada pelo autor.

A resolução do *encoder* é, portanto, responsável pela resolução da posição, já que o mecanismo de fuso de esferas transforma a rotação em movimento linear. Assim, a resolução máxima de posicionamento pode ser obtida ao se dividir o passo do fuso de esferas pela resolução do *encoder*, seguindo a Equação 2.

$$Rp = \frac{p}{Re} \quad (2)$$

Onde:

Rp = a resolução de posicionamento em mm/pulso

p = passo em mm/rotação

Re = resolução do servoacionamento dada em pulsos/rotação

Neste caso, o fabricante indica¹ que esse conjunto de *encoder* e *servodriver* possui resolução de até 1.280.000 pulsos por rotação do motor. Substituindo p e Re na Equação 2 tem-se que:

$$Rp = \frac{5}{1280000} = 3,9 \times 10^{-6} \text{ mm/pulso}$$

Sendo assim, é possível atingir uma resolução de até 3,9 nm/pulso de comando com o servoacionamento disponível.

4.3.Servodriver

O *servodriver* possui controle de posição em que são contados os pulsos enviados para uma entrada digital (*STEP*). A frequência de recebimento desses pulsos determina a velocidade do motor. Outro sinal (*DIR*) determina o sentido de rotação do motor. O *servodriver* possui um registrador de *E-GEAR*, que multiplica ou divide cada unidade do comando *STEP*, que permite, com um pulso de comando, atingir mais resolução ao dividir o sinal, ou atingir velocidades mais altas ao multiplicar. A relação entre o pulso e o *E-GEAR* pode ser observada na Equação 3.

¹ DELTA ELECTRONICS INC., 2011.

$$PUU = EGEAR \times STEP \quad (3)$$

Onde:

PUU = a unidade de comando interpretada pelo *servodriver*

EGEAR = um valor configurável pela divisão de dois registradores do *servodriver* (P1-44/P1-43)

STEP = a unidade de sinal recebida pela entrada digital do *servodriver*

Sendo assim, quando *E-GEAR* é um valor menor que um e maior que zero, o pulso de comando ganha mais resolução e perde frequência, caso o valor for maior que um, o pulso perde resolução, mas ganha frequência, e, por fim, se for igual a um, o pulso de comando é igual a unidade de comando interpretada pelo *servodriver* e a frequência se mantém.

Para evitar perdas de passo ou incrementos de passo não desejados advindos de interferência eletromagnética nos fios de transmissão de sinais de pulso e direção, o *servodriver* possui um filtro digital que permite ignorar algumas faixas de frequência predeterminadas.

O *servodriver* possui diversos elementos de segurança, como detecção de sobretorque, sobrecorrente e de fins-de-curso. Nos casos de sobretorque e sobrecorrente, o driver é desabilitado e uma saída digital é habilitada, enquanto no caso da percepção dos fins-de-curso é desabilitada a entrada de novos comandos de pulso enquanto a direção não for invertida.

O controle de posição é feito com um controlador PID. Neste caso, optou-se por utilizar o *autotune* do fabricante para definição dos parâmetros PID. O método de *autotune* está documentado no manual do *servodriver*². Optou-se por utilizar velocidades altas durante a rotina de execução do *autotune* para obter um controle mais estável.

Não está no escopo desse trabalho o aprofundamento em técnicas de controle e a eficácia do *autotune* do controle PID da fabricante Delta, porém se reconhece que estudos nessa área possuem relevância no resultado final do controle de posição.

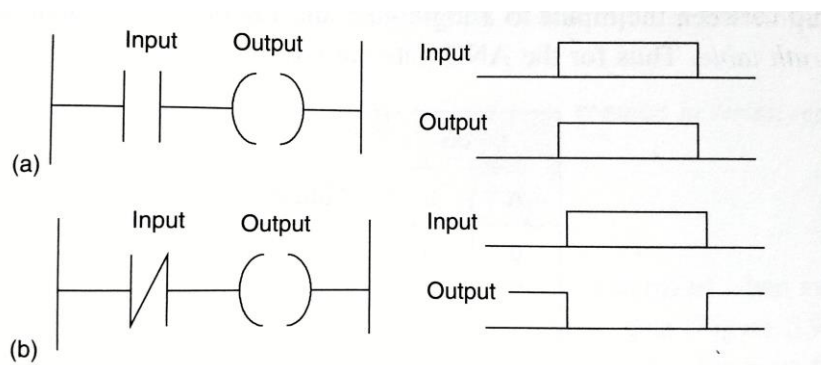
² DELTA ELECTRONICS INC., 2011.

4.4. Controlador lógico programável

Um controlador lógico programável (CLP) é baseado em um microcontrolador configurável para operações de temporização, contagem, sequenciamento e lógica, dentre outras. Ele foi projetado para ser usado por engenheiros sem que haja a necessidade de se saber muito sobre programação de computadores e linguagens de programação. Por esse motivo, os CLP's possuem entradas e saídas (E/S) digitais e é comum que possuam conversores analógico-digitais. O propósito dessas E/S é a leitura de sinais digitais de periféricos, como sensores fim-de-curso e botões, e para acionamento de dispositivos, como eletroválvulas e servomotores. Já os conversores analógico-digitais servem para leitura de sensores analógicos, como sensores de temperatura e de pressão. Sendo assim, os CLP's são utilizados para controle de máquinas e processos em ambientes industriais, pois são robustos o suficiente para aguentar vibrações, temperatura, umidade e ruídos eletromagnéticos (BOLTON, 2009).

Para programação do CLP, a norma IEC 61131-3³ define como linguagens de programação padrão o diagrama *ladder* (LAD), o diagrama de funções sequenciais (SFC), diagrama de blocos (FBD), texto estruturado (ST) e lista de instruções (IL). A linguagem escolhida foi o diagrama *ladder*, por familiaridade do autor com ela. Essa linguagem é simples e está baseada na representação de circuitos elétricos em que duas linhas verticais representam os barramentos elétricos e as linhas horizontais os circuitos elétricos feitos entre os barramentos. (BOLTON, 2009) A Figura 11 ilustra um diagrama simples com uma entrada (Input) e uma saída (Output) e a representação dos sinais elétricos resultantes.

Figura 11 - Representação de um diagrama *ladder* simples.



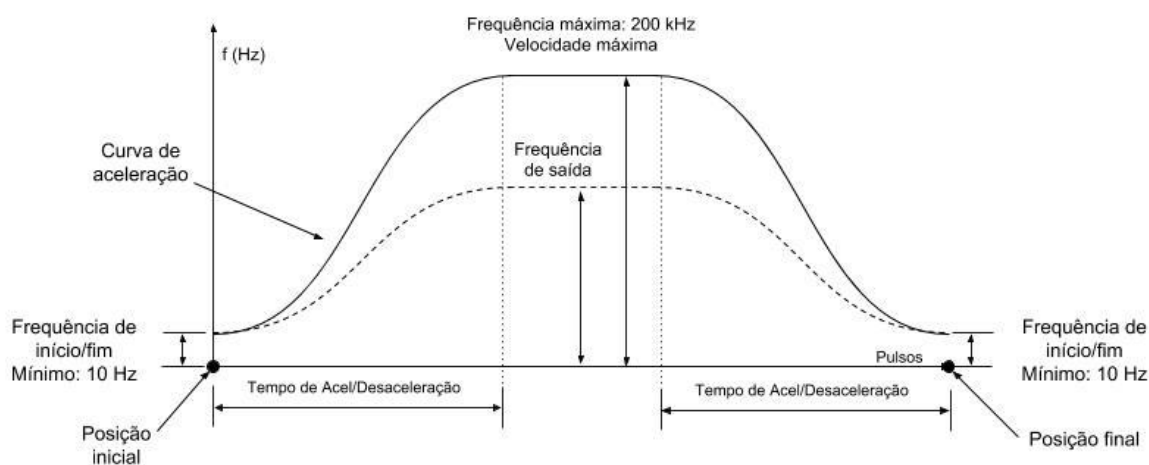
Fonte: retirado de Bolton (2009).

³ INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2013.

O CLP Delta DVP-SV2⁴ opera com entradas e saídas transistorizadas que operam a 24V. As entradas são opto-isoladas para proteção do circuito interno, enquanto as saídas podem alcançar frequência de chaveamento de até 200 kHz. Nesse equipamento, existem quatro canais com duas saídas, cada um dedicado ao controle de posicionamento por pulso e direção.

O fabricante disponibiliza para programação⁵ diversos blocos de função em linguagem *ladder*, dentre eles, blocos para controle de posição e para realizar o referenciamento da posição do eixo através da rotina de *homing*. Esses blocos podem ser rapidamente implementados, pois não requerem que o usuário programe a lógica de envio dos sinais de *STEP/DIR*, mas sim, somente indicar a quantidade de pulsos a serem enviados, a frequência de envio, as saídas digitais e, por fim, habilitar o bloco de função para realização do movimento. Outros parâmetros auxiliares desses blocos podem ser alterados, modificando os registros do CLP dedicados para eles. Neste caso, os parâmetros de interesse são os parâmetros de tempo de aceleração, frequência de início/fim e o controle da curva de aceleração. Na Figura 12 está ilustrada a curva de velocidade característica do CLP e os parâmetros a serem configurados para cada movimento.

Figura 12 - Curva de velocidade/frequência.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 12, está definida a configuração de “curva S”, que é uma opção para tornar o movimento contínuo, ou seja, sem alterações bruscas de aceleração,

⁴ DELTA ELECTRONICS INC., 2016.

⁵ Id., 2013.

preservando o sistema mecânico de desgastes provenientes de variações abruptas no torque do motor.

Para o referenciamento de posição do eixo pela rotina de *homing*, é utilizado um bloco de função que retorna pro zero. Este bloco utiliza duas velocidades: uma rápida, denominada *home speed* e uma lenta, denominada *creep speed*. A razão dessas duas velocidades diferentes é justificada pela estratégia de *homing* implementada no bloco de função. Ela consiste em procurar o sensor fim-de-curso com uma velocidade maior e, ao encontrá-lo, reduzir a velocidade e inverter o sentido de movimentação até que o sinal do sensor fim-de-curso seja desabilitado.

Por fim, o CLP possui suporte a comunicação via MODBUS RS-485 com velocidade de transmissão de até 115200 bpps. Nesse caso, ele é o escravo na comunicação com o *software*, que é responsável por transmitir as configurações de movimentação do eixo, que são definidas pelo usuário na sua interface gráfica, para os registradores do CLP. Além disso, o *software* deve ler registradores do CLP para identificar o seu estado, como estados de movimentação, emergência e pausa.

5.DEFINIÇÃO DA SOLUÇÃO

A escolha de resolução para o servoacionamento esteve baseada na espessura mínima de camada apresentada por outros dois fabricantes de máquinas de SLM (SLM Solution e 3D Systems) e tamanho mínimo médio de partículas de matéria-prima apresentado por Tiwari (2013). Sendo assim, foi determinada uma camada mínima de 20 μm e a resolução foi determinada em 1 μm , que representa 1/20 da camada mínima. Essa decisão ainda esteve baseada na recomendação de seleção de resolução de instrumentos de medição apresentada por Albertazzi e Sousa, que indicam que “Embora não exista uma regra rígida que defina o valor adequado da resolução, é razoável adotar resolução da ordem de 1/20 do intervalo de tolerância” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013, p. 314). Dessa forma, foram feitas as configurações do *servodriver* e CLP para atender esse requisito. Ao final, realizaram-se testes para avaliar a repetibilidade do sistema.

5.1.Configuração do servodriver

A configuração do *servodriver* foi realizada alterando os seus registradores manualmente pelo seu display. Foi definido que para proteção do operador e do sistema mecânico, o *servodriver* foi configurado para desabilitar caso sejam atingidos os sensores fim-de-curso e caso o botão de emergência seja pressionado. Além disso, o *servodriver* envia um sinal para o CLP caso entre em estado de erros críticos, como sobretorque, sobrecorrente e baixa tensão. No Quadro 1 foram dispostas as configurações para os registradores do *servodriver*.

Quadro 1 - Configuração dos registradores do *servodriver*.

Registrador	Valor	Descrição
P1-00	0132	Tipo de pulso (<i>STEP/DIR</i>)
P1-01	00	Tipo de comando (PT)
P1-45	1	EGEAR - denominador
P1-44	256	EGEAR - numerador
P2-17	0021	Emergência - Normalmente Aberto
P2-10	001	<i>Driver enable</i> - Normalmente Fechado
P2-15	0022	Configuração do Fim de curso inferior
P2-16	0023	Configuração do Fim de curso superior

Fonte: elaborado pelo autor.

No Quadro 1 já estão dispostos os valores de *E-GEAR*. Eles foram calculados a partir de uma regra de três em que a incógnita *X* é a quantidade de pulsos necessária para gerar um deslocamento de 1 µm, sabendo que 1.280.000 pulsos são responsáveis por deslocar 5 mm. Sendo assim:

$$\frac{1280000}{5 \text{ mm}} = \frac{X}{0,001 \text{ mm}}$$

Isolando *X* na equação e resolvendo as operações, tem-se que:

$$\frac{1280000}{5 \text{ mm}} * 0,001 \text{ mm} = 256 = X$$

A partir do resultado, conclui-se que cada pulso enviado pelo CLP deve ser equivalente a 256 PUU. Logo, o *E-GEAR* deve multiplicar o *STEP* por 256 (Equação 3). No Quadro 1 é possível notar que o registrador P1-44 é o numerador do *E-GEAR* e que está configurado para 256.

Por fim, foi aplicado o filtro digital aos pulsos de entrada. O *servodriver* disponibiliza cinco opções de filtro, sendo que uma delas é a ausência de filtro. As opções são: 1,66 Mpps, 416 Kpps, 208 Kpps e 104 Kpps. O filtro selecionado foi o de 208 Kpps, que filtra as frequências de pulsos acima de 208 kHz, pois a frequência máxima enviada pelo CLP é de 200 kHz.

5.2. Configuração do CLP

Foram configurados os registradores do CLP para tipo de pulso, tempo de aceleração e desaceleração, modo de curva S e frequência inicial, dispostos no Quadro 2.

Quadro 2 - Configuração dos registradores do CLP.

Registrador	Valor	Descrição
D1381	100 ms	Tempo de Aceleração/Desaceleração
D1379	10 Hz (mínimo)	Frequência Inicial
D1229	0	Modo de <i>STEP/DIR</i>
M1257	1	Modo de curva S

Fonte: elaborado pelo autor.

O tempo de aceleração e desaceleração foi determinado de tal forma que somados não ultrapassem um segundo, pois isso iria acarretar um gargalo de tempo na rotina sequencial de operação da máquina. Sendo assim, foi escolhido o valor de 100 ms. A frequência inicial foi mantida como a mínima possível e a curva S habilitada, ambas com o intuito de suavizar o acionamento e preservar o sistema mecânico.

5.3. Aparato e Metodologia experimental

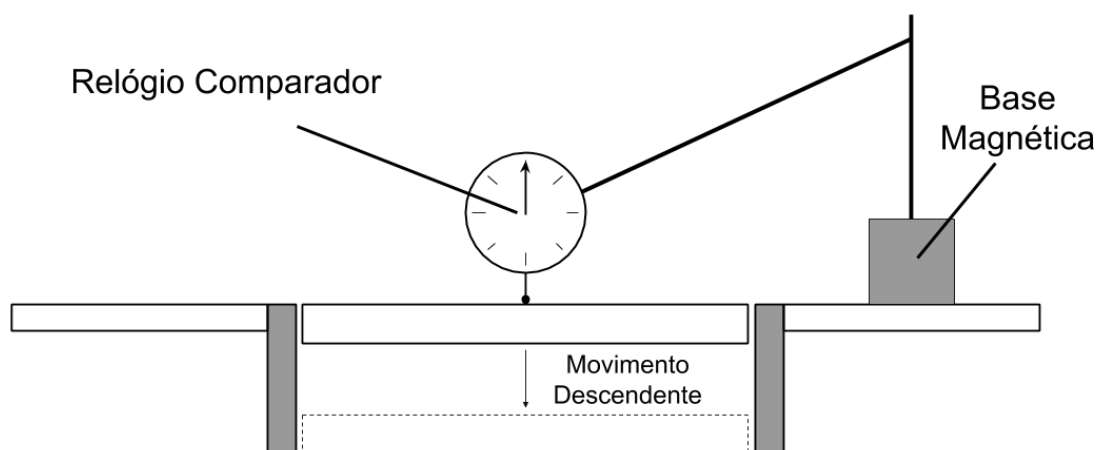
Em um primeiro momento, foram projetadas e montadas as ligações elétricas entre o CLP e o *servodriver* e suas respectivas alimentações de acordo com as orientações dos fabricantes. O esquemático da ligação elétrica está disposto no Apêndice A. É importante ressaltar que foi feito um projeto para todo o gabinete elétrico da máquina, porém a documentação aqui apresentada está simplificada e foca somente no sistema deste trabalho. O sistema elétrico funciona a partir de uma chave geral no painel elétrico alimenta tensão alternada de 220 V para todos os equipamentos quando acionada. Em primeiro momento, somente a fonte de 24 V é alimentada, assim o CLP é inicializado e todas as suas entradas e saídas começam a operar, em conjunto com ele os sensores de fim-de-curso também começam a operar. Além disso, a comunicação MODBUS é configurada e pode ser estabelecida com o PC assim que o *software* for inicializado. Já a alimentação do *servodriver* depende do acionamento de uma chave pelo operador da máquina, que fecha a contatora geral, que passa a conduzir os 220 V da rede. Somado a isso, caso o botão de emergência não tenha sido pressionado e caso exista o sinal de que a contatora geral foi fechada, o CLP deve comandar o acionamento da contatora do motor através do chaveamento de um relé auxiliar. Por fim, disjuntores de 10 A protegem tanto o circuito de alimentação do motor quanto o circuito de alimentação do CLP de curtos.

Com o aparato montado prosseguiu-se para a definição da metodologia experimental. Assim, um programa especial para o CLP foi elaborado. Durante a execução deste programa, um osciloscópio cedido pelo Grupo de Sistemas Embarcados e Distribuídos do Instituto Federal de Santa Catarina realiza a aquisição dos comandos de pulso e direção do CLP, enquanto um relógio comparador realiza a medição do deslocamento da base de fabricação.

O programa do CLP está ilustrado pelo fluxograma do Apêndice B e foi implementado em diagrama *ladder*. Ele envia comandos incrementais de posição de 100 μm para o *servodriver* até atingir um curso de 10 mm. Assim, são capturadas duas voltas completas do fuso de esferas o que permite observar a flutuação dos erros com maior clareza.

Para avaliação da precisão de posição do eixo, optou-se pela utilização do método diferencial de medição, dada a disponibilidade do relógio comparador com resolução de 1 μm da Insize modelo 2112-101F que foi cedido pelo Laboratório de Metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina. O método citado é usado para medições de comprimento, pressão, temperatura, tensão elétrica, força e massa e consiste em medir o valor de uma diferença a partir de uma referência, como um bloco padrão ou medida padrão. (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013) Neste caso, a referência é a posição inicial da base de fabricação como ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Ilustração da montagem do relógio comparador.



Fonte: elaborado pelo autor.

As posições obtidas são enviadas diretamente para uma tabela no *Google Spreadsheet* com o apertar de um botão do operador, que adquire o dado digital do relógio comparador e o transmite via USB ao computador.

Para avaliação do sistema, estimaram-se os erros sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos são erros que tendem a se manter constantes sob as mesmas condições de medição e que podem ser corrigidos, já os erros aleatórios são erros imprevisíveis que aparecem em medições repetidas de um mesmo mensurando. (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013). Para estimar o erro sistemático se utilizou o cálculo de tendência, que consiste em efetuar diversas medições repetidas e calcular a diferença entre a média dos valores obtidos e o valor verdadeiro convencional do mensurando (VVC), definido como “uma estimativa do valor verdadeiro do mensurando.” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013, p. 47) Neste caso o VVC é a referência de posição, ou seja, para um comando de 100 µm, espera-se obter este mesmo valor durante a medição. Assim, a tendência é dada pela Equação 4:

$$Td = I - VVC \quad (4)$$

Onde:

Td = Tendência (µm)

I = Média de um número finito de indicações (µm)

VVC = Valor verdadeiro do mensurando (µm)

Já para estimar o erro aleatório, a repetitividade é utilizada. Ela se caracteriza como “a faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado com uma certa probabilidade.” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013, p. 50) e é calculada multiplicando-se a incerteza-padrão pelo coeficiente de Student. Como mostra a Equação 5:

$$Re = \pm t \times u \quad (5)$$

Onde:

Re = Repetibilidade.

t = coeficiente t de Student para 95,45% de probabilidade e $n - 1$ graus de liberdade.

u = incerteza-padrão obtida a partir da amostra com $n - 1$ graus de liberdade.

O coeficiente t de Student depende da probabilidade escolhida, neste caso 95,45 %, e da quantidade de graus de liberdade, que é dado como o número de medições (n) menos um. Como foram realizados cinco experimentos, utilizou-se o coeficiente para quatro graus de liberdade.

A incerteza-padrão (u) é o valor do desvio-padrão do erro aleatório de medição (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013), neste caso, calculou-se o desvio-padrão da amostra, que “é uma estimativa do desvio-padrão da população” (ALBERTAZZI e SOUSA, 2013, p. 58) dado pela Equação 6:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Onde:

S = desvio-padrão da amostra

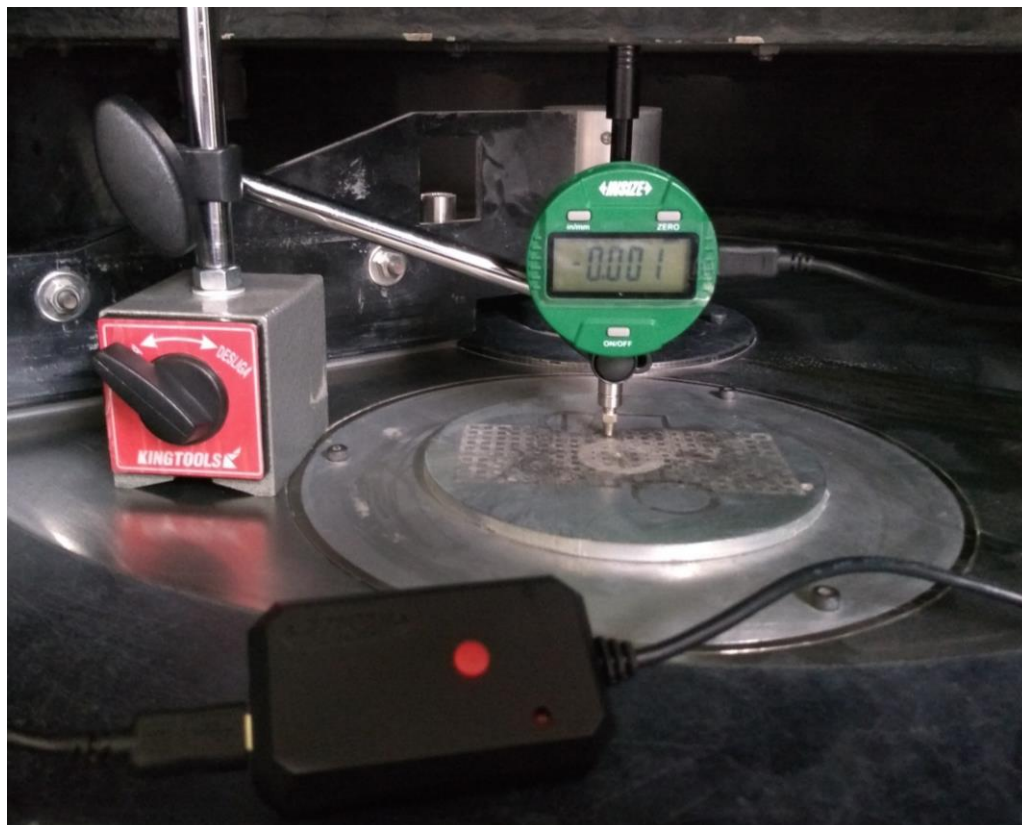
I_i = i-ésima indicação

$\bar{I}$ = média das “n” indicações

n = número de medições repetidas efetuadas

Para os experimentos, uma ponteira do osciloscópio foi ligada ao comando de pulso e a outra ao comando de direção para validação dos pulsos enviados pelo CLP. Em simultâneo, o relógio comparador foi colocado sobre a base de fabricação e referenciado com a posição de home do eixo. A Figura 14 ilustra a montagem do relógio comparador sobre a base de fabricação.

Figura 14 - Montagem do relógio comparador sobre a base de fabricação.



Fonte: elaborado pelo autor.

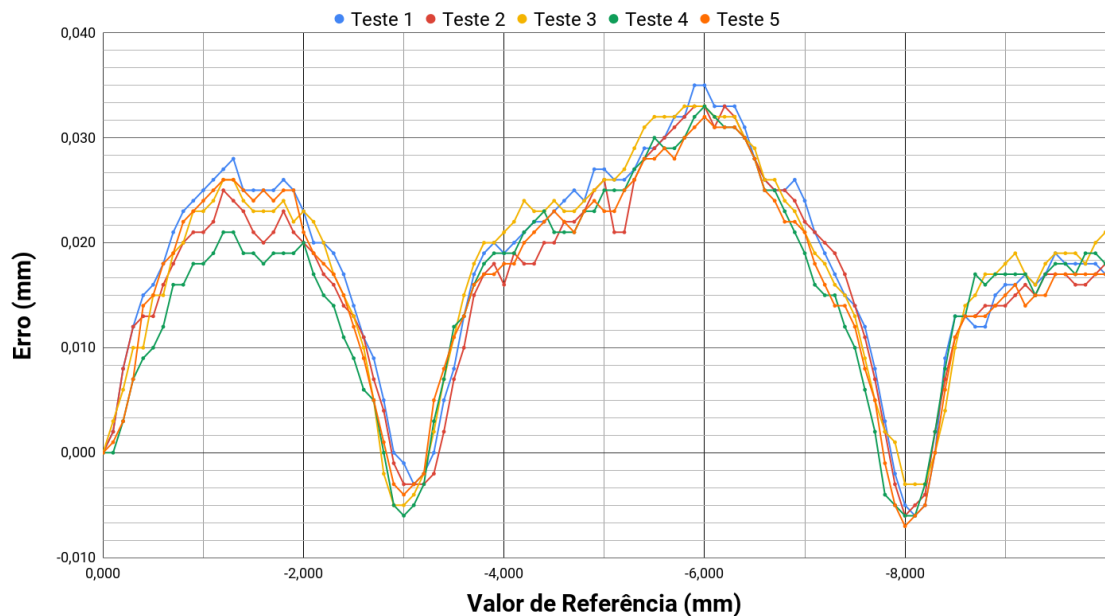
A partir desse momento, foram realizados os testes e coletados os dados, que estão apresentados no capítulo seguinte.

6.RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram feitos cinco ensaios ao longo de duas horas coletando a cada 100 μm em um curso de 10 mm a posição real da base de fabricação. Os pontos experimentais estão dispostos no Apêndice D, já a Figura 15 ilustra a curva gerada a partir deles.

Figura 15 - Curva de pontos experimentais.

Pontos Experimentais - Resolução 1 μm

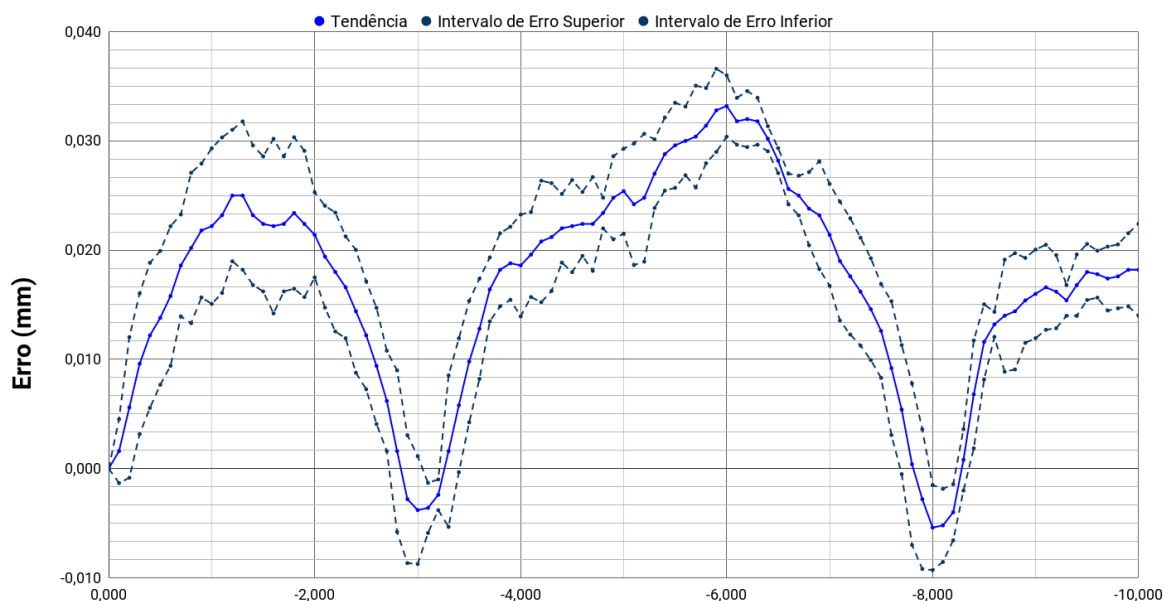


Fonte: elaborada pelo autor.

Com esse resultado pode-se estimar a tendência e a repetibilidade para cada ponto a partir das Equações 5 e 6 e o t de student definido em 2,869 para 4 graus de liberdade com intervalo de confiança de 95,45%. A Figura 16 ilustra a curva de erros obtida com os ensaios em função da posição em milímetros e a Figura 17 ilustra a mesma curva, porém em função da rotação do motor em graus.

Figura 16 - Curva de erros para resolução de 1 μm em função da posição em milímetros.

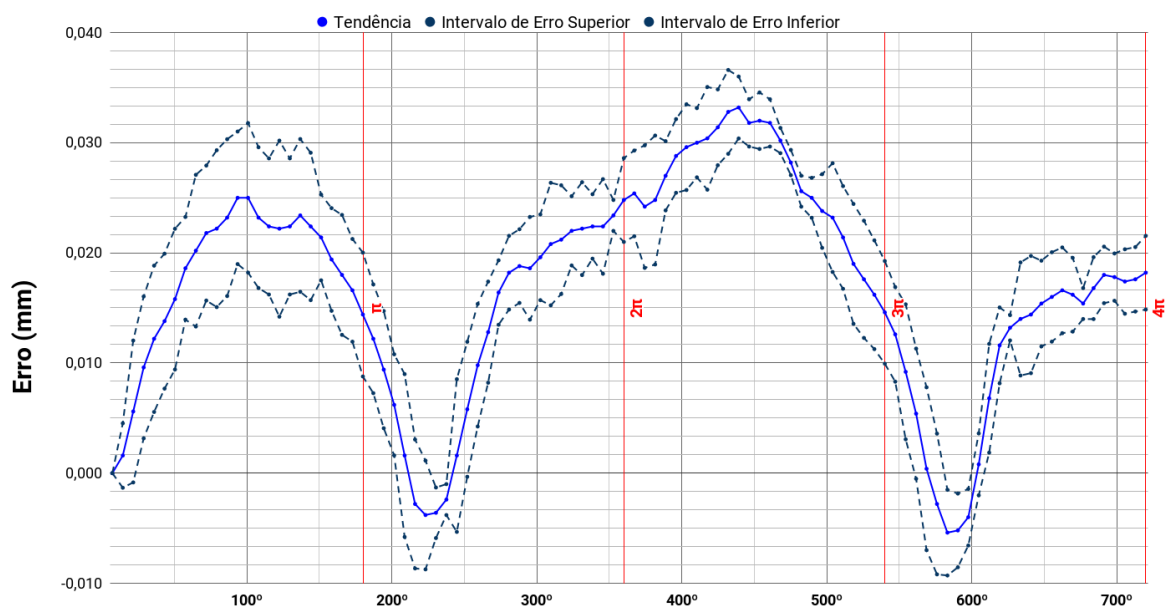
Curva de Erros - Resolução 1 μm



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 - Curva de erros para resolução de 1 μm em função da posição radial do motor em graus. Em vermelho está a rotação em radianos.

Curva de Erros - Resolução 1 μm



Fonte: elaborada pelo autor.

Os fabricantes de fuso de esferas garantem a precisão de seus mecanismos pela norma JIS B 1192 - 1997. Dentre outros dados disponibilizados pelo fabricante⁶ estão as flutuações máximas obtidas em uma volta do fuso (Flutuação 2π) e Flutuação Total obtida ao longo de todo o curso do fuso de esferas, que foram utilizadas para comparação com os resultados. No Quadro 3 estão dispostas as flutuações encontradas em cada um dos ensaios ao longo da primeira volta do fuso (entre 0 e 5 mm de curso), ao longo da segunda volta (entre 5 e 10 mm de curso), ao longo do curso total (10 mm) e também as médias de todas as flutuações 2π , a média da flutuação total, a média dos erros encontrados em cada ensaio, os valores máximos e mínimos da tendência e repetibilidade e suas médias.

Quadro 3 - Dados de flutuação dos erros, tendência e repetibilidade em μm .

Teste	Flutuação Pi (0-5mm)	Flutuação Pi (5-10mm)	Flutuação Total	Média dos Erros
1	31	41	41	18
2	29	39	39	16
3	31	36	38	18
4	31	36	39	16
5	30	39	39	16
Média de Todas as flutuações	34	Média da Flutuação Total	39	
	Máxima	Mínima	Média	
Tendência	33	-5	17	
Repetibilidade	8	0	4	

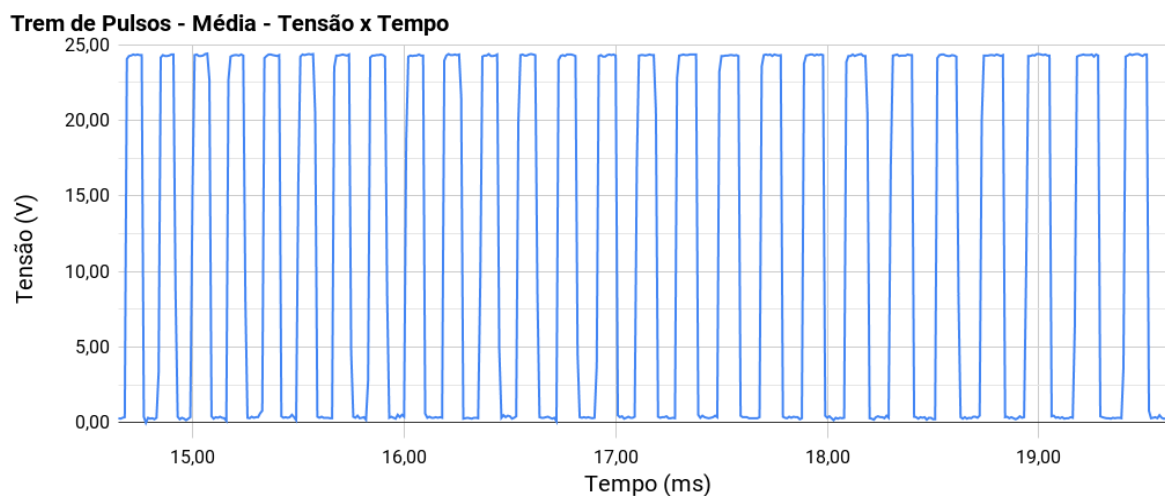
Fonte: elaborado pelo autor.

Além desses resultados, foram feitas seis aquisições do trem de pulsos com o osciloscópio. Ele foi configurado para realizar a captura ao detectar uma borda de subida no canal do pulso e, ao final da captura, os pontos foram armazenados em um *pendrive* e tratados posteriormente no *Google Spreadsheet*. Na Figura 18 está ilustrada uma parcela da média dos sinais dos trens de pulsos. Já no Apêndice C estão dispostos todos os ensaios realizados. Nota-se que foram ilustrados somente uma parcela dos trens de pulsos e isso se deve ao fato de que os passos são enviados com frequência variável pelo CLP, portanto, ao selecionar uma escala que enquadre todos os sinais, é impossível notar os níveis de 24 V nas frequências mais altas. Neste

⁶ THK, 2015

caso, a escala foi ajustada a uma região de alta frequência para perceber a presença ou não de ruídos com o prejuízo de não visualizar todos os cem pulsos.

Figura 18 - Média dos trens de pulsos dos seis ensaios.

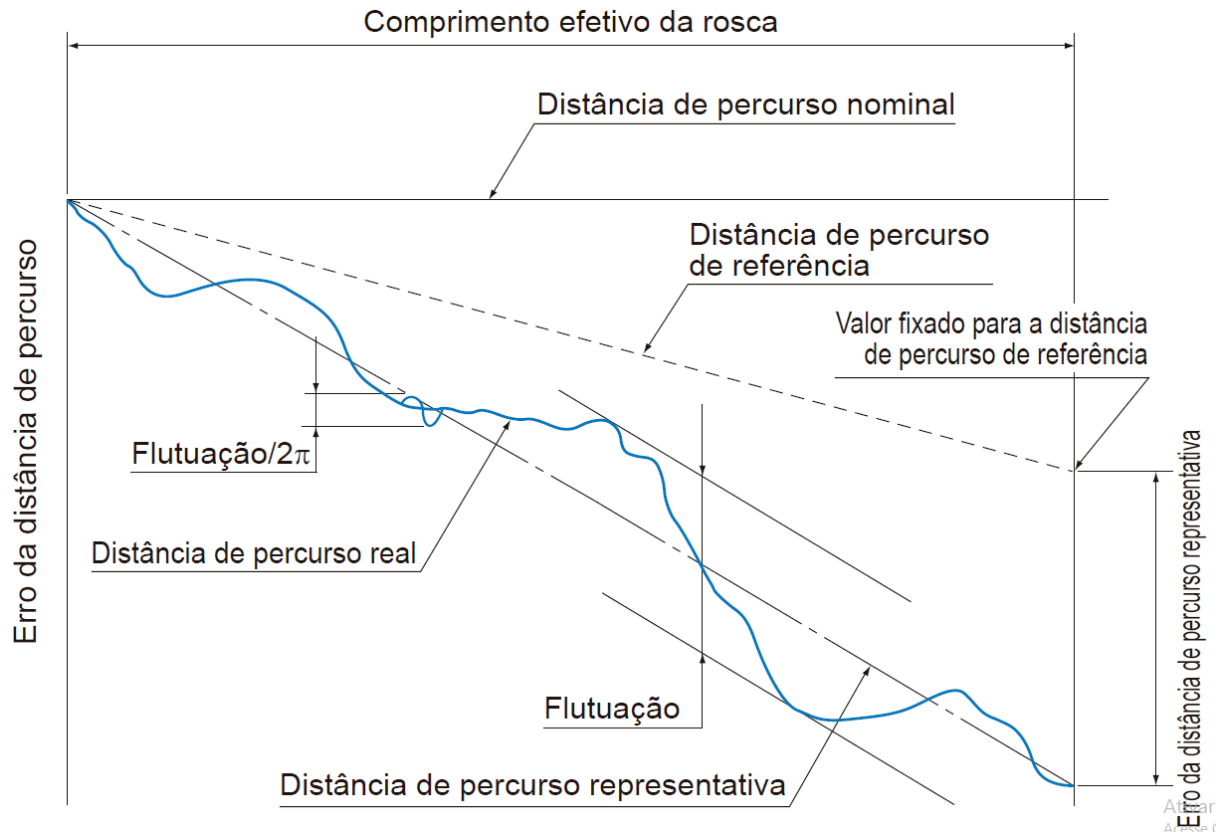


Fonte: elaborada pelo autor.

A partir do que foi observado nos dados coletados, pode-se perceber que os pulsos não sofreram ruídos intensos o suficiente para gerar uma falsa detecção de passo. Para o driver perceber um comando de passo, seria necessário o ruído ultrapassar os 12 V, o que não foi observado em nenhum dos testes. Além disso, é possível notar quantos pulsos são reconhecidos pelo driver através do indicador numérico no seu display, que, ao longo de uma rotina de fabricação foi monitorado e em nenhum momento se percebeu um incremento errado de passos.

Já a respeito ao resultado obtido com o deslocamento do êmbolo, a flutuação está acima do que é especificado pelo fabricante, mesmo assim este é um comportamento esperado da curva de erros para um mecanismo de fuso de esferas, como especificado no catálogo da THK. A Figura 19 ilustra o comportamento esperado.

Figura 19 – Curva de erros para um mecanismo de fuso de esferas.



Fonte: retirado de THK, 2015.

Sendo a classe de precisão do fuso C5, o fabricante garante que a flutuação para uma volta é de no máximo 8 μm e que para todo o curso a flutuação é de no máximo 18 μm , mas pelo Quadro 3 é possível perceber que a flutuação máxima em uma volta chegou a 41 μm , mais do que duas vezes maior do que o esperado. Já a repetibilidade média foi de 4 μm , o que representa um valor cinco vezes menor que a espessura mínima de camada e um valor um pouco acima da repetibilidade do relógio comparador, que é de 2 μm . Assim, é possível perceber que o erro repete bem, mas a parcela sistemática do erro é razoável para peças de prototipagem e validação de conceito, que já estão sendo fabricadas pela Alkimat, porém para aplicações em áreas mais críticas onde é necessário ter maior confiança na resistência mecânica e tolerâncias mais justas de dimensionamento, não foi um resultado interessante, pois haverá variações da resistência mecânica ao longo da peça causadas por camadas mais finas ou mais espessas que não serão devidamente sinterizadas ou fundidas, já que os parâmetros do laser permanecem constantes ao longo do processo. Dessa forma, como não foram observados problemas eletrônicos no sistema, isso pode sugerir que há problemas mecânicos, o primeiro é que o fuso pode estar com algum

defeito proveniente de falta de manutenção ou sobrecarga durante a operação e o segundo é que há problemas de rigidez e atrito entre o êmbolo e o cilindro.

Essas hipóteses foram levantadas pois verificou-se ao longo de testes com a máquina que o pó se infiltra entre o êmbolo e o cilindro. Isto somado ao aquecimento da base de fabricação com a lâmpada de infravermelho levou algumas vezes ao sistema travar pelo atrito entre o êmbolo e o cilindro e expansão térmica do êmbolo. Esse travamento acionou o alerta de sobretorque do *servodriver* porém não se sabe se o fuso ou a castanha de esferas foram afetados pelo elevado torque aplicado na castanha e no fuso. Também, durante a manutenção e montagem do eixo, percebeu-se que a chapa em que a castanha de esferas está fixada não possui muita rigidez, pois é notada uma deformação elástica a olho nu na chapa quando o êmbolo trava ou atinge um limite de curso e é feito um esforço mecânico com as mãos para rotacionar o fuso.

A partir do resultado, foram impressas algumas peças a partir de pós de compósitos de metal e polímero e de aço inox. A Figura 20 ilustra um dos resultados obtidos.

Figura 20 – (À esquerda) Filtro metálico fabricado a partir do processo de SLM após a conclusão do trabalho. (À direita) Filtros metálicos fabricados por processo de sinterização convencional.



Fonte: elaborada pelo autor.

7.CONCLUSÃO

Os processos de SLS e SLM apresentados neste trabalho são duas técnicas dentro do escopo da manufatura aditiva, a qual vem ganhando espaço nas indústrias da China, dos E.U.A. e da Alemanha no contexto da indústria 4.0. Como no Brasil o cenário é distinto, trabalhos relacionados à área são importantes para disseminar conhecimento e contribuir para o desenvolvimento tecnológico.

Em termos de desenvolvimento, não houveram grandes desafios para a conclusão deste trabalho. Entretanto, houve a necessidade de revisar com cuidado a teoria da metrologia na bibliografia para projetar o experimento e tratar os dados posteriormente. Através desse processo de revisão, conhecimentos novos foram agregados e consolidados. Além disso, houve a necessidade de buscar orientação e instrumentos de medição para realização dos experimentos. A surpresa esteve em perceber que não seria simples realizar um experimento que obtivesse resultados com informações relevantes, afinal realizar medições com confiabilidade em unidades de micrometros sem a possibilidade de recorrer a máquinas de medição por coordenadas ou outros aparatos de precisão elevada exigiu uma avaliação crítica do que seria razoável medir para aferir causas e efeitos.

Ainda sobre a revisão bibliográfica, não se mostrou trivial a busca por artigos científicos que tratassem de efeitos na variação da espessura de camada e da construção de máquinas de SLM/SLS, portanto foram citados poucos trabalhos relacionados.

Mesmo assim, a partir dos estudos bibliográficos sobre os processos e técnicas da manufatura aditiva e metrologia somados aos conhecimentos agregados ao longo do curso de engenharia mecatrônica, foi possível concluir com êxito os objetivos propostos neste trabalho.

Para finalizar, os resultados encontrados merecem mais estudos e possíveis alterações no projeto da máquina para que a precisão do eixo melhore, permitindo que a máquina produza peças de melhor qualidade. Diante do que foi apresentado, sugerem-se algumas opções para trabalhos futuros:

- a) Substituir o fuso por outro de classe de precisão mais elevada, mudar a rigidez da chapa que fixa a castanha e realizar uma nova avaliação do resultado.

- b) Mapear os erros sistemáticos ao longo de todo o curso do fuso e realizar a correção dos erros sistemáticos via *software*. Alguns testes preliminares mostraram uma flutuação de somente 2 μm ao longo do curso de 10 mm ao aplicar uma correção no comando incremental igual a variação de erro entre dois pontos.
- c) Buscar uma alternativa para de controle de posição que atue diretamente na posição do êmbolo e não indiretamente pelo giro do motor. Pode ser utilizado um *encoder* linear para isso.

REFERÊNCIAS

3D SYSTEMS. **Direct Metal Printers Tech Specs.** 2018. Disponível em: <<https://www.3dsystems.com/3d-printers/prox-dmp-320/specifications>> Acesso: 30/07/2018

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Barueri: Manole, 2013. 408 p., il., 22,5 cm. ISBN 9788520421161.

ARBIX, G.; SALERNO, M. S.; ZANCUL, E.; AMARAL, G.; MELO LINS, L. **O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com a Alemanha, China e Estados Unidos.** Novos Estudos - Cebrap, v. 36, n. 3, 2017. Disponível em: <<http://novosestudos.uol.com.br/produto/109/#5a3416d12d895>>.

BOLTON, W. **Programmable logic controllers.** 5. ed. USA: Elsevier, 2009. 400 p., il. ISBN 9781856177511.

DELTA ELECTRONICS INC. **ASDA-A2 Series: User Manual.** n. 20110128. Taiwan, 2011. 583p.

_____. **DVP-PLC Application Manual: Programming.** n. 20130530. Taiwan, 2013. 754p.

_____. **DVP-SV/SV2: Instruction Sheet.** n. 5011669008-SV10. Taiwan, 2016. 19p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61131-3:** Programmable controllers - Part 3: Programming languages. 2013. 464 p.

SUFIIAROV, V. S.; POPOVICH, A. A.; BORISOV, E. V.; POLOZOV, I. A.; MASAYLO, D. V.; ORLOV, A. V. **The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting.** Procedia Engineering, v. 174, p. 126–134, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.179>>.

SLM SOLUTIONS. **SELECTIVE LASER MELTING MACHINE SLM®280 2.0.** 2018. Disponível em: <<https://slm-solutions.com/products/machines/selective-laser-melting-machine-slmr280-20>> Acesso em: 30/07/2018

SHI, X.; MA, S.; LIU, C.; CHEN, C.; WU, Q.; CHEN, X.; LU, J. **Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V.** Materials, v. 9, n. 12, p. 1–15, 2016.

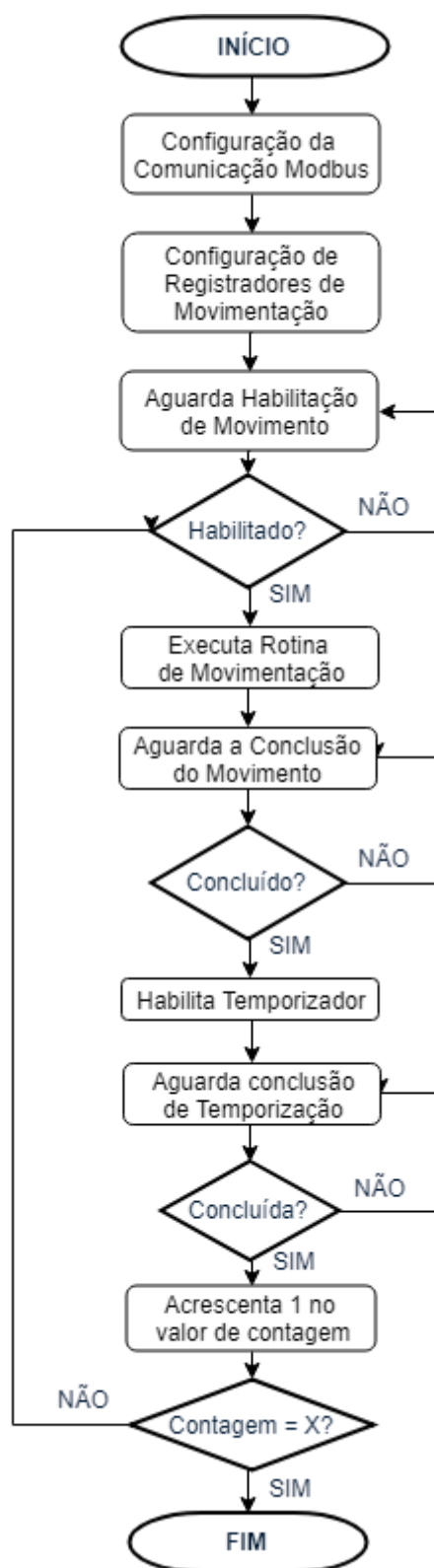
TIWARI, S. K.; PANDE, S. **Material properties and selection for selective laser sintering process.** International Journal of Manufacturing Technology and Management, v. 27, n. 4–6, p. 198–217, 2013.

THK. **Ball Screw General Catalog**. UK, 2015. n. 511E. 474p.

VOLPATO, N. et al. **Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações na impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p., il. ISBN 9788521211501.

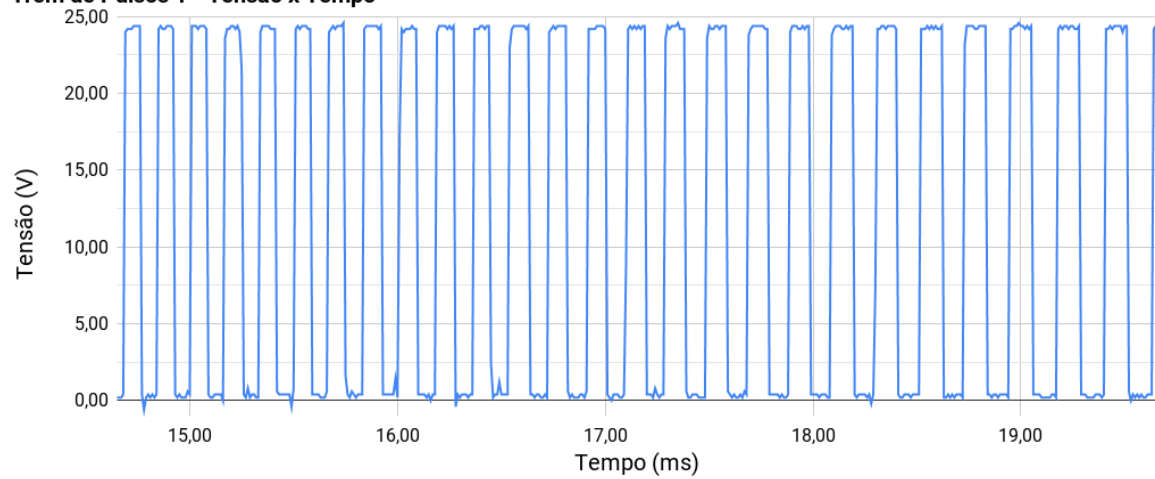
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Chave Geral Contat. Geral Contat. Motor DELTA ASDA-A2 Relé Sensor fim-de-curs Superior Sensor fim-de-curs Inferior PC Esquema Eléctrico Autore: Arthur Kretzer Folha: 1/1																

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DO PROGRAMA ESPECIAL DO CLP

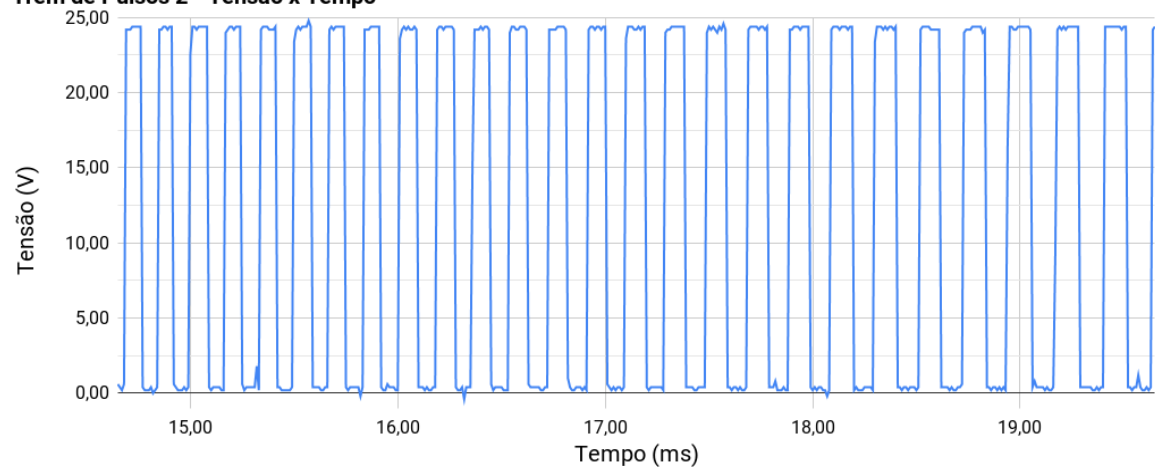


APÊNDICE C – AQUISIÇÕES DOS TRENS DE PULSOS

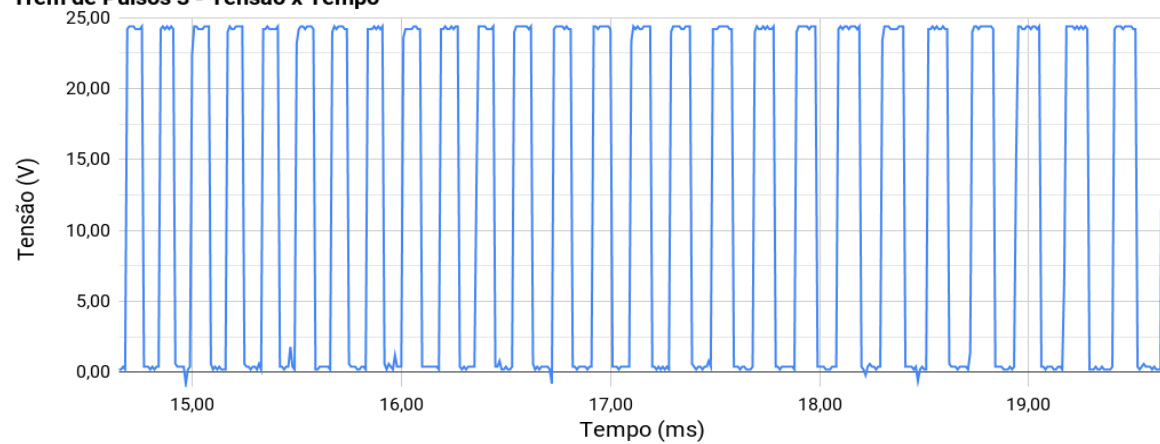
Trem de Pulsos 1 - Tensão x Tempo



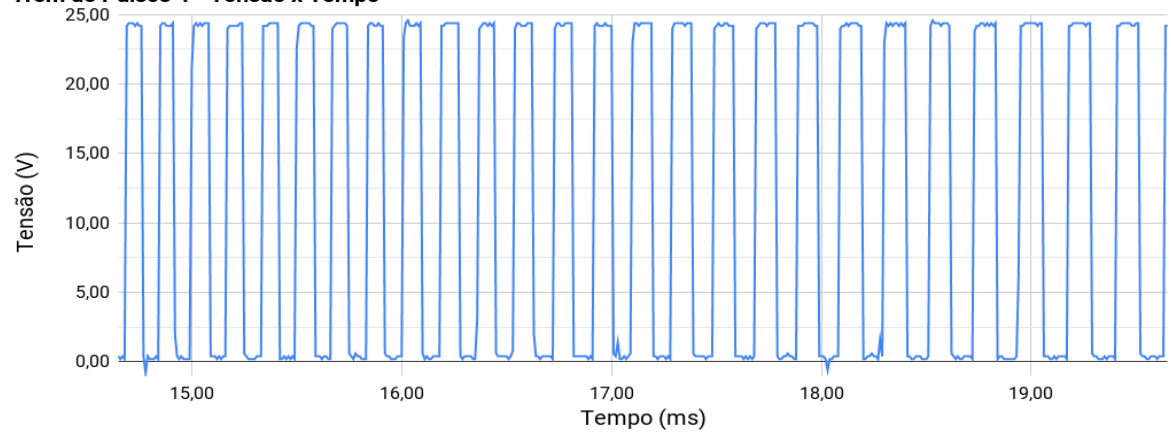
Trem de Pulsos 2 - Tensão x Tempo



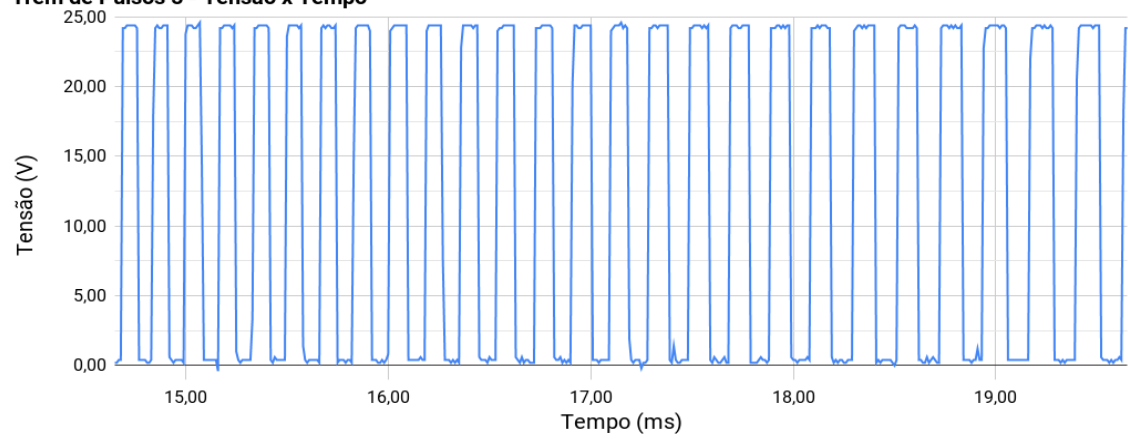
Trem de Pulsos 3 - Tensão x Tempo



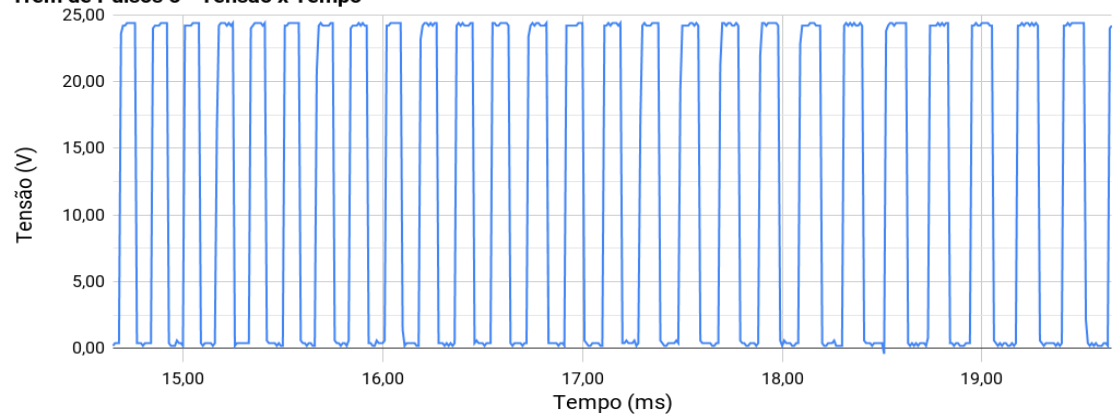
Trem de Pulsos 4 - Tensão x Tempo



Trem de Pulsos 5 - Tensão x Tempo



Trem de Pulsos 6 - Tensão x Tempo



APÊNDICE D – PONTOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
Posição (mm)	Medição (mm)	Medição (mm)	Medição (mm)	Medição (mm)	Medição (mm)
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-0,100	-0,102	-0,102	-0,103	-0,100	-0,101
-0,200	-0,208	-0,208	-0,206	-0,203	-0,203
-0,300	-0,312	-0,312	-0,310	-0,307	-0,307
-0,400	-0,415	-0,413	-0,410	-0,409	-0,414
-0,500	-0,516	-0,513	-0,515	-0,510	-0,515
-0,600	-0,618	-0,616	-0,615	-0,612	-0,618
-0,700	-0,721	-0,718	-0,719	-0,716	-0,719
-0,800	-0,823	-0,820	-0,820	-0,816	-0,822
-0,900	-0,924	-0,921	-0,923	-0,918	-0,923
-1,000	-1,025	-1,021	-1,023	-1,018	-1,024
-1,100	-1,126	-1,122	-1,124	-1,119	-1,125
-1,200	-1,227	-1,225	-1,226	-1,221	-1,226
-1,300	-1,328	-1,324	-1,326	-1,321	-1,326
-1,400	-1,425	-1,423	-1,424	-1,419	-1,425
-1,500	-1,525	-1,521	-1,523	-1,519	-1,524
-1,600	-1,625	-1,620	-1,623	-1,618	-1,625
-1,700	-1,725	-1,721	-1,723	-1,719	-1,724
-1,800	-1,826	-1,823	-1,824	-1,819	-1,825
-1,900	-1,925	-1,921	-1,922	-1,919	-1,925
-2,000	-2,023	-2,020	-2,023	-2,020	-2,021
-2,100	-2,120	-2,119	-2,122	-2,117	-2,119
-2,200	-2,220	-2,217	-2,220	-2,215	-2,218
-2,300	-2,319	-2,316	-2,317	-2,314	-2,317
-2,400	-2,417	-2,414	-2,415	-2,411	-2,415
-2,500	-2,514	-2,513	-2,513	-2,509	-2,512
-2,600	-2,611	-2,611	-2,610	-2,606	-2,609
-2,700	-2,709	-2,707	-2,705	-2,705	-2,705
-2,800	-2,805	-2,804	-2,798	-2,800	-2,801
-2,900	-2,900	-2,899	-2,895	-2,895	-2,897
-3,000	-2,999	-2,997	-2,995	-2,994	-2,996
-3,100	-3,097	-3,097	-3,096	-3,095	-3,097
-3,200	-3,198	-3,197	-3,198	-3,197	-3,198
-3,300	-3,300	-3,298	-3,302	-3,303	-3,305

-3,400	-3,405	-3,402	-3,407	-3,407	-3,408
-3,500	-3,508	-3,507	-3,511	-3,512	-3,511
-3,600	-3,613	-3,610	-3,615	-3,613	-3,613
-3,700	-3,717	-3,715	-3,718	-3,716	-3,716
-3,800	-3,819	-3,817	-3,820	-3,818	-3,817
-3,900	-3,920	-3,918	-3,920	-3,919	-3,917
-4,000	-4,019	-4,016	-4,021	-4,019	-4,018
-4,100	-4,120	-4,119	-4,122	-4,119	-4,118
-4,200	-4,221	-4,218	-4,224	-4,221	-4,220
-4,300	-4,322	-4,318	-4,323	-4,322	-4,321
-4,400	-4,422	-4,420	-4,423	-4,423	-4,422
-4,500	-4,523	-4,520	-4,524	-4,521	-4,523
-4,600	-4,624	-4,622	-4,623	-4,621	-4,622
-4,700	-4,725	-4,722	-4,723	-4,721	-4,721
-4,800	-4,824	-4,823	-4,824	-4,823	-4,823
-4,900	-4,927	-4,925	-4,925	-4,923	-4,924
-5,000	-5,027	-5,026	-5,026	-5,025	-5,023
-5,100	-5,126	-5,121	-5,126	-5,125	-5,123
-5,200	-5,226	-5,221	-5,227	-5,225	-5,225
-5,300	-5,327	-5,326	-5,329	-5,327	-5,326
-5,400	-5,429	-5,428	-5,431	-5,428	-5,428
-5,500	-5,529	-5,529	-5,532	-5,530	-5,528
-5,600	-5,630	-5,630	-5,632	-5,629	-5,629
-5,700	-5,732	-5,731	-5,732	-5,729	-5,728
-5,800	-5,832	-5,832	-5,833	-5,830	-5,830
-5,900	-5,935	-5,933	-5,933	-5,932	-5,931
-6,000	-6,035	-6,033	-6,033	-6,033	-6,032
-6,100	-6,133	-6,131	-6,132	-6,132	-6,131
-6,200	-6,233	-6,233	-6,232	-6,231	-6,231
-6,300	-6,333	-6,332	-6,332	-6,331	-6,331
-6,400	-6,431	-6,430	-6,430	-6,430	-6,430
-6,500	-6,528	-6,528	-6,529	-6,528	-6,528
-6,600	-6,626	-6,626	-6,626	-6,625	-6,625
-6,700	-6,725	-6,725	-6,726	-6,725	-6,724
-6,800	-6,825	-6,825	-6,824	-6,823	-6,822
-6,900	-6,926	-6,924	-6,923	-6,921	-6,922
-7,000	-7,024	-7,022	-7,021	-7,019	-7,021
-7,100	-7,121	-7,121	-7,119	-7,116	-7,118

-7,200	-7,219	-7,220	-7,218	-7,215	-7,216
-7,300	-7,317	-7,319	-7,316	-7,315	-7,314
-7,400	-7,415	-7,417	-7,415	-7,412	-7,414
-7,500	-7,514	-7,514	-7,513	-7,510	-7,512
-7,600	-7,612	-7,611	-7,609	-7,606	-7,608
-7,700	-7,708	-7,707	-7,705	-7,702	-7,705
-7,800	-7,803	-7,802	-7,802	-7,796	-7,799
-7,900	-7,898	-7,897	-7,901	-7,895	-7,895
-8,000	-7,995	-7,994	-7,997	-7,994	-7,993
-8,100	-8,094	-8,095	-8,097	-8,094	-8,094
-8,200	-8,195	-8,196	-8,197	-8,197	-8,195
-8,300	-8,300	-8,302	-8,300	-8,302	-8,300
-8,400	-8,409	-8,407	-8,404	-8,408	-8,406
-8,500	-8,513	-8,511	-8,510	-8,513	-8,511
-8,600	-8,613	-8,613	-8,614	-8,613	-8,613
-8,700	-8,712	-8,713	-8,715	-8,717	-8,713
-8,800	-8,812	-8,814	-8,817	-8,816	-8,813
-8,900	-8,915	-8,914	-8,917	-8,917	-8,914
-9,000	-9,016	-9,014	-9,018	-9,017	-9,015
-9,100	-9,116	-9,115	-9,119	-9,117	-9,116
-9,200	-9,217	-9,216	-9,217	-9,217	-9,214
-9,300	-9,316	-9,315	-9,316	-9,315	-9,315
-9,400	-9,417	-9,417	-9,418	-9,417	-9,415
-9,500	-9,519	-9,517	-9,519	-9,518	-9,517
-9,600	-9,618	-9,617	-9,619	-9,618	-9,617
-9,700	-9,718	-9,716	-9,719	-9,717	-9,717
-9,800	-9,818	-9,816	-9,818	-9,819	-9,817
-9,900	-9,918	-9,917	-9,920	-9,919	-9,917
-10,000	-10,017	-10,018	-10,021	-10,018	-10,017