

Leandro Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE SERVOACIONAMENTOS PARALELOS
PARA UM MANIPULADOR CARTESIANO DE GRANDE PORTE
PARA APLICAÇÕES LASER**

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

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner,
Dr. –Ing.

Florianópolis
2014

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

Schmitz, Leandro
DESENVOLVIMENTO DE SERVOACIONAMENTOS
PARALELOS PARA UM MANIPULADOR CARTESIANO DE
GRANDE PORTE PARA APLICAÇÕES LASER / Leandro Schmitz;
orientador, Walter Lindolfo Weingaertner. - Florianópolis, SC, 2014.
155 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Sincronização de servoacionamentos paralelos. 3. Sistema de movimentação de grande porte. 4. Erros e ensaios geométricos para sistemas de movimentação. 5. Ensaios com sistema de medição de trajetórias circulares.

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

Leandro Schmitz

**DESENVOLVIMENTO DE SERVOACIONAMENTOS PARALELOS
PARA UM MANIPULADOR CARTESIANO DE GRANDE PORTE
PARA APLICAÇÕES LASER**

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, Julho de 2014.

Prof. Armando Albertazzi Goncalves Junior, Dr Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

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

Prof.º André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof.º Fernando Antonio Forcellini, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos que
direta ou indiretamente me apoiaram
durante esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por minha saúde, pelo cuidado com minha família, pelos meus amigos, pelos dons que me foram concedidos, pelos relacionamentos e oportunidades que possibilitaram o meu crescimento.

Aos meus pais, Joe Schmitz e Orcélia Schmitz, por todo amor, incentivo e investimento depositados em mim, os quais viabilizaram meus estudos.

Aos meus irmãos Walison Schmitz e Thiago Schmitz, pela paciência e apoio durante o trabalho.

Um agradecimento muito especial a Morgana Pereira Souza, pelo amor que me motivou e fortaleceu nesta caminhada, com todo seu carinho, paciência e cuidado.

Ao meu orientador, Walter Lindolfo Weingaertner por me conceder esta oportunidade, confiar e orientar-me neste trabalho.

A equipe do LMP LASER pelo apoio técnico e ajuda, fundamental no desenvolvimento deste trabalho. Equipe esta que se fortalece a cada trabalho finalizado.

Aos Mestrandos Ismael Elias Lutz, Bernardo Rachadel, Dyonad Scolaro e Cláudio Silveira por toda a ajuda e amizade.

Aos bolsistas e pesquisadores Larissa Santana, Artur Schutz, Victor Sanchez, Bruno Alves, Jordana Carvalho.

Aos técnicos do USICON: Hélio, Valtair e Joe e o bolsista Thiago dias pela ajuda na construção dos aparatos e apoio técnico.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por me conceder esta oportunidade de aprimoramento técnico e acadêmico.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro concedido durante esse período.

A todos que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

(José de Alencar)

RESUMO

Atualmente, existe uma grande expectativa com relação ao avanço tecnológico dos processos LASER e de seus sistemas de movimentações, em diversas áreas. Este trabalho tem como objetivo avaliar aspectos relacionados à precisão e dinâmica de movimento de um sistema de movimentação cartesiano de 2 ½ coordenadas de grande porte. Para isto, foram estudados, desenvolvidos e aplicados métodos e dispositivos de medição que proporcionassem avaliar os sistemas de movimentação, a fim de, conhecer as condições e características mecânicas e de movimentação do sistema. Com base nos resultados levantados e na literatura estudada, avaliaram-se aspectos relacionados à estrutura mecânica do sistema de movimentação, bem como das soluções de acionamentos utilizadas. Estes resultados mostraram que o sistema de movimentação não apresentava características compatíveis com as aplicações LASER planejadas. Buscou-se então, soluções de retrofitting que proporcionassem as melhorias necessárias, visando atender às necessidades de aplicações LASER de baixas e médias velocidades. Dentre as soluções adotadas estão o desenvolvimento de um servoacionamento paralelo para a movimentação de um portal, bem como o remodelamento necessário na solução de comando e controle e o aumento da rigidez estrutural do sistema. Após a implementação das melhorias cabíveis ao sistema de movimentação, foram realizados novos ensaios avaliando a exatidão de posicionamento e a dinâmica de movimento.

Palavras-chave: servoacionamento paralelo, sistema de movimentação, aplicações LASER, erros geométricos.

ABSTRACT

Concerning the technological advancement of machines and laser procedures, nowadays, there is great expectation in several areas. This paper aims to examine, evaluate and enhance the characteristics of a large motion system 2 ½ coordinates servo driven, designed to be used to moving a LASER head, in applications of low and medium speeds. The main mechanical structure, originally designed to be used in a printer, had no dynamic characteristics compatible with the desired laser applications. The drive system has been redesigned to integrate one second synchronized servo, main axis of the portal. There were designed and fabricated mechanical required components and remodeled solutions for commanding and controlling the machine. Were studied, developed and applied methods for evaluating positioning systems, in order to know the conditions and characteristics of the system. Based on the results and the literature studied, were designed and implemented the necessary solutions for the improvement of the characteristics of movement and positioning system. After that, new tests were conducted to compare with previous results. Based on these, it was concluded, that after modifying and implementing the positioning system, it complies with the requirements of laser applications for low and medium speeds.

Keywords: servodrive, motion system, LASER, geometric errors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Velocidade de soldagem x Penetração (para escoamento axial rápido, LASER CO ₂).	14
Figura 2 - Braço robótico com cabeçote LASER alimentado por fibra óptica.	17
Figura 3 - Concepções mecânicas de cinemática em serie convencionais	21
Figura 4 - Portal móvel e mesa fixa.	22
Figura 5 - Portal fixa e mesa móvel.	23
Figura 6 - Máquina de coluna móvel.	23
Figura 7 - Portal elevado.	24
Figura 8 - Cinemática paralela.	25
Figura 9 - Concepção de cinemática "híbrida" Tricept	26
Figura 10 - Cinemática "híbrida" Tricept acoplada a um portal elevado.	26
Figura 11 - Relações que envolvem a qualidade de uma máquina-ferramenta.	28
Figura 12 - Influências sobre a precisão e qualidade de uma peça usinada.	28
Figura 13 - Diferentes formas de reforços para o projeto de colunas de máquinas	32
Figura 14 - Teste de rigidez estrutural	33
Figura 15 - Servoacionamento em malha fechada.	35
Figura 16 - Servomotor brushless DC.	35
Figura 17 - Funcionamento interno de um <i>resolver</i>	37
Figura 18 - Fatores perturbadores do comportamento geométrico de uma máquina ferramenta.	39
Figura 19 - Erros geométricos para um eixo de movimentação	41
Figura 20 - Efeitos dos erros geométricos em uma trajetória hipotética	41
Figura 21 - Ensaio com interferômetro LASER	43
Figura 22 - Aplicação do LASER de alinhamento em ensaios de retilidade.	44
Figura 23 - Padrões corporificados e comparador	44
Figura 24 - Ensaio dinâmico de interpolação circular com BallBar®.	45
Figura 25 - Teste com sistema Grid Encoder®	46
Figura 26 - Protótipo do sistema impressor de formato extra-largo.	49
Figura 27 - Represetnação esquemática da estrutura mecânica original do sistema de movimentação	51
Figura 28 - Dispositivos auxiliares na montagem dos componentes do sistema de movimentação	52
Figura 29 - Perfil de Al 160x80	52
Figura 30 - Guias lineares cilíndricas com castanha de esferas recirculantes	53
Figura 31 - Eixo Y e módulo de transmissão	54
Figura 32 - Estrutura mecânica do conjunto impressor (eixo X em destaque)	55
Figura 33 - Servoconversor e servomotor SCA 04	56
Figura 34 - Placa de controle de movimento PCI-7344.	59
Figura 35 - CNC Fanuc de arquitetura fechada.	59
Figura 36 - CNC baseado em PC utilizando MACH3	61
Figura 37 - Diagrama de sinais simplificado (lógica de acionamento)	65
Figura 38 - Placas para o comando e controle dos servoacionamentos	66

Figura 39 - Quadro elétrico	67
Figura 40 - Caneta montado no carro “Y” e quadro branco	69
Figura 41 – Dispositivo para a fixação de uma caneta esferográfica no carro do eixo “X”.....	70
Figura 42 – Resultados dos ensaios de deslocamento como função da velocidade de deslocamento	71
Figura 43 - Trajetória impressa (comprimento de reta).	72
Figura 44 - Ensaio para avaliar a flexão do portal	75
Figura 45 –Resultados gráficos dos ensaios de trajetória interpoladas (inspeção visual).....	77
Figura 46 - O efeito da flexão do portal se agrava pela influência exercida sobre o PID.	78
Figura 47 -LASER auto nivelador sobrepondo a trajetória dos eixos (teste de perpendicularidade).	79
Figura 48 – Fixação do sistema de movimentação na estrutura de aço do teto do laboratório	81
Figura 49 - Sapata de fixação no sistema de movimentação nos perfis estruturais de aço do teto	82
Figura 50 - Concepções de montagem do sistema de movimentação.	86
Figura 51 - Portal biacionado por transmissão mecânica.....	87
Figura 52 - Solução adotada para a melhoria do sistema de movimentação.....	88
Figura 53 – Carcaça para o segundo acionamento do eixo X	89
Figura 54 – Componentes internos da transmissão para o eixo X	89
Figura 55 – Vistas do acionamento	90
Figura 56 - Base do eixo X (destaque para fixadores da correia)	91
Figura 57 - Leitura dos trens de pulsos no osciloscópio.	92
Figura 58 – Ensaios de trajetória (impressão de linhas e arcos) no quadrantes 1	95
Figura 59 – Detalhe ampliado na origem (ponto A).....	96
Figura 60 - Detalhe ampliado nas regiões de sobreposição das linhas	96
Figura 61 - Ponto B em evidência.	97
Figura 62 - Ensaios de trajetória impressa (com a figura rotacionada em 90 ⁰ para a direita).....	97
Figura 63 - Zoom na área analisada (ponto A, eixos invertidos)	98
Figura 64 - Zoom na área analisada (retas sobrepostas eixos invertidos)	98
Figura 65 - Quadrados com círculos circunscritos.....	99
Figura 66 – Trajetórias circulares nos quadrantes I e IV.	100
Figura 67 - Testes de quadros com círculos circunscritos	103
Figura 68 – Ensaios de movimentos circulares (comparação dos resultados obtidos após os ajustes PID).....	104
Figura 69 - Exemplos de resposta para diferentes ajustes PIDs.....	105
Figura 70 - Sistema de medição desenvolvido.	108
Figura 71 - Gráfico gerado no teste de repetibilidade.....	109
Figura 72 - Ampliação do gráfico gerado no teste de repetibilidade	110

Figura 73 - Aparato para a comparação de trajetórias circulares programadas com trajetórias circulares de raios pré-estabelecidos (pivot central).....	114
Figura 74 - Sistema de comparação de trajetórias circulares	115
Figura 75- Detalhes da preparação do sistema de medição para os testes.	116
Figura 76 – Resultados da medição comparativa de trajetória circular.....	117
Figura 77 – Resultados da medição comparativa de trajetória circular em detalhe (escala ampliada)	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variações no projeto de estruturas longitudinais de máquinas.	31
Tabela 2 - Soluções x Requisitos.	62
Tabela 3 - A influência dos ganhos KP, KI e KD.....	68
Tabela 4 - Teste de repetibilidade (velocidade e distância fixa).....	112
Tabela 5 - Teste de repetibilidade (velocidade fixa e distância variável)	112
Tabela 6 - Teste de repetibilidade (distância fixa e velocidade variável)	113
Tabela 7 - Teste de medição de circularidade.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP - Controlador lógico programável
CNC - Comando numérico computadorizado
DFMA - *Design for manufacturing and assembly*
DSP - *Digital signal processing*
FPGA - *Field-programmable gate array*
HPFL - *High power fiber LASER*
IHM - Interface Humano máquina
LASER - *Light Amplification by Stimulated of Radiation.*
LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão
LHW - Laboratório de Hardware
NCK - *Numeric control kernel*
PC - *Personal computer*
PCI - Placa de circuito impresso
PID - Controlador proporcional integral derivativo
USICON - Laboratório de usinagem e comando numérico
BLDC- *Brushless Direct current*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.1.3 <i>Contribuições</i>	5
1.1.4 <i>Metodologia</i>	6
1.1.5 <i>Estrutura do trabalho</i>	7
2 ESTADO DA ARTE	8
2.1 O LASER	8
2.2 OS PROCESSOS LASER	11
2.2.1 <i>Soldagem LASER</i>	11
2.2.2 <i>Corte LASER</i>	14
2.3 AS MÁQUINAS LASER	16
2.4 SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO	19
2.4.1 <i>Introdução</i>	19
2.4.2 <i>Sistemas de movimentações de grande porte</i>	21
2.4.3 <i>Aspectos relacionados projetos de máquinas</i>	27
2.4.3.1 <i>Fundação e estrutura de máquinas</i>	29
2.4.4 <i>Acionamentos elétricos</i>	33
2.4.4.1 <i>Servoacionamentos</i>	34
2.4.5 <i>Sistemas de medição</i>	36
2.4.6 <i>Controle PID</i>	37
2.5 ERROS E ENSAIOS GEOMÉTRICOS PARA SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO.	38
2.6 A IMPORTÂNCIA DESTA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	47
3 DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	49
3.2 MONTAGEM DA MÁQUINA.....	51
3.2.1 <i>Detalhes mecânicos da máquina</i>	52
3.3 COMANDO E CONTROLE	56
3.3.1 <i>IMPLEMENTAÇÃO DO COMANDO E CONTROLE</i>	63
3.3.2 <i>O QUADRO ELÉTRICO</i>	66
3.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO COMANDO E CONTROLE	68
4 ENSAIOS GEOMÉTRICOS E ANÁLISES NO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	74

4.1 ENSAIOS E ANÁLISE DE ASPECTOS MECÂNICOS.....	74
4.2 ENSAIOS E ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS IMPRESSAS	76
4.3 PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA MINIMIZAR OS ERROS DE MOVIMENTAÇÃO	79
4.3.1 Aumento de Rigidez da Estrutura da base do sistema de movimentação.....	80
4.3.2 Rigidez estrutural do eixo Y (flexão do portal).....	84
4.4 ENSAIOS DE TRAJETÓRIAS E ANÁLISES PARA O ACIONAMENTO SINCRONIZADO DO EIXO X.....	93
4.5 ENSAIOS DE EXATIDÃO DE POSICIONAMENTO E REPETIBILIDADE...	107
4.6 ENSAIOS COM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TRAJETÓRIAS CIRCULARES	113
5 CONCLUSÕES.....	120
5.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO	120
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

Observa-se na atualidade, uma grande expectativa com relação ao avanço tecnológico das máquinas e dos processos LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) em diversas áreas. Dentro deste imenso universo de aplicações, onde cada processo necessita de máquinas com características de movimentação diferentes, os sistemas de movimentação de grande porte aliados a fontes LASER de grande potência, vêm sendo aplicados e se destacando em uma vasta gama de processos da manufatura industrial, nas mais diversas aplicações. Destacam-se aplicações, como: soldagem, revestimento, tratamento térmico, modificação da composição da camada limite, corte e gravação. Encontram-se exemplos, em diversas áreas: processamento de chapas metálicas, chassis e gabinetes elétricos, fabricação de elevadores, máquinas da indústria alimentícia, equipamentos de proteção ambiental, indústria aeroespacial, fabricação de máquinas, indústria naval, tubulação de óleo, máquinas agrícolas, construção de pontes, máquinas de fabricação, dentre outras.

Empresas como a Boeing, Airbus, Bombardier e Embraer já aplicam processos LASER nas linhas de fabricação de seus aviões. Estas empresas desenvolvem suas tecnologias com o apoio de centros de pesquisa em LASER, os quais aprimoram as tecnologias de fabricação empregadas nas suas linhas produção visando adquirir e aprimorar o conhecimento e reduzir o custo de fabricação (CIMM, 2007); (IEAV; INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS, 2007). No Brasil o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias inovadoras a LASER é recente. Com a implementação de um laboratório de tecnologias LASER de fontes de elevada potência no LMP, será possível oferecer o conhecimento necessário para integrar o LASER na manufatura da indústria brasileira, bem como uma ampla capacitação de engenheiros e técnicos para indústria e laboratórios de pesquisa.

As principais aplicações do LASER na indústria nacional hoje se resumem em aplicações de corte e gravação. Para estas aplicações a tecnologia de processo está bastante desenvolvida e a indústria adquire equipamentos prontos para o uso (*plug and play*). As demais áreas necessitam de aprimoramento específico para cada aplicação e requerem conhecimento profundo para o sucesso da aplicação. Em alguns países o LASER, além do setor aeroespacial, também é aplicado em grande escala na manufatura, nos setores de metalmecânica, indústria naval e automobilística.

O estudo e aprimoramento dos processos e das máquinas que realizam os processos acima citados é uma necessidade para a otimização dos mesmos. Os sistemas de movimentação que constituem estas máquinas LASER necessitam de características e desempenhos diferentes dependendo do processo. Por exemplo, em um processo de soldagem a LASER de grande porte, as velocidades de deslocamento utilizadas são da ordem de 1 a 3 m/min, bem menores que em um processo de corte, onde as velocidades de deslocamento atingem valores de 10 m/min e para chapas finas, valores ainda maiores. Para alguns processos, como por exemplo, a gravação ou marcação, as velocidades de deslocamento relativo entre fonte e componente são ainda maiores, chegando a 500 m/min, necessitando de sistemas de movimentações específicos (scanner), que proporcionem estas grandes acelerações e velocidades. Todos estes processos, independente das velocidades de trabalho precisam garantir a precisão de posicionamento e trajetórias executadas dentro de tolerâncias pré-estabelecidas.

Outro aspecto muito relevante, quando se fala em LASER, está relacionado ao tipo de LASER empregado.

Os principais LASERs de elevada potência são os LASER CO₂, Nd: YAG, o LASER de disco e o LASER de fibra. O LASER CO₂ foi o primeiro LASER de elevada potência empregado na indústria. O LASER de fibra e o LASER de disco oferecem uma série de vantagens quando comparados aos LASERs de dióxido de carbono (CO₂) e o de neodímio: YAG (Nd: YAG) tradicionalmente empregados na indústria. Sua eficiência energética é superior à 25%, o que implica num menor custo de energia, lembrando que os outros tipos de LASER possuem eficiência inferior a 10%. Um diferencial para o LASER de fibra é referente à qualidade do feixe de radiação em (T00), com distribuição quase gaussiana, que possibilita um diâmetro focal menor, elevando a intensidade da luz, aumentando a precisão e diminuindo a perda de material durante o corte.

O Laboratório de Mecânica de Precisão LMP, no escopo do projeto CTPETRO Rede Metalúrgica, adquiriu um LASER de fibra da empresa IPG Photonics de 10 KW de potência. O feixe é obtido pelo bombeamento por diodos laser para uma fibra dopada com itérbio e conduzido por uma fibra óptica para o cabeçote. Além do LASER de fibra o LMP possui um LASER Nd: YAG Roffin Simar de 500 W e um Laser CO₂ Trumph de 1.200 W. Os distintos processos que podem empregar estas fontes LASER requerem sistemas de movimentação específicos em coordenadas cartesianas e coordenadas polares.

Ao longo dos últimos anos o LMP em cooperação com o LHW (Laboratório de *Hardware* do EMC UFSC) desenvolveu diversos sistemas de posicionamento eletronicamente controlados, destacando-se um sistema de posicionamento de ultraprecisão (Tese Rodrigo Lima Stoeterau) e um sistema de posicionamento de coordenadas polares (Dissertação de Berdardo Rachadel). Haja vista a necessidade atual do LMP de um sistema de posicionamento de grande porte para a movimentação do cabeçote LASER. E considerando que o LHW desenvolveu um sistema de duas coordenadas (Raster extra largo) de grande porte para aplicação de impressão. Este sistema foi cedido ao LMP para movimentação do cabeçote LASER. As dimensões do sistema de movimentação (1,3 x 3 m) oferecem uma solução muito interessante do ponto de vista econômico e técnico para aplicações LASER de baixa e média velocidade de deslocamento.

1.1 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento do projeto foram caracterizados os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar aspectos relacionados à precisão e dinâmica de movimento de um sistema de movimentação cartesiano de 2 ½ coordenadas de grande porte, a fim de conhecer e verificar se suas condições são compatíveis com as aplicações LASER planejadas para o mesmo. Caso as condições não sejam compatíveis, buscar-se-á soluções mecatrônicas que proporcionem melhorias e viabilizem que o sistema atenda aos requisitos das aplicações planejadas. Para posteriormente empregá-lo na movimentação de um cabeçote LASER no LMP.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visto que as aplicações LASER de grande porte são atividades recentes, é compreensível a existência de uma lacuna de informações no que diz respeito a métodos e dispositivos de avaliação de movimentação. Bem como informações relacionadas a concepções mecânicas.

Como objetivos específicos, primeiramente propõe-se realizar um estudo sobre métodos e dispositivos de medições de sistemas de

movimentação. Com o propósito de empregar estes conhecimentos no desenvolvimento de métodos e dispositivos de medições para as avaliações das condições atuais do sistema de movimentação.

Serão estudados também, aspectos relacionados à estrutura mecânica e concepções de máquinas de médio e grande porte, disponíveis no mercado e na literatura. Para conhecer as capacidades, deficiências e limitações de sistemas de movimentações destas categorias.

Buscar-se-á realizar ensaios com rotinas de trajetórias específicas para parâmetros variáveis de entrada (velocidade, aceleração, distâncias), que simulem condições similares às aplicações LASER planejadas.

Com base nos estudos e análises dos resultados dos ensaios, será possível julgar se o sistema avaliado atende aos requisitos das aplicações LASER planejadas. Caso não atenda, será feita uma análise relacionada a aspectos mecânicos do sistema de movimentação, bem como das soluções mecatrônicas adotadas. Visando levantar possíveis deficiências do sistema.

Para melhor entendimento das atividades que compõem o objetivo geral, este foi subdividido em objetivos específicos, os quais seguem a baixo.

- a) Estudar métodos e dispositivos de avaliação da precisão de movimentação para sistemas de movimentação.
- b) Pesquisar estruturas mecânicas e concepções de sistemas de movimentações, disponíveis no mercado e na literatura, para aplicações LASER de grande porte;
- c) Com base nas aplicações LASER planejadas, estabelecer as especificações meta do sistema de movimentação a ser avaliado;
- d) Avaliar a precisão de posicionamento e dinâmica de movimento do sistema de movimentação no estado atual;
- e) Com base nas avaliações realizadas, julgar para que aplicações LASER o sistema de movimentação é adequado, ou buscar soluções mecatrônicas para adequá-lo a tais aplicações, caso seja necessário;

1.1.3 Contribuições

Em um âmbito geral, este trabalho visa expandir os conhecimentos relacionados aos métodos e dispositivos de avaliação de sistemas de movimentação de grande porte. Bem como, fazer um

levantamento das concepções estruturais destes sistemas (comerciais e literatura).

Realizando a avaliação do sistema de movimentação e conhecendo a suas condições de trabalho, isto dará viabilidade e informações fundamentais para o planejamento de pesquisas e desenvolvimento em aplicações LASER voltadas para a manufatura. Além de estimular o desenvolvimento e aprimoramento de processos e novas tecnologias, através de parcerias com as indústrias.

1.1.4 Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho envolve uma série de atividades planejadas com base em estudos realizados sobre o assunto. Cada atividade segue uma sequência de etapas padronizadas para todas as a atividades em questão. Estas etapas padronizadas seguem rotinas de avaliações, desenvolvimento de soluções e posterior avaliação das soluções desenvolvidas. As atividades contam com metas estabelecidas para o final de cada etapa, quando se faz necessário tomar decisões para implementar a etapa seguinte. Por último deve ser avaliada a concepção final do sistema de movimentação em duas coordenadas.

A sequência de atividades previstas para o desenvolvimento do trabalho segue a baixo:

- a) Estudo para o embasamento teórico de métodos e dispositivos de avaliação de sistemas de movimentação e concepções de máquinas.
- b) Estabelecimento de características geométricas a serem cumpridas pelo sistema de movimentação, nas aplicações LASER planejadas;
- c) Avaliação do sistema de movimentação disponibilizado pelo LHW;
 1. Avaliação visual do sistema mecânico;
 2. Avaliação dos acionamentos elétricos;
 3. Avaliação do comando e controle.
- d) Manutenções mecatrônicas necessárias para o funcionamento do sistema de movimentação, bem como ajustes e aferições das características do servoacionamento;
- e) Avaliação geométrica de precisão de posicionamento e dinâmica de movimento do sistema de movimentação;
- f) Com base nos resultados e análises dos ensaios realizados, julgar quais aplicações LASER planejadas

são atendidas pelas condições atuais do sistema de movimentação.

- g) Caso haja a necessidade de melhorias das características proporcionadas pelo sistema de movimentação, buscar soluções mecânicas que possibilitem as melhorias necessárias.

1.1.5 Estrutura do trabalho

Capítulo 2 - Estado da arte: Este capítulo aborda de forma sucinta aspectos relativos a processos e máquinas LASER, os quais darão embasamento para a execução deste trabalho. Também aborda características de sistemas de posicionamento de grande porte como: aspectos ligados a projetos de máquinas, servoacionamentos e metodologias de ensaios e erros geométricos.

Capítulo 3 - Sistema de movimentação: Este capítulo apresenta a montagem das partes mecânicas e adequações de comando e controle necessárias para o funcionamento do sistema de movimentação: Apresenta também, um levantamento das características da máquina em questão neste trabalho. Apresenta e analisa detalhes das partes mecânicas e de comando e controle. Mostra as implementações realizadas para viabilizar o funcionamento.

Capítulo 4 - Ensaios geométricos e análises: Este capítulo apresenta os ensaios geométricos realizados no sistema de movimentação e respectivas análises. Com bases nestas análises, resume os problemas encontrados e apresenta soluções. Mostra as soluções implementadas e apresenta os novos resultados de ensaios e análises.

Capítulo 5 - Conclusões: Com base na metodologia abordada e nos ensaios e análises realizadas são apresentadas as conclusões, considerações gerais e pontuais, e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

Com o objetivo de contextualizar e reunir conhecimentos pertinentes ao trabalho, este capítulo abordará informações relevantes das áreas que este trabalho irá explorar.

Considerando que o foco desta pesquisa é a avaliação das características de sistemas de movimentação de grande porte, para a validação do mesmo em aplicações LASER de baixas e médias velocidades, serão abordados aspectos relacionados aos processos LASER planejados, métodos e dispositivos de avaliação para sistemas de movimentação e as partes que compõem um sistema de movimentação mecatrônico.

2.1 O LASER

LASER é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated of Radiation*.

O conceito fundamental da operação a LASER, a Emissão estimulada, foi introduzido pela primeira vez por Einstein em 1917, em um de seus três trabalhos sobre a teoria quântica da radiação. Quase meio século depois, em 1960, T. H. Maiman usando um cristal de rubi demonstrou o primeiro trabalho LASER ao mundo.

Atualmente o LASER é encontrado em quase todos os campos de aplicações, como por exemplo: na medicina, na eletrônica, nas telecomunicações, na fabricação, entre outros, onde uma ou mais propriedades da radiação LASER são importantes (DAHOTRE; HARIMKAR, 2008).

O LASER é um dispositivo que gera um feixe de luz monocromática coerente praticamente colimado de energia luminosa, que por si só tem potencial limitado. No entanto, quando o feixe é dirigido, manipulado e focado em relação a uma peça de trabalho, ele tem uma consistência que faz com que seja ideal para processamento automatizado (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

O LASER industrial é predominantemente uma fonte de calor concentrada. Ela pode ser contínua ou pulsada. Dependendo da energia que é fornecida de forma continuada bem como da duração e da intensidade de pulsos, as aplicações são múltiplas e necessitam de sistemas de movimentação específicos. Isto torna o LASER uma "ferramenta flexível". O feixe de luz, com propriedades únicas, pode ser controlado com precisão. Pode ser focalizada num pequeno ponto,

proporcionando uma fonte com densidade de energia intensa que pode promover um aquecimento intenso em materiais, ou se espalhar em um padrão difuso de aquecimento para tratamento de superfícies. Para pulsos extremamente curtos a interação entre os fótons do feixe de LASER e os átomos do material permite que os processos sejam realizados sem aquecimento de regiões adjacentes às regiões tratadas. O feixe pode ser manipulado com os componentes ópticos para realizar uma série de operações, simultaneamente, ou ligado entre os locais de processamento sequencial. O LASER proporciona, assim, oportunidades para a inovação no processamento de materiais. (ION, 2005).

Segundo (STEEN; MAZUMDER, 2010), para o processamento de materiais os sistemas mais populares são CO₂, Nd: YAG, de disco e de fibra.

LASERS de estado sólido bombeados por lâmpadas (*Lamp-pumped*) foram desenvolvidas no início da história dos LASERS. Devido às limitações físicas dos bastões dos ressonadores empregados, a potência era limitada e por alguns anos a tecnologia de LASERS de estado sólido não avançou muito. Nos últimos anos aconteceram mudanças que contribuíram para um rápido desenvolvimento, principalmente o desenvolvimento de LASERS de estado sólido bombeados por diodos laser (semicondutores *diode-pumped*). Devido ao princípio de funcionamento destes diodos emissores de luz LASER, estes dispositivos oferecem uma capacidade de eficiência muito maior e tamanho menor do que os LASERS de potência de saída semelhante bombeados por lâmpada. A eficiência por sua vez, reduz a quantidade de calor que tem de ser removida, de modo que os equipamentos acessórios, tal como os trocadores de calor refrigeradores são também muito mais compactos. Modelos comerciais de LASERS de estado sólido bombeados por diodos têm sido disponibilizados para a compra nos últimos anos. Nestes, destacam-se os LASER de fibra e os LASER de disco. Sua potência de saída tem aumentado progressivamente (READY, 1997). Segundo a IPG, a limitação superior é regida apenas pelo mercado.

A radiação LASER gerada por um ressonador de um LASER de estado sólido e a emitida por um diodo tem propriedades diferentes, devido às características dos feixes. Embora os comprimentos de onda de um Laser Nd: YAG e de um LASER de fibra de Itérbio sejam praticamente iguais, devido às dimensões do ressonador de um LASER YAG bombeado por lâmpadas, o feixe apresenta uma distribuição de intensidade não gaussiana, ao passo que o laser de fibra apresenta uma distribuição gaussiana (T00). As principais vantagens de LASERS de

fibra bombeados por diodo em comparação com Nd: YAG é um tamanho menor e uma eficiência de tomada muito maior (ou seja, o quanto da rede elétrica é convertida em potência do LASER), (HERRMANN et al., 2012).

Cabos de fibra óptica são usados juntamente com LASERs para transmitir informações digitais para locais remotos. Além de seu uso em telecomunicações *Lightwave*, eles têm sido utilizados para muitas outras aplicações, tais como a condução de feixes LASER para o processamento de materiais e como sensores.

A fibra óptica é uma guia de onda óptica. Na sua forma mais simples, é um pequeno volume de material transparente com um índice de refração mais elevado do que o do material circundante. A luz no interior do material de maior índice de refração tende a permanecer presa lá pelo fenômeno da reflexão interna total. Se o material se encontra em uma forma longa (metros a quilômetros) e estreita (micrômetros), o filamento torna-se flexível e passa a ser denominado de fibra óptica. A luz inserida numa extremidade da fibra será transmitida ao longo do comprimento da fibra com baixa perda e emerge até a outra extremidade. O material do núcleo é revestido por outro material com menor índice refração. (READY, J. F., 1997).

Segundo (STEEN; MAZUMDER, 2010), a invenção da fibra viabilizou a construção de um LASER de alta luminosidade, compacto, leve e eficiente. O custo intrínseco de tais LASERs é baixo, uma vez que há relativamente pouco trabalho de construção em seus projetos, que são baseadas principalmente em diodos de estado sólido e fibras dopadas. Como o preço de tais LASERs vem baixando, é possível prever que o mercado vai se expandir. Porém, a tecnologia necessária para a construção de um LASER de fibra é complexa e dominada por pouquíssimos fabricantes.

LASERS de Diodo, LASERS de disco e Lasers de fibra bombeados por diodos são os que apresentam o maior potencial para o futuro. Diodos são eficientes, compactos e simples de operar, de modo que poderá torná-los o dispositivo do futuro.

Além do LASER, a óptica objetiva para feixes de alta potência tem que ser adequada para cada aplicação específica, o que torna a tecnologia LASER uma tecnologia com elevado índice de inovação e há ainda um longo caminho a percorrer.

2.2 OS PROCESSOS LASER

Nesta seção serão abordados os processos LASER que envolvem uma dinâmica mais lenta, adequados para o sistema de movimentação de grande porte que tem como objetivo atender baixas e médias velocidades. Vários processos se encaixam nessas características.

Segundo (STEEN; MAZUMDER, 2010), atualmente são muitas as aplicações para o LASER, como no caso das aplicações de elevada potência e ópticas em processamento de materiais. Considerando as aplicações LASER em processamento de materiais, dois processos muito importantes e bastante empregados em aplicações industriais são o corte e a soldagem.

2.2.1 Soldagem LASER

Desde o surgimento do LASER industrial, a soldagem a LASER tem sido escolhida em relação aos processos de soldagem convencionais (tais como a solda ponto ou soldagem a arco elétrico), devido a várias vantagens como:

- a) Mínimo aquecimento e elevada relação de forma, o que resulta em mínima contração e distorção da peça de trabalho;
- b) Soldas consistentes e repetíveis;
- c) Pequena zona termicamente afetada;
- d) Estreito cordão de solda em geral com boa aparência;
- e) Soldas de alta resistência, muitas vezes resultando num aumento da rigidez e uma redução do tamanho do componente, geralmente maior força estática e resistência à fadiga quando comparados com os pontos intermitentes produzidos através de soldagem por resistência;
- f) Necessidade de automatização, realizando soldas com precisão;
- g) Capacidade para soldar alguns materiais diferentes;
- h) Normalmente, não há fluxo de material ou necessidade de enchimento;
- i) Flexibilidade de manipulação do feixe (incluindo o compartilhamento entre várias estações de trabalho e divisão de tempo);
- j) Capacidade de soldar em áreas de difícil acesso com outras técnicas;

- k) Mais rápida do que outras técnicas;
- l) Em muitos casos, as operações de pós-processamento (como limpeza do cordão) podem ser eliminadas.

Algumas desvantagens devem ser consideradas:

- a) Soldagens quebradiças e muito duras podem ocorrer em materiais com pré-disposição a endurecimento;
- b) Vaporização de alguns elementos de liga pode resultar em soldas porosas ou *undercut*;
- c) Elevados investimentos de capital em relação a outras técnicas;
- d) Os requisitos de precisão para com a manipulação do feixe LASER e da peça são relativamente elevados.

Os recentes desenvolvimentos em matéria de LASER de fibra de alta potência (HPFL) renovaram o interesse em soldagem a LASER de maiores espessura. Um número expressivo de pesquisas demonstrou que HPFL oferece potencial para processamento com alta velocidade de diferentes tipos de metais para espessura de chapas diferentes. Este potencial pode ser realizado em áreas onde a flexibilidade, precisão, redução de custos e tempo, automação do projeto para fabricação e montagem são fatores importantes: construção naval, engenharia aeroespacial, veículos blindados, e muitas novas aplicações com potenciais benefícios para uma variedade de indústrias (SOKOLOV; SALMINEN, 2012).

Segundo (LI et al., 2014), mesmo para o laser de fibra mais avançado, em condições usuais, a profundidade de penetração de soldagem que pode ser atingido é inferior a 25 mm. É possível atingir maiores profundidades de penetração de soldagem em condições mais específicas.

Segundo (KAWAHITO et al., 2008), cordões de soldas profundos com larguras estreitas podem ser produzidos com pequenos diâmetros focais de feixes de laser. Relata ainda aplicações onde a penetração de soldagem alcança 8 milímetros com velocidades de soldagem de 4,5 m /min.

Baseado em estudos e análises feitas em diversos trabalhos relacionados à soldagem LASER, que relatam características e resultados de pesquisas realizadas com soldagem LASER, pôde-se afirmar que soldagens de chapas espessas podem ser realizadas com velocidades a partir de 0.3 m/min e precisão de posicionamento iguais ou inferiores a 0.1 mm. Esta velocidade aumenta gradativamente à

medida que a espessura da chapa diminui para a mesma potência do LASER.

Segundo (STEEN; MAZUMDER, 2010), os principais parâmetros do processo de soldagem LASER são:

- a) Propriedades do feixe; energia, pulsada ou contínua, tamanho, local e modo de polarização; comprimento de onda;
- b) Propriedades de transporte: velocidade, posição focal; geometrias conjuntas; tolerância;
- c) Propriedades do gás de proteção: composição, pressão / velocidade;
- d) As propriedades dos materiais: composição, condição da superfície.

Segundo (HAVRILLA; ANTHONY, 1999), as velocidades de soldagem a LASER têm se baseado na potência do LASER, tamanho do ponto focal, as propriedades do material a ser soldado, geometria da junta de solda e o tipo de gás de proteção e otimizações, especialmente para a soldagem de alta profundidade (*keyhole*). Acima de um valor limite, a velocidade é diretamente proporcional à densidade de potência disponível. Isto leva em conta as características de desempenho do LASER como, por exemplo, o tamanho do ponto focal. Dado que todos os outros parâmetros são constantes (dentro das limitações do processo), a velocidade de soldagem (ou penetração da solda) aumentará com:

- a) Aumento da potência do LASER;
- b) Melhoria da qualidade do feixe;
- c) Tamanho menor do ponto focalizado.

Para LASERS de CO₂, a potência (P) por unidade de tamanho de ponto (d) é aproximadamente proporcional à velocidade de soldagem (V). Portanto, potência dividida pelo produto da velocidade e tamanho do local é aproximadamente constante, como segue:

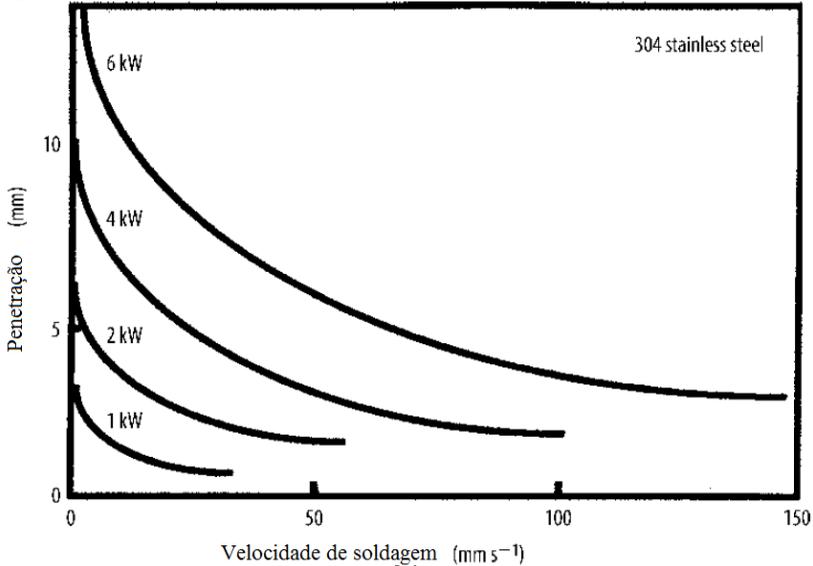
$$\text{Se: } P/dV \cong \text{constante}$$

$$\text{Então: } V \cong P/d$$

Há dois problemas principais na soldagem a LASER: a falta de penetração e o gotejamento no lado oposto "*dropout*". Estes são os limites para uma boa solda, feita com uma determinada potência. A velocidade máxima de soldagem para uma dada espessura aumenta com

um aumento da potência, como mostra a figura 1, (STEEN; MAZUMDER, 2010).

Figura 1 - Velocidade de soldagem x Penetração (para escoamento axial rápido, LASER CO₂).



Fonte: Steen; Mazumder (2010).

2.2.2 Corte LASER

A ideia de cortar com luz surgiu para muitos desde a primeira vez que o papel foi queimado em um dia ensolarado com a ajuda de uma lupa. Cortar centímetros de espessura de um aço com um feixe de LASER é ainda mais fascinante.

O corte a LASER é hoje a aplicação mais comum dos processos LASER. No Japão cerca de 80% dos LASERs industriais são usados para cortar. Porém, além do encanto, que raramente é uma força impulsionadora para o investimento na indústria pesada, a razão mais provável, é que o corte a LASER representa uma substituição direta de processos em um mercado já estabelecido. Em muitos casos, passa a ser capaz de cortar mais rápido e com uma qualidade superior que os processos concorrentes. O ANEXO A mostra uma Tabela de comparação com as técnicas alternativas (STEEN; MAZUMDER, 2010).

No corte por fusão a LASER, um feixe LASER se move em relação à peça, descrevendo uma trajetória pré-determinada. A energia do feixe de alta intensidade funde o metal em toda sua espessura, criando assim uma fenda de corte, onde a maior parte do volume desta fenda é principalmente fundida, sendo expulsa da zona de corte por um jato de alta pressão de gás (inerte, nitrogênio ou ar – dependendo do material a ser cortado) (READY, J.; FARSON, 2001).

Segundo (HAVRILLA; ANTHONY, 1999), as velocidades de corte a LASER estão relacionadas com a densidade de potência de LASER e as propriedades do material a ser cortado. Acima de um valor limite, os avanços são diretamente proporcionais à densidade de potência disponível. Isso leva em conta as características de desempenho do LASER, por exemplo, potência e modo de operação, além de características do sistema, como o tamanho do ponto focal. Taxas de corte são também inversamente proporcionais à densidade e espessura do material. Dado que todos os outros parâmetros são constantes, dentro das limitações do processo a velocidade de avanço aumentará com:

- a) Aumento de potência do LASER;
- b) Melhoria da qualidade do feixe;
- c) Tamanho menor do ponto focalizado;
- d) Menos energia necessária para iniciar a vaporização (ou seja, plástico x aço);
- e) Menor densidade do material;
- f) Redução da espessura do material.

(STEEN; MAZUMDER, 2010), relatam que o corte a LASER é um problema de multi parâmetro, portanto, às vezes difícil de entender a inter-relação entre estes. Os parâmetros podem ser agrupados da seguinte forma:

- a) Propriedades do feixe: tamanho de ponto e forma, potência, modo de operação (pulsado ou contínuo); polarização; comprimento de onda;
- b) Propriedades de transporte: velocidade e posição focal;
- c) As propriedades do gás: velocidade do jato, posição do bico, forma, alinhamento, composição e gás;
- d) As propriedades dos materiais: óptica e térmica.

2.3 AS MÁQUINAS LASER

As máquinas a LASER são constituídas por diversos subsistemas que integram um sistema maior. Destacam-se as partes mais importantes destes sistemas, como: sistema de geração de LASER, sistema de entrega de feixe LASER, sistema de movimentação de materiais e um sistema de controle, para governar todos estes subsistemas (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

O sistema de geração LASER produz um feixe monocromático, coerente e colimado. O LASER por si só tem potencial extremamente limitado. No entanto, quando o feixe é dirigido, manipulado e focado em relação a uma peça de trabalho, este é capaz de realizar trabalhos muito interessantes, ideais para o processamento automatizado.

O sistema de entrega de feixe é composto de componentes que permitem direcionar o feixe do LASER para a peça, e condicioná-lo em uma forma utilizável de energia. Estes sistemas são geralmente fixados a um eixo linear, usado para ajustar a distância focal em relação à peça. Para soldagem, usualmente cerca de ± 25 mm são necessários, se está sendo soldada apenas uma geometria de peça, com comprimento focal constante. Este eixo pode ser controlado manualmente ou via automação. O controle automatizado pode ser concebido para permitir diferentes distâncias focais, tais como, em aplicações de pesquisa e desenvolvimento ou em peças de geometrias complexas, aumentando assim significativamente a gama de ajustes necessários. (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

Os sistemas de movimentação de materiais podem variar de configurações simples, onde o material é movido linearmente (ou angularmente) sob um feixe fixo, a sistemas de posicionamento sofisticados de múltiplos eixos, utilizados, por exemplo, para a soldagem de contornos tridimensionais.

Sistemas bidimensionais de soldagem podem ser configurados de três maneiras:

- a) O feixe fixo (onde o sistema de entrega de feixe permanece fixo);
- b) Feixe móvel (onde a peça permanece fixa);
- c) Sistema híbrido (em que o feixe e a peça de trabalho se movem).

Cada uma dessas configurações possui aspectos positivos e negativos a serem considerados, com relação à aplicação desejada. Em geral, os sistemas de feixe fixo são os mais rentáveis para uma produção

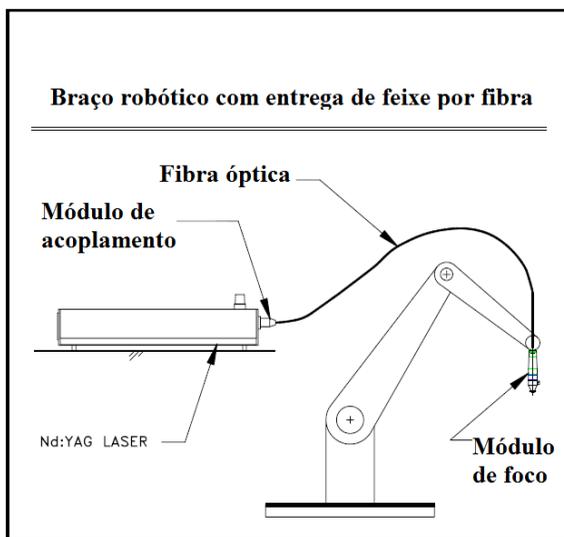
de soldagem de volume elevado de peças idênticas ou semelhantes. O ANEXO B é o resumo de algumas considerações mais importantes para sistemas de soldagem bidimensionais, segundo (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

Os sistemas de movimentações tridimensionais de soldagem atualmente compõem uma pequena porcentagem da base instalada. Estes sistemas podem ser configurados sob a forma de vários eixos ou braços robóticos.

Segundo (STEEN; MAZUMDER, 2010), uma das formas mais flexíveis de orientação do feixe LASER é através de um sistema robótico de movimentação do cabeçote. E o emprego de fibras ópticas para o transporte do feixe tem permitido a introdução dos braços robóticos em aplicações de soldagem a LASER, como mostra a figura 2.

Contudo, a rigidez e precisão dos robôs devem ser consideradas, juntamente com as considerações básicas de LASER. Por exemplo, devem ser considerados: o efeito do comprimento de onda na interação com o material, o efeito da fibra óptica no tamanho do ponto de focagem, a profundidade de foco e geometria de soldagem.

Figura 2 - Braço robótico com cabeçote LASER alimentado por fibra óptica.



Fonte: Adaptado de Havrilla; Anthony, (1999)

A precisão de posicionamento dinâmico representa o problema mais significativo para manter a precisão global de um sistema de movimentação relativa entre o cabeçote LASER e o componente a ser trabalhado. Durante a movimentação das unidades do sistema de movimentação não se olha apenas para o ponto final da trajetória e sim nos erros ao longo de toda a trajetória e na capacidade de manter estes erros dentro de limites estabelecidos.

Causas que contribuem para erros de posicionamento dinâmico são: a contagem incorreta de pulsos de *encoder*, e deficiências mecânicas, tais como, baixo torque do motor, *backlash*, inércia excessiva do sistema e rigidez mecânica insuficiente. Estas contribuem para contornos irregulares, principalmente em locais de grandes acelerações. Sistemas de alta precisão e sistemas que operam em velocidades elevadas utilizam conjuntos mecânicos e eletromecânicos compatíveis com minimização da inércia dos componentes móveis.

Um sistema de movimentação integrado com um LASER deve ser controlado por uma unidade de controle central, capaz de acionar o LASER em coordenação com o movimento do sistema. É fundamental que o controlador seja capaz de trabalhar com altas taxas de amostragem para lidar de forma eficaz com os sinais de *encoder* e manter a precisão e suavidade de movimento necessária. A fim de atingir movimentos suaves e contínuos, o controlador deve processar as informações em alta velocidade e ser capaz de pré ler blocos ou informações do programa para determinar as acelerações necessárias para manter a velocidade constante durante uma mudança de direção.

O sistema de controle LASER tem que ser capaz de comandá-lo, de maneira a fornecer continuamente uma quantidade constante de energia para a peça de trabalho. A interação do feixe com o material ocorre a uma taxa previsível. Por exemplo, para fazer uma boa soldagem, o ponto focado deve mover-se suavemente a uma velocidade constante ao longo do contorno de solda desejado. Qualquer alteração (aceleração ou desaceleração) durante a soldagem, com potência do LASER constante, resultará numa penetração de soldagem inconsistente. Se a velocidade de soldagem não pode ser mantida constante pelo sistema de movimentação ou pelo sistema de controle, é necessário diminuir a energia do LASER durante a transição de velocidades (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

Nos casos que a velocidade não pode ser mantida constante durante todo o processo, por exemplo, durante a soldagem de cantos vivos ou "quinas", é utilizado um sistema de LASER interativo (Controle dinâmico de potência). Estes controles empregam o controle

de potência por rampa. Melhores resultados são obtidos quando se emprega controle pulsado do LASER, através da variação do ciclo de pulsos em tempo real. Utilizando modulação de frequência de pulsos de energia pré-determinados, ou seja, uma determinada potência de pico e duração de pulso, o desempenho deste tipo de soldagem LASER, pode ser igualada ao realizado em deslocamentos lineares.

Para o processamento do comando e controle desses subsistemas, as máquinas LASER normalmente usam comandos controlados numericamente (CNC). Estes dispositivos fornecem a flexibilidade e processamento para os controles multifunções, recursos de *hardware* para auxiliar na programação e geralmente incluem um monitor, teclado, controle manual dos eixos, substituições de avanços, e uma variedade de dispositivos de entrada e saída, tais como, leitores de cartão, pendrive, cds e outras interfaces de comunicação. Embora as características de programação tendam a distinguir um controlador de outro, a maioria deles oferecem: interpolação linear e circular, escala do eixo, programação independente de unidade (polegada ou métrica), programação absoluta e incremental, rotação do eixo, sub-rotinas, blocos de cálculo, atalhos de inserir / modificar / excluir e recursos de programas de usinagem memorizados. A programação off-line permite a máxima otimização de utilização do LASER, (HAVRILLA; ANTHONY, 1999).

O ANEXO C mostra uma máquina LASER comercial e suas principais características. O ANEXO D mostra alguns itens essenciais para o funcionamento correto do comando e controle de uma máquina LASER.

2.4 SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO

2.4.1 Introdução

Segundo (STOETERAU, 2004), desde o início da revolução industrial, quando surgiram as primeiras máquinas ferramentas desenvolvidas através de princípios modernos, até meados dos anos 70 do século XX, a evolução das máquinas-ferramentas sempre se baseou nas soluções puramente mecânicas. Nas últimas seis décadas a mudança dos conceitos de projeto foram decorrentes à introdução do comando numérico na década de 50, onde avanços tecnológicos permitiram uma verdadeira revolução no projeto de máquinas-ferramentas.

Atualmente com a "automatização", é possível ter uma sequência de máquinas comandada por um sistema de controle central. No futuro, há a perspectiva de máquinas "inteligentes", com "controle adaptativo" em que uma célula autônoma pode ser configurada para uma tarefa e ser capaz de aprender sozinho a fazer a tarefa da melhor maneira de acordo com critérios pré-definidos (STEEN; MAZUMDER, 2010).

As máquinas-ferramentas assim como robôs utilizam motores de alta dinâmica para movimentar componentes, como mesas de coordenadas ou braços robóticos e realizar tarefas com precisão. Geralmente encontramos acionamentos "diretos" ou através de transmissões mecânicas, como: fuso e castanha de esferas recirculantes, pinhão e cremalheira, polias e correia dentada (WECK, 2006).

O CNC (comando numérico computadorizado) permitiu realizar o controle de parâmetros da máquina e dos processos. Com isto desenvolveram-se métodos de compensação de erros elevando a exatidão de posicionamento até limites inatingíveis até então.

Estas mudanças fizeram com que surgisse a necessidade de conhecimentos multidisciplinares para a execução de um bom projeto de máquina. Conhecimentos estes que deram origem aos sistemas Mecatrônicos integrados de alta eficiência.

"Sistemas mecatrônicos combinam as vantagens de cada uma das áreas de um produto que realiza as suas funções de forma flexível e adaptada a cada situação." (WECK, 2006).

A mecatrônica segundo (ALCIATORE; HISTAND, 2007), é definida como:

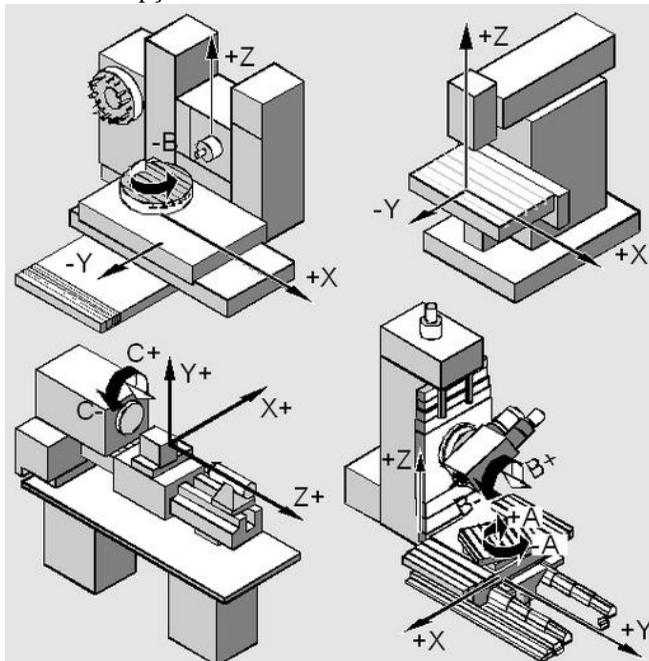
"Mecatrônica é um campo interdisciplinar da engenharia que lida com o projeto de produtos cujas funções são realizadas por uma integração sinérgica entre componentes mecânicos, eletrônicos e elétricos conectados por uma arquitetura de controle".

Segundo (WECK, 2006), as áreas da Mecatrônica são:

- a) Os mecanismos e as suas estruturas, tais como mesas, suportes, guias, engrenagens para a recepção e transmissão de forças, bem como para orientação e transmissão de movimentos;
- b) A ciência da computação solução baseada em *software* para a tecnologia de medição e controle de tarefas;
- c) Os componentes eletrônicos e de informática para a realização do *hardware* necessário;
- d) A energia elétrica convencional, a eletrônica de potência e o projeto de circuitos para: amplificadores e projeto de motores.

Os sistemas de movimentações de máquinas convencionais podem adotar concepções mecânicas variadas de cinemática em serie. A figura 3 mostra algumas das concepções mais usuais de sistemas de movimentação de máquina ferramenta.

Figura 3 - Concepções mecânicas de cinemática em serie convencionais



Fonte: PKM tricept

As concepções apresentadas podem adotar de três a cinco eixos e ainda várias de eixos rotacionais e lineares. Concepções estas muito comuns em máquinas ferramentas como: torno, fresa, furadeiras de bancada, dentre outras convencionais.

2.4.2 Sistemas de movimentações de grande porte

Atualmente existe uma demanda crescente de fabricação de peças de grande porte, com exigências de precisão cada vez maiores. Este fato acontece em diversos setores como: ferrovias, usinas de energia convencionais e nucleares, estações de energia renováveis (turbinas de

vento, ondas e maré), aeronáutica (estruturas de avião), plataformas marítimas, área naval, grandes instalações científicas, dentre outras. Estas aplicações envolvem fabricação, manutenção e reparação, tarefas estas inviáveis de serem solucionadas convencionalmente devido ao tamanho das partes envolvidas.

Alguns problemas convencionais tomam grandes proporções ou tornam-se sem solução quando se trabalha com peças de grandes dimensões, como por exemplo: problemas como deformação da peça durante a usinagem por causa de esmagamento do próprio dispositivo de fixação ou do próprio peso da mesma; deformações térmicas da máquina e ou da peça; verificação dimensional da peça no local de "trabalho"; centragem da peça na máquina; tempo do ciclo de usinagem muito longo; necessidade de diferentes set-ups para uma mesma peça a ser usinada; reparação e modificações após a instalação da própria peça.

Segundo (URIARTE, L et al., 2013), as configurações mais usuais de máquinas de grande porte são baseadas em cinemática em série, podendo variar o sistema de movimentação basicamente em três tipos de configurações, são elas: sistema de movimentação com portal, sistema de movimentação com portal elevado, sistema de movimentação com coluna móvel. Podendo ainda sofrer algumas modificações em cada configuração.

Os sistemas de movimentação com portal geralmente tendem que todos os eixos de movimentos estejam associados à máquina, desta maneira, o cabeçote porta ferramentas da mesma executa os movimentos requeridos em relação a uma peça fixada em uma mesa fixa. A figura 4 mostra duas máquinas de grande porte do fabricante *Correanayak* com este tipo de configuração. Onde o portal executa movimentos e dois eixos e o terceiro eixo de movimento é dado pela movimentação do próprio portal em relação a mesa de fixação da peça.

Figura 4 - Portal móvel e mesa fixa.



Fonte: Anyac Correa, fabricante de máquinas de usinagem CNC.

Em muitas situações específicas é necessário que o portal tenha dimensões muito grandes, o que dificulta a movimentação do mesmo com a precisão requerida. Para estas situações específicas, pode-se adotar a configuração de sistema de movimentação com portal fixo e mesa móvel. Entretanto, o comprimento do eixo de movimentação da mesa terá necessariamente o dobro do tamanho da mesa, para viabilizar o acesso do cabeçote porta ferramentas a toda área da mesa de fixação da peça. A figura 5 mostra duas máquinas de portal fixo e mesa móvel dos fabricantes Tos-kurim e Correanayak.

Figura 5 - Portal fixo e mesa móvel.



Fonte: Anyac Correa, fabricante de máquinas de usinagem CNC.

Muitas vezes é inviável utilizar uma configuração com mesa móvel devido ao tamanho da peça de trabalho, pois, movimentar peças grandes e pesadas de maneira precisa demandam altos custos. Nestes casos as configurações cinemáticas mais adotadas são: coluna móvel, portal, portal elevado. A figura 6 mostra uma máquina de coluna móvel do fabricante Focus Machine tools.

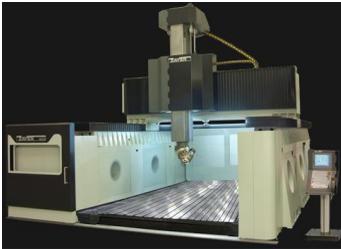
Figura 6 -Máquina de coluna móvel.



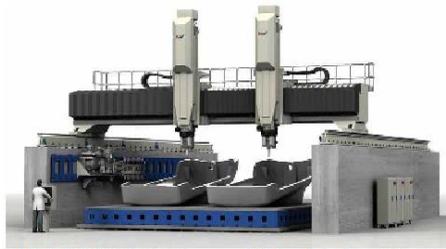
Fonte: Focus Machine Tools, LLC

As máquinas de coluna móvel são muito versáteis e podem desempenhar multi funções. Devido a sua configuração cinemática compacta de alta eficiência oferecem maior liberdade do ponto de vista da manipulação e posicionamento da peça. São excelentes para múltiplas operações de usinagem, tais como, fresagem, perfuração. Muito aplicada na indústria petroquímica, metalurgia, construção de navios, militar e aeroespacial, na usinagem em cinco eixos. Entretanto, no que diz respeito à rigidez estática, dentre as configurações abordadas, as máquinas de coluna móvel oferecem menor rigidez que as configurações com o portal elevado. A figura 7 mostra duas máquinas com configuração de portal elevado do fabricante Zayer.

Figura 7 -Portal elevado.



Fabricante: Zayer



U5-1500DR Universal Machining Center

Fonte: Zayer, Máquinas de usinagem CNC e Centros de Usinagem.

Dentre as configurações abordadas, a de portal elevado é a que proporciona maior rigidez mecânica, pois, através da elevação da estrutura que dá suporte ao portal e agregando a rigidez adequada a esta estrutura, é possível diminuir a altura das colunas do "portal comum" e com isto, reduzir os esforços sofridos pelas mesmas. Contudo, é possível afirmar que a rigidez mecânica diminui à medida que a altura das colunas do portal aumenta, então, as configurações de mesa fixa e portal móvel (não elevado) oferecem menor rigidez, haja vista o tamanho das colunas do portal.

Uma configuração de sistema de movimentação de máquina que vem se destacando atualmente é a cinemática paralela, uma técnica jovem quando comparada a cinemática em série. Muitas pesquisas e aplicações vêm sendo realizadas sobre este tema. Uma característica muito atraente de cinemática paralela é a baixa massa envolvida no sistema, o que proporciona uma alta dinâmica. Porém, em muitas aplicações de fabricação não é possível obter a precisão exigida

utilizando cinemática paralela, a rigidez proporcionada pelas articulações resulta em dinâmicas inferiores as proporcionadas pela cinemática em série. Além disso, existe uma grande dificuldade em encontrar configurações de cinemática paralela que viabilizem grandes amplitudes de movimento em três eixos. De fato, há poucas aplicações de usinagem convencional que adotam esta técnica com sucesso. A figura 8 mostra algumas concepções de cinemática paralela.

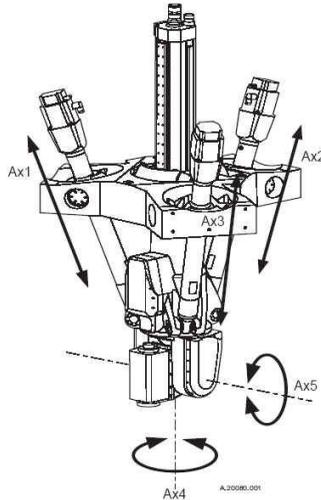
Figura 8 - Cinemática paralela



Fonte: Siemens Automation; Mecalux, Logismarket.

Para a obtenção de uma boa amplitude e dinâmica de movimento, uma solução que vem sendo adotada são as máquinas "híbridas", ou seja, a combinação da cinemática em série e paralela. Segundo (URIARTE, L et al., 2013), a Companhia PKM Tricept oferece uma gama de soluções comerciais muito bem sucedidas, estas combinam três eixos paralelos e dois eixos de rotação em série, os quais viabilizam uma máquina de 5 eixos completa. A figura 9 mostra esta concepção de cinemática paralela Tricept.

Figura 9 - Concepção de cinemática "híbrida" Tricept



Fonte: PKM, tricept.

Para máquinas de grande porte a Tricept oferece uma concepção diferenciada, através da instalação do sistema híbrido (Tricept) em um portal elevado (pórtico) de movimentação de grande porte, permitindo assim, grandes deslocamentos e alta dinâmica da ferramenta de trabalho sobre a área em que a usinagem tem de ser realizada. A figura 10 mostra esta concepção em uma aplicação de usinagem de estruturas de ferrovia.

Figura 10 - Cinemática "híbrida" Tricept acoplada a um portal elevado.



Fonte: PKM, tricept.

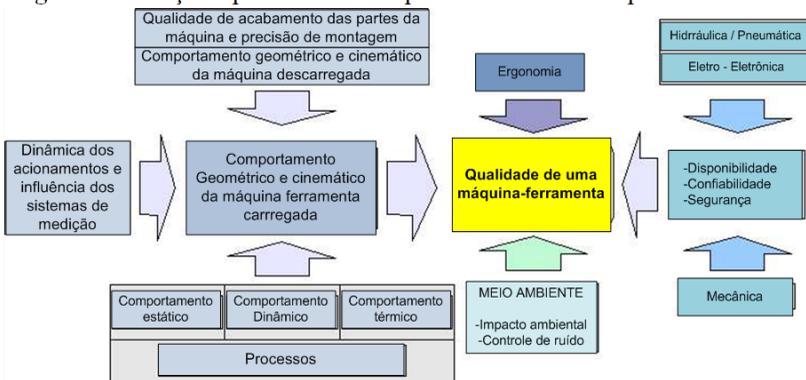
De maneira geral, quando se trata de estruturas de sistema de movimentação de máquinas de grande porte é fundamental considerar alguns aspectos como:

- a) Levar em conta as deformações estáticas devido ao próprio peso das peças que compõem a máquina. Sendo que estas deformações podem ser compensadas pelo CNC, através da introdução de parâmetros que mapeiam os erros sistemáticos da máquina;
- b) Com relação à rigidez estrutural é necessário projetar as partes que compõem a estrutura mantendo as devidas proporções de dimensionamento e projeto, em relação às máquinas convencionais;
- c) Quanto às guias de movimento é preciso manter a linearidade e o alinhamento, estar atento ao excesso de restrições;
- d) Levando em conta os grandes volumes de área de trabalho proporcionados pelas máquinas de grande porte e a necessidade de precisão de movimentação, é importante conhecer os erros volumétricos do sistema de movimentação, que podem ser adquiridos através da calibração geométrica da máquina.

2.4.3 Aspectos relacionados projetos de máquinas

Quando se deseja projetar ou analisar um projeto de máquina, é necessário conhecer todas as partes que compõem e exercem influência sobre este sistema. Segundo (Weck, 1992), *apud* (STOETERAU, 2004), a qualidade de uma máquina-ferramenta está associada com os sistemas que a compõem, ao uso a que se destina, aos esforços mecânicos e térmicos a que será submetida, a forma como esta afeta o meio ambiente e as precisões e acabamento estipulados para a peça. Ponderar estas relações é fundamental para obter qualidade no projeto de uma máquina-ferramenta. A figura 11 apresenta as relações que envolvem a qualidade de uma máquina ferramenta.

Figura 11 - Relações que envolvem a qualidade de uma máquina-ferramenta.

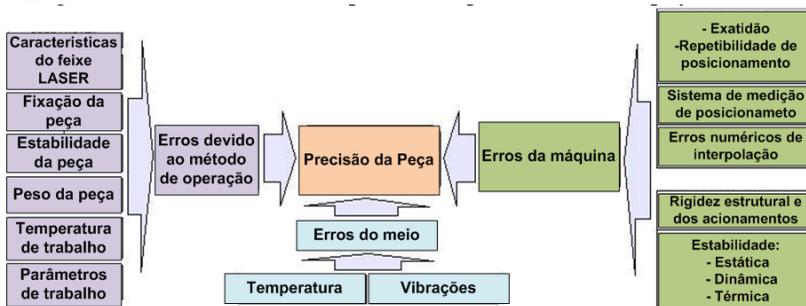


Fonte: Adaptada de Weck (1992) *apud* Stoeterau (2004)

Podemos também concluir que até mesmo um bom sistema de movimentação pode obter resultados de usinagem não satisfatórios, se não for dada a devida atenção para o sistema de fixação da peça, e as características do ambiente onde a máquina se encontra, (König, 1999; Hembrug, 1989; Stoeterau, 1999) *apud* (STOETERAU, 2004).

A figura 12 mostra as relações que envolvem a precisão e qualidade de uma peça usinada. A Figura mostra os vários aspectos que contribuem para o resultado final da usinagem.

Figura 12 - Influências sobre a precisão e qualidade de uma peça usinada.



Fonte: Adaptada de Weck (1992), Stoeterau (2004).

2.4.3.1 Fundação e estrutura de máquinas

A fundação é um elemento chave em qualquer tipo de máquina ferramenta, pelas seguintes razões: fornece a "sustentação ou rigidez" necessária à estrutura mecânica da máquina, é fundamental no nivelamento e alinhamento da máquina, e desempenha um papel importantíssimo no amortecimento de vibrações derivadas do processo. Em máquinas de grande porte, a combinação de baixa rigidez estrutural e cargas pesadas torna o efeito da fundação ainda mais importante. De modo que é mais adequado integrar totalmente a estrutura mecânica da máquina a fundação.

Um aspecto muito importante que influencia a rigidez e a precisão das máquinas é a sua concepção estrutural, muitas vezes chamada erroneamente de base da máquina, por servir de base para a montagem das outras partes que compõem os elementos de máquinas.

Um bom projeto de estrutura de máquina precisa ser versátil, de forma que atenda ou adapte-se facilmente a características de componentes de máquina fornecidos por terceiros. Além de atender os seguintes requisitos básicos:

- a. Rigidez estática;
- b. Rigidez dinâmica;
- c. Estabilidade térmica;
- d. Estabilidade química;
- e. Facilidade de manipulação;
- f. Acessibilidade aos componentes internos;
- g. Custo viável.

É possível construir uma máquina convencional, basicamente integrando sistemas (módulos), que são encontrados no mercado entre diversos fornecedores, não sendo necessário o domínio de todos os processos de fabricação de cada um dos módulos de uma máquina. Desde a estrutura, os mecanismos, a eletrônica de controle e praticamente todos os componentes que constituem uma máquina podem ser encomendados a terceiros ou encontrados comercialmente.

Segundo (STOETERAU, 2004), recomenda-se para projetos de estruturas de máquinas, elaborá-los de maneira que facilitem a manipulação das mesmas, otimizando peso e dimensões, podendo ainda dividi-lo em estruturas menores, a fim de facilitar o transporte. Contudo, deve-se estar atento a referências de montagem, como forma de garantir

a exatidão geométrica da máquina sem a necessidade de dispositivos de ajustagem complexos.

Estas estruturas menores podem também ser chamadas de módulos ou sistemas modulares.

O termo “sistemas modulares” se refere a uma técnica de projeto utilizada para criar uma variedade de produtos finais a partir da combinação de componentes intercambiáveis, funcionalmente independentes entre si, denominados de módulos.

"O projeto modular é uma técnica de projeto que pode ser utilizada para desenvolver produtos complexos a partir de componentes similares e simplificados (Maribondo, 2000)" *apud* (PEREIRA, 2010).

Dentre os aspectos citados a rigidez estrutural é muito utilizada no projeto como parâmetro de comparação de desempenho entre máquinas.

Considerando que os processos LASER não impõem forças de processo entre peça e ferramenta, como na usinagem utilizando ferramenta de corte, para a análise de rigidez de uma máquina LASER devem ser considerados aspectos como: deformação desta sob ação de cargas estáticas, forças inerciais e carregamentos dinâmicos.

Segundo (STOETERAU, 2004), o conceito de rigidez se divide em estática e dinâmica. A rigidez estática é estabelecida pela relação entre a força e a deformação, conforme a equação 1. A rigidez dinâmica relaciona a força com a deformação como função da frequência de excitação, equação 2.

Equação 1:

$$k = \frac{F}{\delta_n}$$

Equação 2

$$k(\omega) = \frac{F(\omega)}{\delta_n(\omega)}$$

Onde:

k = rigidez
F = força aplicada
 ou carregamento
 δ_n = deslocamento
 ω = frequência

A rigidez estática de uma máquina LASER é caracterizada por deformações devido aos carregamentos estáticos, como: peso das partes móveis, peso da peça de trabalho e gradientes térmicos, causando deformações na máquina. Podemos ainda destacar deformações oriundas de torques excessivos em parafusos, nivelamentos incorretos entre outros aspectos que levam a uma montagem com erros.

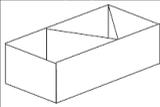
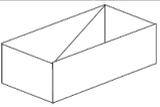
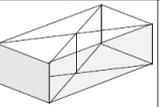
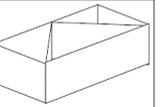
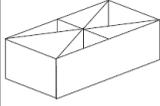
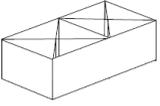
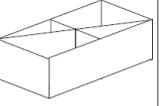
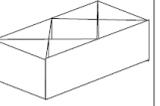
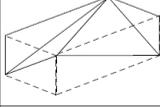
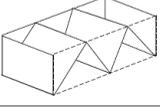
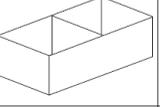
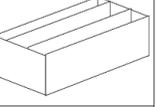
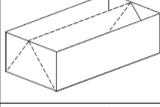
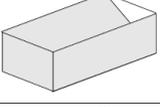
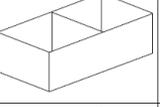
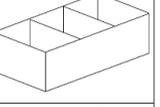
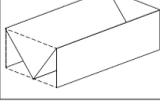
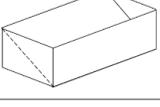
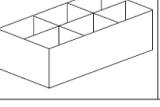
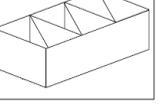
Dentre as deformações causadas por estes carregamentos, pode-se destacar as causadas por carregamentos flexivos e torcionais, os quais

tem influência direta no posicionamento, por influenciar o deslocamento e desalinhamento de elementos de máquina fixados na estrutura.

Um aspecto muito importante no que diz respeito à estrutura de uma máquina são as vigas ou perfis estruturais que compõem a estrutura e lhe agregam a rigidez necessária. Para a mesma finalidade podem ser adicionados reforços à estrutura, agregando-lhe resistência à torção e flexão.

São diversas as formas de adicionar reforços para agregar rigidez às estruturas e reduzir as deformações geradas por carregamentos. Considerando que a espessura da parede da estrutura deve estar de acordo com o a rigidez que se deseja agregar (não muito fina), pode-se ganhar em rigidez, adicionando-se reforços longitudinais, diagonais, duplos, etc. A Tabela 1 mostra algumas variações de reforços na estrutura.

Tabela 1 - Variações no projeto de estruturas longitudinais de máquinas.

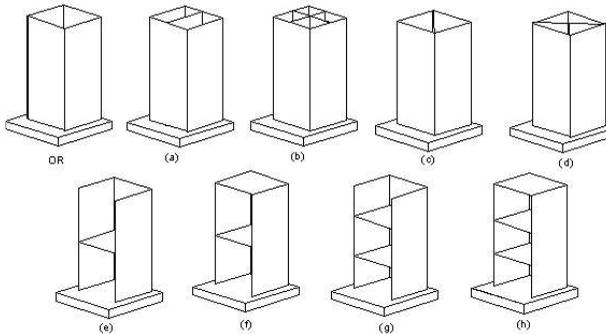
<i>Diagonal Vertical</i>				
<i>Diagonal Vertical</i>				
<i>Horizontal</i>				
<i>Horizontal / Vertical</i>				
<i>Horizontal / Vertical</i>				

Fonte: Stoeterau (2004)

Segundo (STOETERAU, 2004), o projeto e dimensionamento de uma geometria adequada para reforços estruturais é essencial para maximizar a rigidez de uma estrutura. O desenvolvimento da configuração interna da estrutura deve ser feito tomando como base os

conhecimentos de mecânica dos sólidos e resistência dos materiais. A figura 13 mostra alguns exemplos de reforços estruturais.

Figura 13 - Diferentes formas de reforços para o projeto de colunas de máquinas



Fonte: Stoeterau (2004)

A rigidez dinâmica em máquinas LASER é caracterizada pela amplitude das vibrações envolvidas no processo. Considerando que o processo a LASER não gera vibrações, as fontes de esforços que afetam a exatidão de movimento devem ser buscadas nos mecanismos responsáveis pelos movimentos da máquina, como: as forças decorrentes das acelerações dos componentes móveis são de sobremodo elevadas para mudanças bruscas de direção e sentido. O ruído de engrenagens, mancais, rolamentos, *stick-slip* em guias de escorregamento e o ambiente onde estas são instaladas são de importância secundária.

O material que constitui a estrutura da máquina exerce influência direta na rigidez dinâmica, podendo fazer a estrutura vibrar mais ou menos intensamente por consequência das propriedades do material. No caso de limitações para o uso de materiais com elevado índice de amortecimento, são empregados dispositivos dissipadores de energia e isoladores de vibrações, para diminuir as vibrações transmitidas pela fundação do ambiente onde a máquina se encontra instalada, e dissipar a energia das vibrações geradas na própria máquina e transmitidas para outras partes desta.

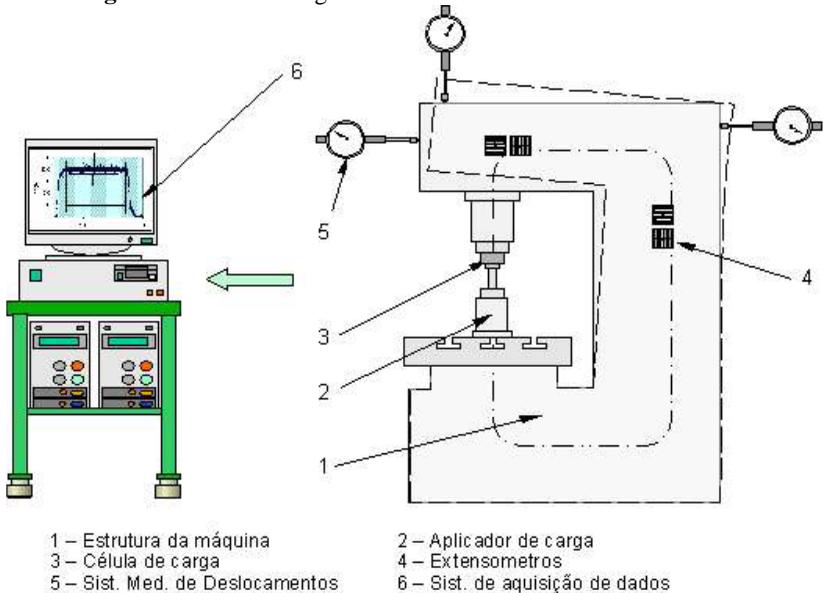
Quando se dá a devida atenção a distribuição de massa do sistema, variações de rigidez da estrutura, a utilização de peças que realizam o trabalho de dissipadores de energia,

amortecedores. De maneira que solucione os modos de vibrações nas frequências mais baixas, as quais carregam maiores amplitudes de energia e vibrações, (STOETERAU, 2004).

A rigidez estática e dinâmica de uma máquina-ferramenta pode ser estimada ainda na fase de detalhamento do projeto através de métodos analíticos, utilizando recursos da mecânica dos sólidos.

A validação dos resultados analíticos é feita após a construção da máquina através de meios experimentais com a aplicação de forças equivalentes aos carregamentos reais medindo os deslocamentos produzidos em vários pontos pré-determinados. A Figura 14 ilustra um ensaio de rigidez estrutural.

Figura 14 - Teste de rigidez estrutural



Fonte: Stoeterau (2004)

2.4.4 Acionamentos elétricos

Os acionamentos elétricos são elementos destinados a transformar energia elétrica em mecânica. São mais usados, pois combinam as vantagens da energia elétrica com o baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, grande versatilidade de adaptação às cargas dos

mais diversos tipos, além de proporcionarem controle de posição e velocidade.

Para atender necessidades diferentes, os motores variam suas concepções quanto ao seu funcionamento, tipo de alimentação ou formas construtivas.

Como esta é uma área muito ampla com diversos tipos de acionamentos, serão abordados apenas os servoacionamentos, pois o sistema de movimentação atual utiliza este tipo de acionamento, além de serem amplamente utilizados em sistemas de movimentação por proporcionarem excelentes dinâmicas de movimento e precisão.

2.4.4.1 Servoacionamentos

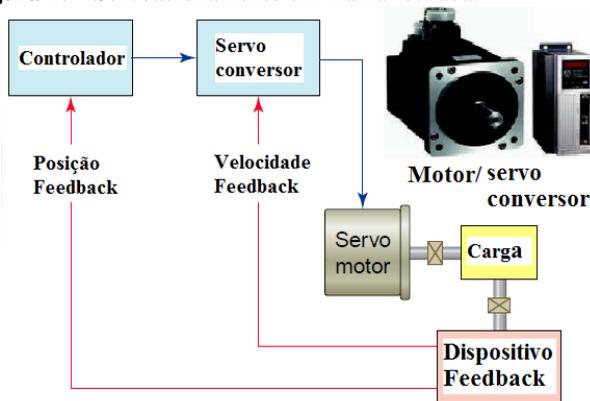
Os servoacionamentos são utilizados nas mais diversas aplicações industriais, principalmente quando é exigida elevada dinâmica, controle de torque, precisão de velocidade e posicionamento, decisivos para o aumento da qualidade e produtividade. Possuem todas estas características aliadas a um baixo custo, elevada performance e robustez.

Servoacionamento é um conjunto constituído do servoconversor e servomotor, onde o servoconversor recebe os sinais do comando e controle e impõe a corrente para o servomotor produzir o torque necessário à movimentação na planta até uma posição desejada.

Segundo (PETRUZELLA, 2010), todos os servoacionamentos operam em modo de malha fechada. O controle em malha fechada, utiliza sensores para obter a retroalimentação (*feedback*) de suas ações. Por exemplo, quando o controlador (servoconversor) envia o comando ao motor para este se mover, através dos sensores o controlador verifica quão rápido este se move e onde ele está durante e após terminar o movimento.

O controle em malha fechada compara velocidade ou posição real (através da realimentação com dados oriundos dos transdutores) com a velocidade ou posição comandada e gera novos comandos, com o intuito de corrigir qualquer erro eventual. A figura 15 mostra um sistema servoacionado de malha fechada típico.

Figura 15 - Servoacionamento em malha fechada.

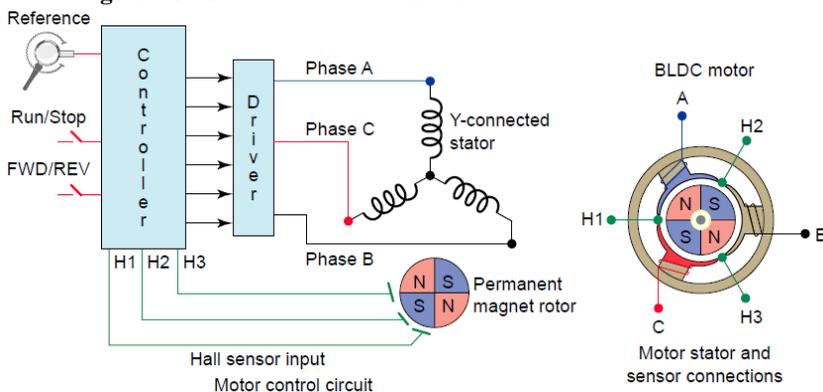


Fonte: Petruzella (2010)

O controlador do servomotor é quem comanda o funcionamento do mesmo, enviando sinais de comando de velocidade ou posição para o amplificador, que aciona o servomotor.

Três tipos básicos de servomotores são utilizados em sistemas de servo-acionados: servomotores CA, com base em projetos de motores de indução; servomotores CC, com base em projetos de motor CC; e servomotores sem escovas (*brushless*) CA ou CC. Neste trabalho será abordado apenas o servomotores sem escovas, pelo fato de serem estes os acionamentos utilizados na máquina em questão e serem totalmente adequados para as finalidades do sistema de movimentação. Um servomotor sem escovas CC é mostrado na figura 16.

Figura 16 - Servomotor brushless DC



Fonte: Petruzella (2010)

Os motores sem escovas CC (BLDCs) não têm escovas ou mecanismo de comutação. Em vez disto eles são comutados eletronicamente. O estator é normalmente trifásico, como um motor de indução, e o rotor têm ímãs permanentes montados no eixo. Três sensores Hall (H1-H2-H3) são utilizados para detectar a posição do rotor, a comutação é realizada eletronicamente, com base em sinais das entradas destes sensores de efeito Hall. Os sinais provenientes dos sensores de efeito de Hall são decodificados pelo controlador e usados para controlar o circuito de acionamento, o qual energiza as bobinas do estator na sequência de rotação adequada. Portanto, o motor necessita de uma unidade eletrônica para comanda-lo, denominada servoconversor.

Motores CC sem escovas hoje em dia são usados amplamente em posicionadores, pois proporcionam excelente dinâmica. Não necessitam de manutenção já que não utilizam escovas, gerando também menos ruídos. O controle eletrônico destes motores aumenta a eficiência e confiabilidade, além de oferecerem altos torques e rotações elevadas. O calor gerado é passado para o ambiente com maior facilidade, pois a armadura fica no estator, melhorando o controle da temperatura do motor.

2.4.5 Sistemas de medição

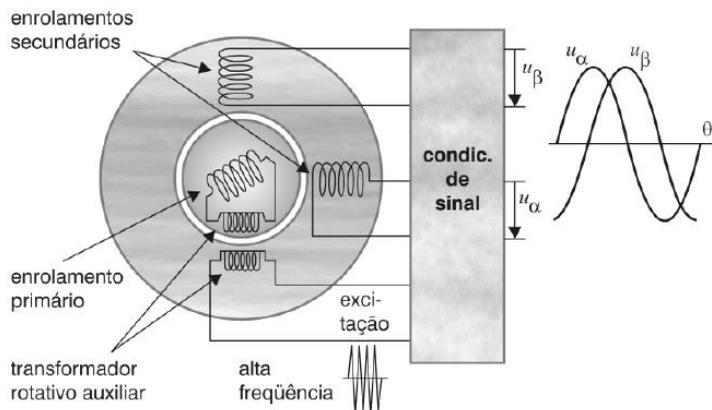
Para viabilizar o controle dos servoacionamentos é necessário que algum dispositivo de medição retorne sinais ao controlador, para que através da comparação do sinal de entrada (referência) e o sinal de saída (feedback do sensor de medição), seja possível controlar e corrigir erros (diferença entre o comando dado e o que realmente o acionamento realizou).

São vários os tipos de sistemas de medição que podem ser empregados em servoacionamentos. Este trabalho abordará apenas o *resolver*, o qual mede a variação de posição angular por meio de transdutores de princípio magnético.

Os *resolvers* possuem uma bobina de referência no rotor e duas bobinas defasadas em 90° no estator, como mostra a figura 17. A partir de uma tensão senoidal aplicada na bobina de referência, induz tensões nas duas bobinas do estator, formando uma relação seno e cosseno de um valor de entrada. Em uma segunda parte, a tensão induzida nas bobinas faz o contrário. As bobinas induzem um rotor bobinado e que enviará um sinal de saída é uma relação entre o seno deste rotor com ângulo formado pelo deslocamento (AMCI 2014). Um circuito

condicionador processa as tensões induzidas nas bobinas secundárias fornecendo uma tensão proporcional à posição (WEG).

Figura 17 - Funcionamento interno de um *resolver*



Fonte: WEG; et al.

Como cada posição angular do eixo do motor tem um valor específico, este pode ser considerado como um sistema absoluto, podendo enviar dados de maneira analógica ou digital. É possível também diminuir a relação de ângulo, onde ao invés de haver uma relação de seno para uma volta do eixo, pode-se dividir em mais vezes, aumentando assim a resolução e com a ajuda de um contador, pode-se fornecer uma informação incremental (AMCI).

2.4.6 Controle PID

Desde a invenção do controle Proporcional Integral Derivativo PID em 1910, por Elmer Sperry e os métodos de ajuste diretos de Ziegler-Nichols em 1942, a popularidade de controle PID tem crescido muito. Com os avanços da tecnologia digital, a automação agora oferece um amplo espectro de opções para esquemas de controle. Mais de 90% dos controladores industriais são implementados com base em controle PID (ANG; CHONG; LI, 2005).

Segundo (SUNADA, 2007), para processos com dinâmicas bem comportadas e especificações não muito exigentes, o controlador PID é uma solução que oferece um bom compromisso entre simplicidade e bom comportamento em malha fechada. Sunada cita algumas características que motivam a ampla utilização de deste tipo de controle:

- a) Controle simples com parâmetros ajustáveis;
- b) Realimentação incorporada;
- c) Número reduzido de parâmetros ajustáveis dependendo da implementação;
- d) Permite eliminação de *offsets* por meio da ação integral;
- e) Pode prever ações futuras por meio da ação derivativa e ainda pode tratar de saturações;
- f) Permite uma variedade de métodos para ajuste adequado, sendo Ziegler e Nichols o mais conhecido.

Segundo (ANG et al., 2005), a tendência das pesquisas e desenvolvimentos da tecnologia PID está focada na integração de métodos disponíveis na forma de software, de modo a tirar o melhor proveito do controle PID.

Este controle é baseado no ajuste de três parâmetros, são eles KP (Ganho Proporcional), KI (Ganho integrativo), KD (ganho derivativo). A saída do controle é expressa na equação abaixo.

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Onde: $e(t)$ é o erro entre a referência $r(t)$ e o sinal que se deseja controlar $y(t)$.

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

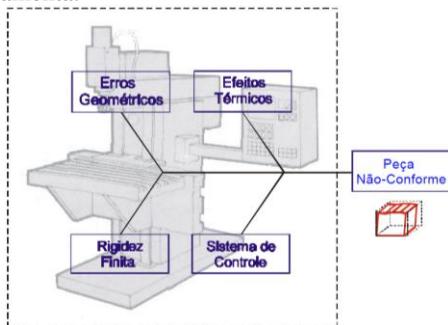
O ganho proporcional aumenta a velocidade de atuação do controlador no sistema. O ganho integrativo tem relação direta com à precisão do sistema, é responsável pelo erro nulo em regime permanente. Entretanto o aumento da precisão geralmente implica na redução da estabilidade ou do fator amortecimento do sistema. Fato que pode ser contrabalançado pela ação derivativa, a qual tem a função de aumentar a estabilidade relativa do sistema e tornar a resposta do sistema mais rápida devido ao seu efeito antecipatório. No entanto, o incremento de fator derivativo torna o controlador mais sensível à taxa de variação do erro.

2.5 ERROS E ENSAIOS GEOMÉTRICOS PARA SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO.

"Os ensaios geométricos permitem direcionar a utilização da máquina ferramenta de acordo com a tolerância das peças usinadas e/ou afastá-la preventivamente de serviços, antes que produzam peças fora da tolerância", (PARK, 1992) *apud* (SOUSA, 2000).

Os erros geométricos podem estar associados a efeitos térmicos, rigidez da máquina, erros de trajetória nos movimentos da máquina, limitações do sistema de controle e erros geométricos nos componentes mecânicos e erros na montagem de componentes da máquina. Estas influências afetam diretamente na precisão de posicionamento DOS movimentos descrito pela máquina. A figura 18 apresenta fatores perturbadores do comportamento geométrico de uma máquina ferramenta.

Figura 18 - Fatores perturbadores do comportamento geométrico de uma máquina ferramenta.



Fonte: Adaptada de Sousa (2000)

Segundo (NBR-NM-ISO230-1, 1999), para cada verificação geométrica de uma característica de forma, posição ou deslocamento de linhas ou superfícies da máquina, tais como: retitude, planeza, paralelismo, equidistância, coincidência, perpendicularidade, rotação, existem definições, métodos de medições e tolerâncias. Os ensaios de máquinas de grande porte frequentemente requerem o uso de instrumentos de medições especiais, de modo que os ensaios possam ser conduzidos de maneira conveniente e rápida.

Segundo Slocum (1991) *apud* (PEREIRA, 2010), os erros geométricos podem ser divididos em duas categorias principais, os erros mecânicos quase estáticos e os erros causados por forças dinâmicas.

Os erros quase estáticos são erros na máquina, como: sistema de fixação, ferramenta e peça, que ocorrem relativamente devagar. Isto quer dizer que eles ocorrem numa frequência muito mais baixa do que a

banda de movimento que os eixos das máquinas podem utilizar para corrigi-los.

As fontes desse tipo de erro incluem:

- a) Erros geométricos como: Planeza das superfícies, rugosidade das superfícies, pré-carregamento dos mancais, princípios de projeto elástico x cinemático, filosofias de projeto estrutural;
- b) Erros cinemáticos como: Erros na trajetória de um eixo, desalinhamentos ou componentes mal dimensionados, Ortogonalidade e paralelismo entre eixos;
- c) Erros induzidos por carregamento externo como: Deformação dos componentes, ação da gravidade, aceleração dos eixos;
- d) Erros induzidos por carregamentos na montagem da máquina;
- e) Erros causados por expansão térmica;
- f) Erros causados por instabilidade do material;
- g) Erros de instrumentação.

Os erros causados por forças dinâmicas provocam vibrações na máquina que se refletem diretamente na trajetória do movimento descrito pela mesma e por consequência no acabamento das peças produzidas.

Esses erros possuem como principais fontes:

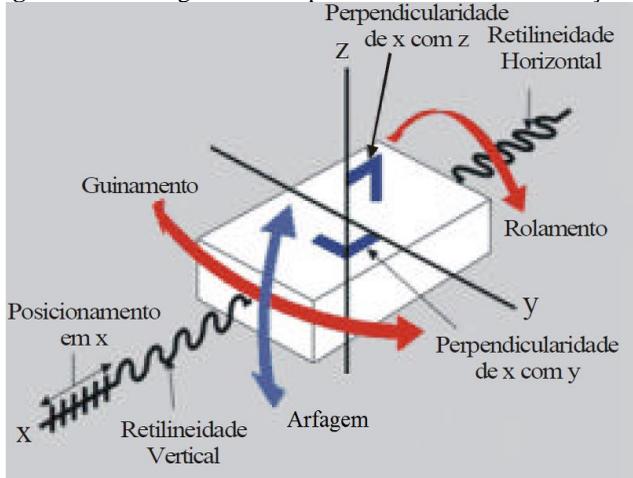
- a) Vibrações transmitidas pelo piso (ambiente externo) ou pelo próprio movimento;
- b) Desbalanceamento em componentes mecânicos rotativos como: motores e transmissões, mancais rotativos;
- c) Tipo de algoritmo;
- d) Atrito e *stick-slip*;
- e) Variação de rigidez.

Segundo (SOUSA, 2000), os tipos de erros geométricos que podem acontecer em máquinas de posicionamento são:

- a) Retilidade horizontal e vertical;
- b) Perpendicularidade;
- c) Posicionamento;
- d) Tombamento;
- e) Rolamento;
- f) Guinamento.

A figura 19 demonstra estes erros em um eixo de movimentação.

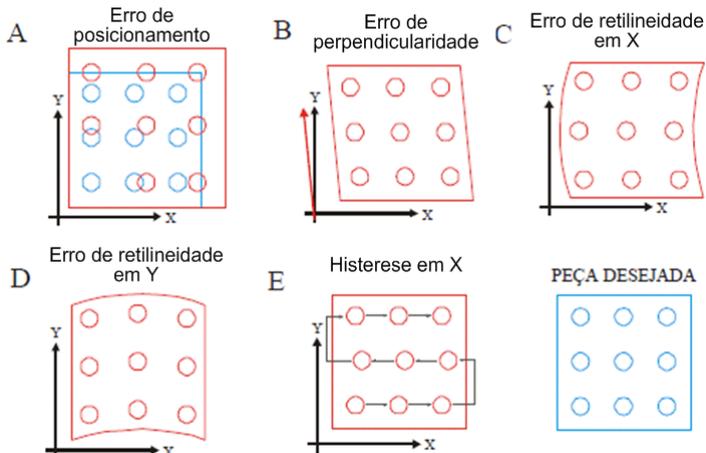
Figura 19 - Erros geométricos para um eixo de movimentação



Fonte: Weck; Bibring (1984) *apud* Sousa (2000)

A figura 20 mostra o reflexo destes erros geométricos em trajetórias executadas para a usinagem de uma peça hipoteticamente usinada.

Figura 20 - Efeitos dos erros geométricos em uma trajetória hipotética



Fonte: Sousa (2000)

Quando se trata de máquinas de grande porte, Segundo (URIARTE, L et al., 2013), a precisão das máquinas ferramenta é

afetada por algumas outras fontes de erros, além das citadas anteriormente. Estas fontes também são classificadas como erros estáticos e dinâmicos. Os erros estáticos mais influentes são:

- a. Erros cinemáticos como: guia de alinhamento e retidão;
- b. Realimentação do sistema de medição;
- c. Deflexão devido ao próprio peso ou o peso da peça;
- d. Movimentos na fundação.

Entre os erros dinâmicos pode se destacar:

- a. Erros termomecânicos;
- b. Efeitos de carga dinâmica;
- c. Precisão de controle da trajetória.

Existem diversas formas de ensaios geométricos para sistemas de movimentação. Destacam-se:

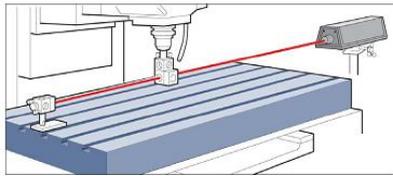
a) INTERFEROMETRIA À LASER

Segundo (NBR-NM-ISO230-1, 1999), o desenvolvimento do interferômetro a LASER propiciou à indústria de máquinas ferramentas um padrão comparativo de elevada precisão utilizado para máquinas ferramentas de todos os tipos e tamanhos. É capaz de medir 6 graus de liberdade: posicionamento linear, retilineidade horizontal, retilineidade vertical, e dois desvios rotacionais (guinamento e arfagem), bem como perpendicularidade entre dois eixos.

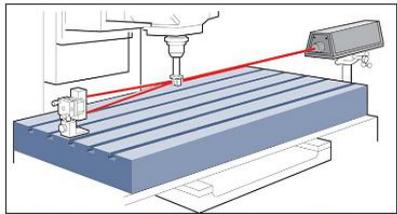
Um interferômetro LASER é utilizado para determinar a trajetória de um refletor fixado na estrutura da máquina, em relação a um divisor de feixe óptico fixo, conforme mostrado esquematicamente na figura 21. As aplicações do sistema de interferometria LASER são variadas para ensaios geométricos em máquina ferramentas. Apresenta vantagens de baixa incerteza de medição e grandes faixas de medições. Em contra partida tem um custo elevado para aquisição, difícil operabilidade tornando os ensaios demorados (SOUSA, 2000).

Segundo (RENISHAW, 2014), sempre que é necessário o que há de mais moderno para reproduzir medições de elevada exatidão em sistemas de movimentação, é utilizada esta tecnologia.

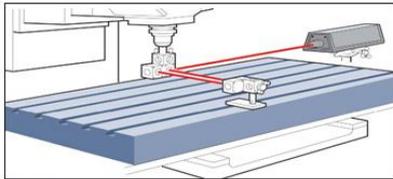
Figura 21 - Ensaio com interferômetro LASER



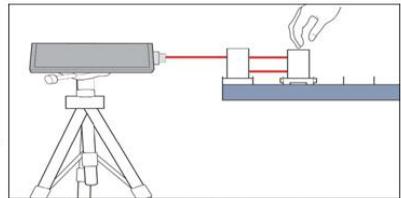
Medição de posição em X



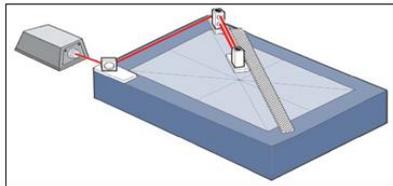
Medição de retilidade ao longo do eixo X



Medição de guinamento em Y



Medição de retilidade de trajetória



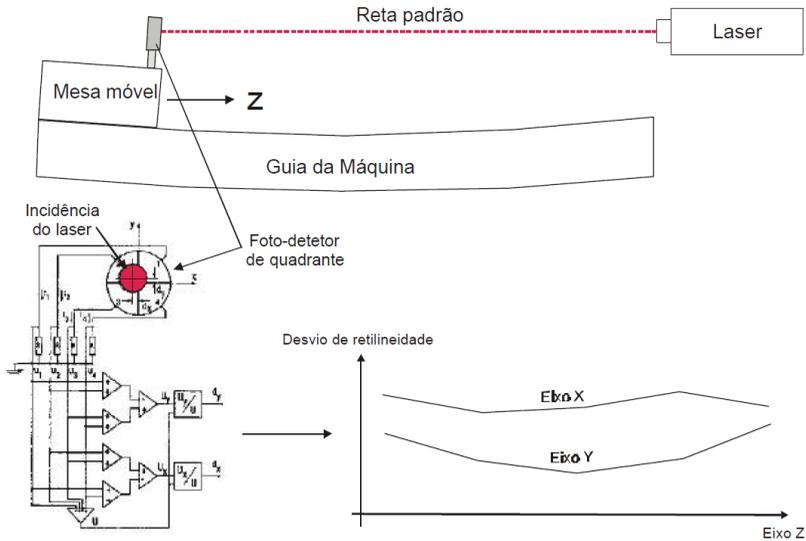
Medição de planicidade

Fonte: Aula de (LABMETRO)

b) LASER DE ALINHAMENTO

Segundo (SCHNEIDER, 1978) *apud* (SOUSA, 2000), o sistema de medição com LASER de alinhamento, emprega como referência o deslocamento retilíneo do feixe do LASER e uma medição do erro em relação a esta reta é feita em qualquer direção transversal ao feixe por um fotodetector bidirecional. A figura 22 mostra uma representação esquemática de uma medição de retilidade feita com um LASER de alinhamento. .

Figura 22 - Aplicação do LASER de alinhamento em ensaios de retilidade

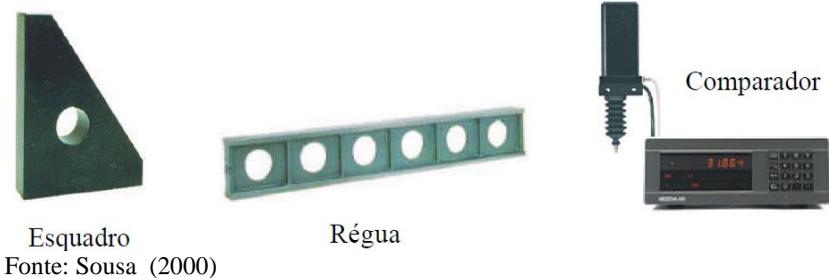


Fonte: Sousa (2000)

c) PADRÕES CORPORIFICADOS: REGUÁS, ESQUADROS E COMPARADOR.

São ensaios geométricos geralmente utilizados para a medição de retilidade e perpendicularidade. Seus resultados são confiáveis, o custo é baixo e de execução rápida, porém o padrão corporificado deve ter tamanho proporcional à área de trabalho da máquina. Tornando-se inviável para máquinas de grande porte, figura 23.

Figura 23 - Padrões corporificados e comparador

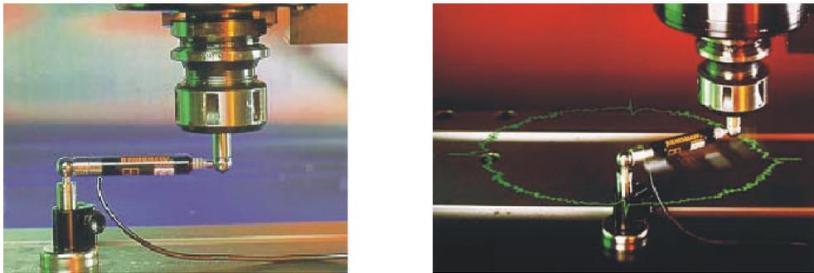


Fonte: Sousa (2000)

d) BALLBAR®

O BallBar® é um ensaio geométrico, que fornece verificação de desempenho do posicionamento da máquina de maneira rápida e fácil. Permite aos usuários avaliar e acompanhar o desempenho de suas máquinas e diagnosticar rapidamente os problemas que podem exigir manutenção. Um transdutor de deslocamento realiza a medição durante uma trajetória de interpolação circular, processada em um *software* que gera um gráfico com os desvios medidos. Este teste é limitado a trajetórias circulares, a área de teste é pequena e as fontes de erro são de difícil separação (RENISHAW, 2014). A figura 24 mostra um sistema Ballbar®.

Figura 24 - Ensaio dinâmico de interpolação circular com BallBar®.



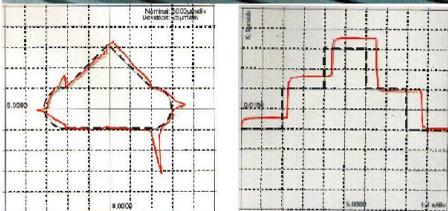
Fonte: Downtime-solutions

e) KGM 182 GRID ENCODER HEIDENHAIN®

Os KGM Grid Encoder® testa dinamicamente a precisão de contorno de máquinas ferramentas controladas por CNC. Uma placa fotossensível mede a trajetória de um emissor de luz acoplado à porta ferramenta da máquina. O sistema é automatizado e permite comparar visualmente as trajetórias programadas com as realizadas. Ele pode realizar, por exemplo, testes de interpolação circulares com raios que variam de 115 milímetros a 1 micrometro, em velocidades de até 80 m/min. O KGM também pode executar testes com qualquer tipo de trajetória em dois eixos. As vantagens do KGM® incluem a sua medição sem contacto, além disto, o erro resultante da geometria da máquina não tem qualquer influência sobre os resultados dos testes de interpolação dos eixos. O ensaio é rápido, porém limitado a uma região da máquina, o que dificulta sua aplicação em máquinas de grande porte

(HEIDENHAIN, 2014). A figura 25 mostra um teste com sistema Grid Encoder.

Figura 25 - Teste com sistema Grid Encoder®



Trajetória Programada - - - - -

Trajetória Real —————

Fonte: Adaptada de Sousa (2000)

f) VM 182® HEIDENHAIN

O sistema de comparação VM 182 é um sistema ideal para testes de aprovação, inspeção e calibração de máquinas-ferramentas e equipamentos de medição. Tem uma faixa de medição de 1520 mm. O VM 182 pode ser usado para determinar as curvas de erro (linear e não linear), assim como o erro de inversão de eixos, ortogonalidade e erro de posicionamento do sistema de movimentação analisado, de acordo com a norma ISO 230-2. (HEIDENHAIN, 2014).

Os ensaios geométricos podem ser classificados em métodos de qualificação e métodos de avaliação. Sendo que os métodos de qualificação permitem obter resultados bastante confiáveis e completos sobre o estado da máquina. Mas são de difícil aplicação, exigindo pessoal altamente qualificado para a tarefa e envolvendo muito

tempo de ensaio e alto custo. Um exemplo é o LASER interferométrico, (SOUSA, 2000).

Os dois últimos métodos de avaliação apresentados (Ballbar e Grid Encoder Heidenhain) são de aplicações fáceis e rápidas, envolvem equipamento de alto custo, e fornecem apenas uma avaliação geral sobre o estado da máquina, não separando as fontes de erros.

A maior parte destes métodos são muito demorados, principalmente para avaliar os volumes de trabalho das máquinas-ferramentas de grande porte, ou mesmo não válidos para máquinas de grande porte devido às limitações dos tamanhos dos artefatos padrão utilizados (URIARTE, L et al., 2013).

2.6 A IMPORTÂNCIA DESTA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando a grande dificuldade de acesso a trabalhos com a particularidade de sistemas de movimentação de grande porte para máquinas LASER, haja visto que não existe uma vasta pesquisa em sistemas com estas características pelos custos envolvidos, este capítulo 2 é fundamental para gerar embasamento teórico sobre diversos assuntos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, como: as aplicações LASER planejadas, obter um levantamento dos requisitos necessários para o sistema de movimentação, entender melhor o funcionamento e a relação entre todas as partes que compõem este sistema e conhecer diversos dispositivos de avaliação para sistemas de movimentação.

Quando almejamos trabalhar com sistemas de movimentações precisos, é fundamental dar a devida atenção a todas as partes que o compõem. Mesmo utilizando os motores e controladores mais precisos, é impossível obter grandes precisões de movimentação e posicionamento, se os componentes e ou a estrutura mecânica do sistema não estiver adequada.

O projeto e a concepção estrutural do sistema de movimentação exercem influência não só na precisão de movimentação, mas também estão diretamente ligados ao tipo de operação que o sistema realizará, podendo facilitar ou mesmo inviabilizar a execução de determinadas aplicações.

Mesmo um sistema de movimentação bem projetado, com a concepção, motores e controladores adequados, pode proporcionar precisão de movimentação e posicionamento fora do esperado, se o

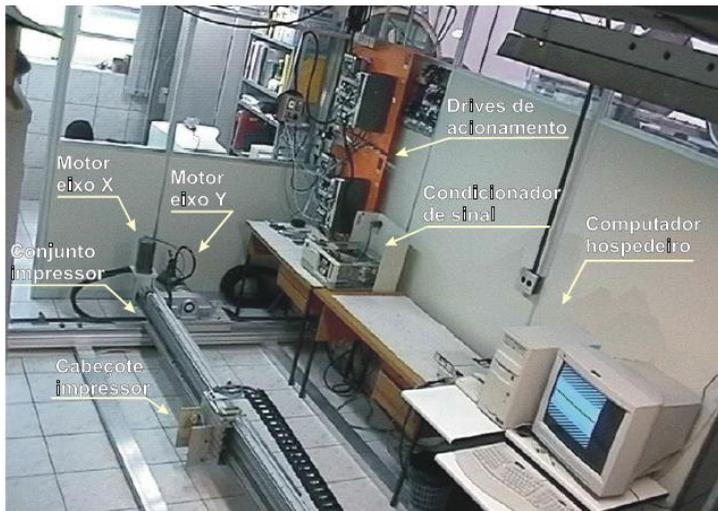
conjunto de parâmetros de controle PID, não estiver devidamente ajustado.

São vários os métodos e dispositivos de avaliação de sistemas de movimentação convencionais. Os sistemas de grande porte exigem métodos e dispositivos diferenciados devido ao tamanho de seus componentes. Em virtude do alto custo de dispositivos de medições para sistemas de movimentação de grande porte, serão desenvolvidas soluções de avaliação, que utilizem as ferramentas e dispositivos de medição disponíveis no laboratório e proporcionem resultados confiáveis e consistentes. E por fim, conhecer as condições de trabalho do sistema de movimentação e julgar para quais aplicações LASER, este é adequado.

3 DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

O sistema de movimentação projetado no escopo do trabalho de doutorado (BURGOA, 2004) no LHW, disponibilizado ao LMP para a movimentação do cabeçote LASER, foi desenvolvido inicialmente para desempenhar a função de impressão por jato de tinta, como um Raster extra largo de grande porte (área útil de 3 x 1,10 m). É um sistema de movimentação de duas coordenadas, acionado por servomotores rotativos WEG, comandados por servoconversores WEG, e controlados por um computador através de um programa desenvolvido em LabVIEW, com o auxílio de uma placa de controle de movimento National Instruments modelo PCI-7344. A figura 26 mostra o protótipo do sistema impressor extra largo.

Figura 26 - Protótipo do sistema impressor de formato extra-largo



Fonte: Burgoa (2004)

Este sistema de movimentação foi desenvolvido e validado no doutorado de (BURGOA, 2004) e mestrado de (ROSALES, 2007) para a aplicação de impressão. E estava fora de uso desde então, até este momento, quando se verificou que o sistema não estava mais operacional. Contatou-se então que seria necessária uma atualização no comando e controle da máquina, principalmente pela obsolescência de alguns componentes:

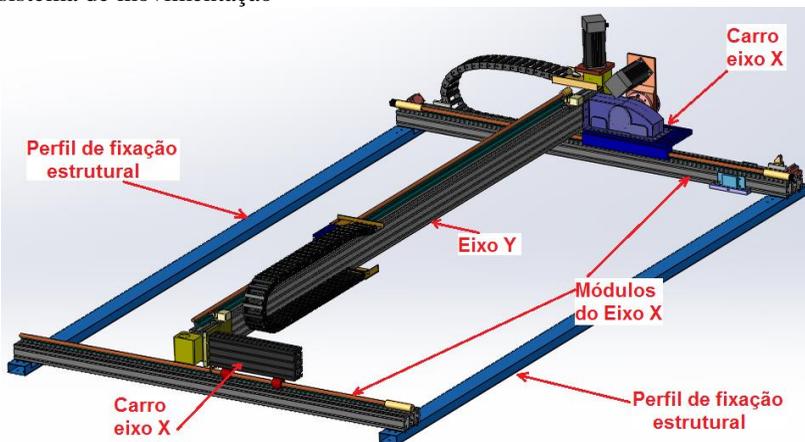
- a) O computador responsável pelo comando e controle da máquina estava obsoleto, impossibilitando o uso.
- b) O software LabVIEW desatualizado; incompatibilidade com a versão atualmente disponível;
- c) Não foi possível operar a placa de controle de movimento, por não se encontrar o Driver da placa;
- d) A falta de informações sobre o comando e controle do sistema de movimentação desenvolvido por (BURGOA, 2004) e (ROSALES) inviabilizou a adequação dos softwares desenvolvidos para a nova aplicação (movimentação do cabeçote LASER).
- e) O programa para o comando e controle do movimento foi desenvolvido pelos projetistas do sistema de movimentação em linguagem aberta, o que em princípio tem características positivas, pois, permite a continuidade de desenvolvimento. Porém, existem várias maneiras de se concluir um objetivo específico numa programação, fato este que agrega ao programa características muito particulares de cada programador. Esta versatilidade facilita o desenvolvimento inicial de um programa, mas pode dificultar muito a continuidade do mesmo por outro programador, visto que cada um pode ter uma visão de desenvolvimento diferente. Por exemplo, se o código não estiver bem estruturado e organizado, dificultará para que outra pessoa possa entender e dar continuidade. Em diversas situações é mais fácil e rápido escrever um novo programa, do que dar continuidade no programa de outra pessoa.

Baseado nos argumentos descritos acima foi feita uma análise da situação do comando e controle da máquina naquele momento, para decidir o que seria feito. Então, optou-se por uma readequação do comando e controle da máquina, que será descrita nos capítulos seguintes. Após a readequação da máquina serão realizados testes para primeira avaliação das características estáticas e dinâmicas do sistema de movimentação.

3.2 MONTAGEM DA MÁQUINA

A figura 27 mostra uma representação esquemática do sistema de movimentação desenhado em *software* CAD.

Figura 27 – Representação esquemática da estrutura mecânica original do sistema de movimentação



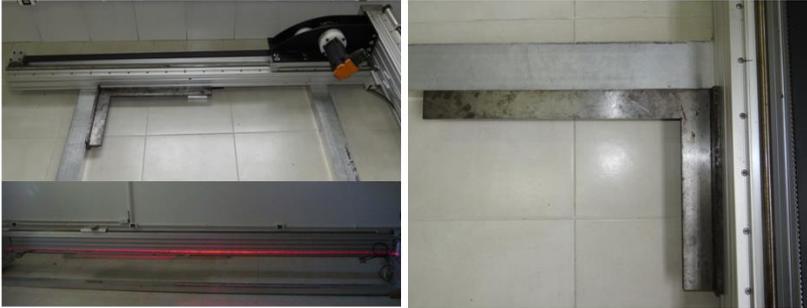
Fonte: Do autor

O sistema de movimentação tem uma estrutura modular que facilitou a desmontagem no LHW e remontagem no Laboratório LASER do LMP. Apenas foram desmontados os módulos principais (eixos X e Y). As guias, castanhas com esferas recirculantes e módulos de transmissão de movimento não foram desmontados. Os componentes foram limpos e lubrificadas adequadamente.

Na montagem foram observados detalhes de ortogonalidade e paralelismo entre os componentes, através da utilização de um esquadro, figura 28.

O alinhamento dos módulos do eixo X apresentou uma dificuldade elevada, pois o sistema não apresentava nenhuma referência física de montagem e alinhamento que facilitem o alinhamento, paralelismo e esquadro dos módulos que compõem a máquina. Foram empregados um esquadro de 500 mm por 300 mm e um LASER autonivelador (BOSCH 30M - GPL 5). A figura 20 mostra como estes foram utilizados e o ANEXO E mostra maiores detalhes do LASER auto nivelador.

Figura 28 – Dispositivos auxiliares na montagem dos componentes do sistema de movimentação

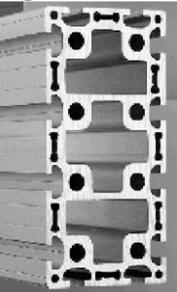


Fonte: Do autor

3.2.1 Detalhes mecânicos da máquina

As partes da estrutura do sistema de movimentação são constituídas de perfis de Alumínio da marca SCHÜCO DESIGN, apresentados na figura 29. Segundo dados do fabricante *apud* (BURGOA, 2004), estes perfis de alumínio, devido à forma especial de sua seção, oferecem uma grande resistência à flexão e torções, permitindo o seu uso para deslocamentos de percursos longos sem necessidade de suportes intermediários. No caso do eixo Y o sistema apresenta um vão livre de 4 metros. A flexão por peso próprio pode ser desprezada ou quando submetido ao carregamento complementar do deslocamento do carro e do cabeçote LASER.

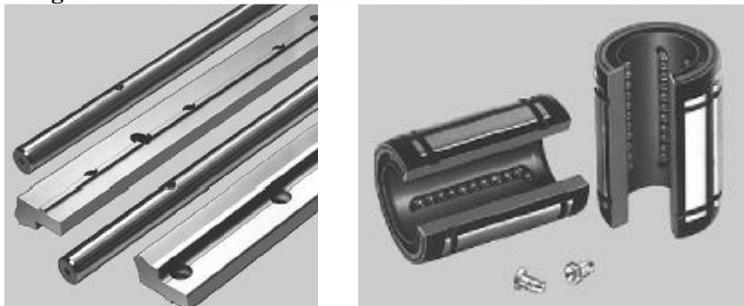
Figura 29 - Perfil de Al 160x80



Fonte: Schüco Design. *apud* Burgoa (2004)

Segundo o manual técnico do fabricante (SCHÜCO DESIGN, 2003) *apud* (BURGOA, 2004), as guias lineares cilíndricas para o deslocamento translativo, utilizadas para os dois eixos apresentam um diâmetro de 20 mm. Elas são rigidamente acopladas ao perfil de suporte, permitem movimentar cargas de até 8837 N e velocidades de até 180 m/min. Segundo Burgoa, é possível atingir uma exatidão de 0,05 mm. As guias lineares são abraçadas por luvas com esferas recirculantes e garantem um movimento silencioso e com baixo atrito, como mostrado na figura 30.

Figura 30 - Guias lineares cilíndricas com castanha de esferas recirculantes



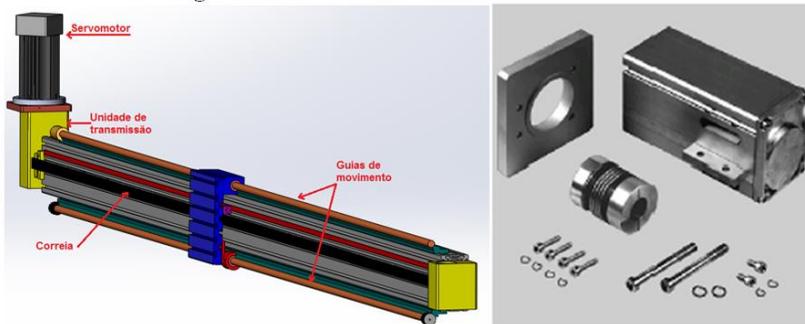
Fonte: Burgoa (2004)

A movimentação dos dois eixos é acionada por motor servo controlado, transmitido por correia e polia sincronizadora. As concepções das transmissões tem o mesmo princípio, porém, são distintas nos dois eixos.

O eixo y é acionado por um servomotor rotativo acoplado a uma polia sincronizadora e uma correia sincronizadora fechada. O carro "porta ferramentas" destacado na parte central do eixo y na figura 23, esta fixado na correia sincronizadora de forma que, ao movimentar a correia, o carro se move junto. O servomotor rotativo está montado num módulo de transmissão da marca SCHÜCO DESIGN, constituído de carenagem para fixação do servomotor. Entre o servomotor e a polia sincronizadora um acoplamento do tipo "fole" compensa eventuais desalinhamentos. O servomotor tem torque de 2,5 Nm e está acoplado diretamente na polia acionadora. A polia utilizada para o acionamento tem diâmetro de 66,20 mm, com 26 dentes e passo de 8 mm.

A figura 31 mostra o módulo de transmissão utilizado neste eixo, o ANEXO F apresenta maiores detalhes.

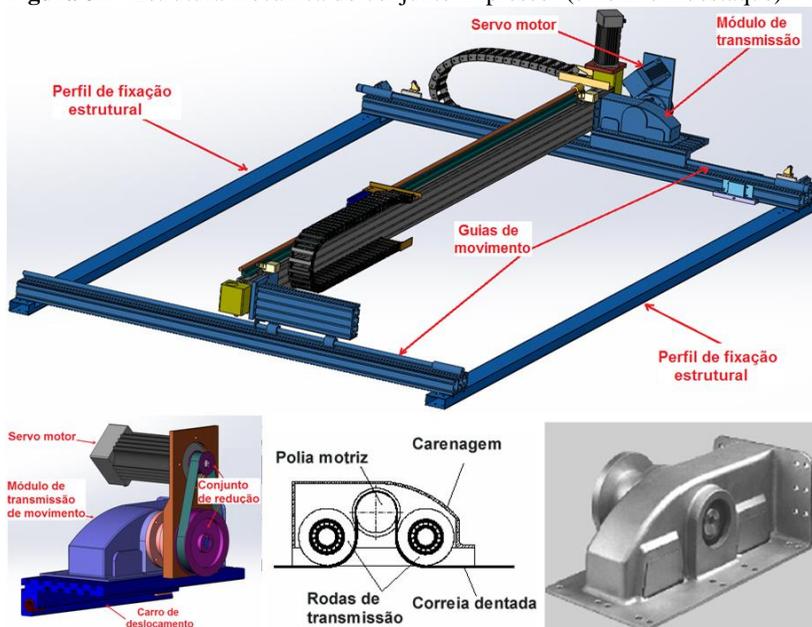
Figura 31 - Eixo Y e módulo de transmissão



Fonte: Do autor

O conjunto do eixo Y se movimenta sobre o eixo X, conforme mostrado na figura 32, que é constituído de dois módulos de movimentação montados numa distância de 4 metros entre si. Os módulos de movimentação do eixo X estão montados sobre 2 dois perfis retangulares de alumínio com a função estrutural. Cada módulo do eixo X é constituído de um perfil estrutural de alumínio com uma guia linear instalada sobre este. Sobre cada módulo um carro específico suporta a estrutura do eixo Y. O acionamento do eixo X é feito por um servomotor rotativo, acoplado ao módulo de transmissão de movimento da marca SCHÜCO DESIGN, acoplado a um conjunto de redução que faz a ligação com o servomotor. O módulo de transmissão é constituído por uma polia sincronizadora acionadora, 2 polias tensionadoras, e uma correia sincronizadora aberta fixada nas extremidades do perfil estrutural de alumínio. A correia sincronizadora contorna a polia sincronizadora por 180°, conforme mostrado no detalhe da figura 32.

Figura 32 - Estrutura mecânica do conjunto impressor (eixo X em destaque)



Fonte: Do autor

- Dispositivo de movimentação do eixo X com o servomotor acoplado e o conjunto de transmissão;
- Vista detalhada do módulo de transmissão;
- Foto do módulo de transmissão de movimento.

Como mostrado na figura 32, o módulo de transmissão de movimento está montado sobre uma carenagem de alumínio, onde se encontram a polia sincronizadora acionadora, duas polias tensionadoras e uma correia aberta, estática em relação ao eixo X. Em decorrência do grande ângulo de engajamento da correia com a polia sincronizadora garante-se uma pequena histerese na alteração do sentido do movimento sobre o eixo X. O motor deste eixo tem torque de 2,5 Nm e está acoplado diretamente na estrutura de um dos carros do eixo X, acionando a polia acionadora. Então, ao acionar o servomotor do módulo de transmissão, o carro X se movimenta.

Os acionamentos do sistema de movimentação são motores CC *brushless* WEG SWA 56-2,5-60 com as seguintes características: Rotação máxima de 6000 RPM, torque de 2,5 Nm. Estes são

comandados por servoconversores SCA 04 (figura 33). Segundo o fabricante os servoconversores transforma a tensão alternada da rede trifásica em tensão contínua, por meio de um retificador, sendo em seguida, filtrada por um banco de capacitores. Posteriormente um inversor de frequência gera novamente uma tensão trifásica, com tensão e frequência variáveis, utilizando técnicas de modulação PWM senoidal e controle vetorial.

Figura 33 - Servoconversor e servomotor SCA 04



Fonte: Weg, I. S. A.-A.

O servoconversor SCA 04 possui sistema de controle em malha fechada, onde a realimentação é realizada pelo sinal oriundo do resolver do servomotor. Possui três modos de operação: modo posição, modo velocidade e modo torque. Além disto, possui um simulador de encoder que transforma informações do resolver do motor em pulsos de encoder para aplicar em máquinas CNC. Possui entradas analógicas para controle do motor com tensões entre -10 Volts e +10 Volts e entradas e saídas digitais para viabilizar outras lógicas de controle.

3.3 COMANDO E CONTROLE

O comando e controle é a parte da máquina responsável por interpretar as informações passadas pelo usuário e transmiti-las aos acionamentos da maneira correta. Cabe a este interpolar eixos, ligar e desligar componentes, receber os sinais dos sensores, interpretá-los e agir quando necessário, dentre outras funções.

O sistema de comando e controle desenvolvido por Burgoa (BURGOA, 2004) é realizado por meio de uma placa de controle de movimento (National Instruments, modelo PCI-7344), instalada no

computador responsável por comandar e controlar o sistema de movimentação, através do *software* que foi desenvolvido em linguagem gráfica (LabVIEW) para esta aplicação.

Como o sistema de movimentação não estava operante conforme os argumentos descritos na introdução deste capítulo, após uma análise da situação do comando e controle chegou-se a conclusão de que seria necessária uma readequação do conjunto. Para isto levantou-se, então, possíveis soluções de comando e controle que atendem os requisitos necessários:

- a) Possibilitar uma fácil manutenção, quando necessário;
- b) Viabilizar as proteções para a segurança da máquina e do operador em casos de emergência ou falhas em operações;
- c) Atender aos requisitos de comando e controle de velocidade, aceleração, e precisão de posicionamento;
- d) O sistema de comando e controle adotado deve ser de fácil compreensão e operabilidade, para facilitar a integração de novos usuários. Vale ressaltar que este é um critério que depende da solução escolhida. A solução adotada deve utilizar linguagem de comandos padronizados, (por exemplo, o código G utilizado amplamente em CNCs, o qual é de difusão ampla);
- e) A IHM (interface homem máquina) deve ser de fácil acesso e entendimento;
- f) A solução deve ser capaz de controlar até quatro eixos e possuir duas saídas digitais para permitir o controle da fonte LASER;
- g) A solução adotada deve possibilitar modificações ou implementações, para a viabilização de futuros trabalhos.

Baseado nestes requisitos foram encontradas 6 possíveis soluções para o comando e controle do sistema de movimentação:

- a) FPGA (*field-programmable gate array*);
- b) Microcontrolador;
- c) DSP (*Digital signal processing*);
- d) Solução baseado em PC com o auxílio de uma placa de controle de movimento;
- e) CNC de arquitetura fechada;
- f) Solução baseada em PC.

Para esclarecer e analisar as possíveis soluções listadas foram considerados aspectos econômicos, conhecimentos técnicos e tempo disponível para a execução do trabalho.

É possível fabricar um comando e controle utilizando tecnologias FPGA, DSP ou microcontroladores. Desta forma, seria possível adaptar todas as funções necessárias e eliminar as desnecessárias, podendo chegar a uma solução robusta e muito eficiente. Para empregar esta solução é necessário um conhecimento bastante amplo de várias áreas, além de um tempo considerável para o desenvolvimento. A seguir são detalhados o funcionamento dos FPGA e DSP.

- a) FPGA é uma matriz de portas lógicas que suporta a implementação de circuitos digitais. Basicamente sempre que alto processamento em tempo real for necessário, a utilização de um FPGA deve ser considerada;
- b) DSP (processamento de Sinal Digital) são microprocessadores especializados em processamento digital de sinal, usados para processar sinais em tempo real ou *off-line*. Uma ótima característica do DSP é sua alta velocidade comparada a outros microcontroladores.

Outra solução é o emprego de placas de controle de movimento. Estas utilizam circuitos integrados complexos que atuam de maneira conjunta e alcançam bons resultados em sistemas de movimentação, trabalhando de forma digital ou analógica e em malha fechada ou aberta. Estas soluções não são de baixo custo, porém de menor custo quando comparadas a um CNC de arquitetura fechada. Um ponto negativo de algumas destas soluções é a necessidade de criação de um *software*, o que pode limitar o sistema de movimentação pela utilização de ferramentas exclusivas das empresas fabricantes.

A necessidade de desenvolvimento do *software* apresenta a vantagem de poder-se criar o *layout* de acordo com os interesses do usuário. Contraopondo este aspecto positivo temos que considerar que para o desenvolvimento de tal programa é necessário uma boa bagagem de programação e um tempo considerável para este desenvolvimento.

Tendo em vista que o comando e controle atual utiliza uma placa de controle de movimento (National Instruments, modelo PCI-7344) não seria necessária, pois a solução atual de comando e controle já dispõe de uma placa de controle de movimento, tornando esta uma solução viável e de baixo custo, que deve ser considerada junto às outras. A figura 34 mostra a placa de controle de movimento utilizada originalmente.

Figura 34 - Placa de controle de movimento PCI-7344.



Fonte: National Instruments

Os CNCs de arquitetura fechada são uma ótima solução, visto que já possuem algoritmo para interpolação, comandam vários eixos simultâneos, interpretam códigos G, possuem entradas e saídas para comandos simples e sinais. Alguns deles podem ter alterações em suas telas com programações padrão, monitoramento, controle por rede, ser interligado a outras máquinas, além de poderem funcionar de maneira mais genérica ou específica para um tipo de aplicação, como fresamento, torneamento ou processos a LASER. Possuem altas velocidades de processamento, conseguindo receber grandes frequências de sinais de medição e corresponder de maneira adequada à velocidade, aceleração, precisão de posicionamento e robustez, necessárias no projeto. Todos estes quesitos apresentados tornam esta solução uma ótima escolha para o trabalho. Entretanto, o custo é bastante alto.

É válido salientar que alguns CNCs possuem integrações com sistemas LASER de algumas fabricantes, podendo controlar através de um único sistema de controle a fonte LASER e o sistema de movimentação, agregando robustez, segurança e confiabilidade ao sistema. Considerando o Custo total do sistema LASER, o comando industrial do sistema de movimentação representa algo em torno de 10% do total. A figura 35 mostra a interface homem máquina IHM de um CNC de arquitetura fechada.

Figura 35 - CNC Fanuc de arquitetura fechada.



Fonte: FANUC

Outra solução frequentemente utilizada para *retrofitting* de máquinas CNC são os *softwares* interpretadores de código G baseados em PC. No início estes *softwares* eram utilizados em máquinas CNC apenas por *hobby*. Com o passar do tempo e as significativas evoluções destes sistemas, as indústrias também começaram a utilizá-los.

"Recentemente, controladores industriais baseados em PC vêm substituindo controladores convencionais, com base em uma estrutura de hardware fechada" (SUH et al., 2008).

Estes controladores industriais baseados em PC podem ser encontrados de três modos diferentes segundo (SUH et al., 2008):

- a) Com o auxílio de uma placa de controle de movimento conectada ao *slot* do PC, a qual exerce a função NCK (*numeric control kernel*) / CLP (controlador lógico programável), com seu próprio processador. E o PC exerce a função de IHM;
- b) Dois PCs são usados, estão ligados através de uma comunicação de alta velocidade. Um computador é utilizado como IHM, o outro é para o NCK / CLP;
- c) Um PC com uma única CPU executa IHM, NCK e CLP em vários ambientes, com sistema operacional em tempo real.

Um fator importante para o conceito de máquina ferramenta de baixo custo foi o desenvolvimento dos CNC baseados em PC.

Controladores de baixo custo, como o Mach3 desenvolvido pela divisão Artsoft da Newfangled Solutions LLC. Concebido inicialmente para aplicações restritas, *hobby* e pesquisa, aproveitaram os recursos mais avançados das placas de controle de movimento para ganhar aplicações industriais OVERBY, 2011 *apud* (GESSER, 2012).

Apesar de estas soluções, por trabalharem de forma digital, geralmente serem utilizados para acionamentos com motores de passo, estão sendo bastante utilizados em fresadoras e sistemas de movimentação de maneira profissional. Estes *softwares* geram pulsos de passo e direção, não havendo forma de comandar diretamente servomotores de maneira analógica. É necessário desenvolver ou adquirir uma placa de interface para fazer a conversão DA

(digital/analógica) que possuísse o *plugin* necessário para atuar junto ao *software*.

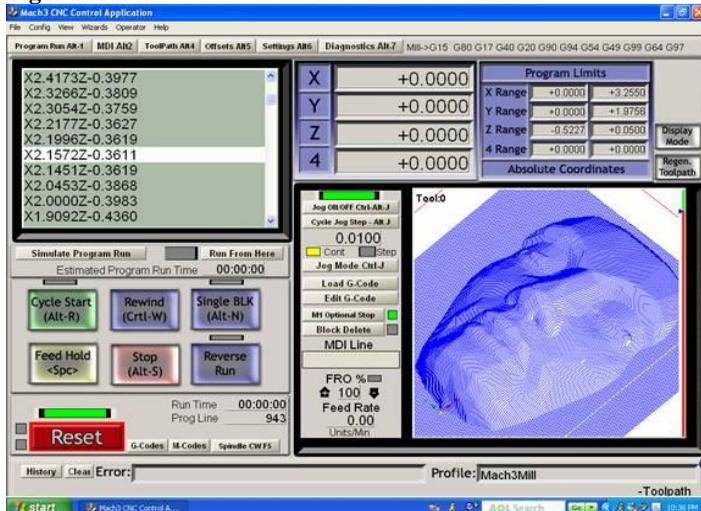
Outra possibilidade é comandar o servomotor de maneira digital. Alguns fabricantes já disponibilizam este tipo de controle pronto dentro do servoconversor e outros disponibilizam uma plataforma para desenvolver o programa necessário.

"Diversos desenvolvedores de máquinas CNC encontraram no Mach3 uma solução econômica e extremamente flexível, CSLAB, 2011; KSI Labs, 2011" *apud* (GESSER, 2012).

O custo desta solução é muito baixo. É permitido utilizar o *software* sem custo, porém, de maneira limitada. Salienta-se que o computador hospedeiro pode ser otimizado, a fim de priorizar o processamento do software, não dividindo capacidade de processamento com outros *softwares* e processos do sistema operacional.

Esta solução possui baixo custo, é uma solução inovadora, atende aos requisitos listados e é a solução julgada de mais rápida implementação. A figura 36 mostra a IHM de um CNC baseado em PC.

Figura 36 - CNC baseado em PC utilizando MACH3



Fonte:

Microprote, software

A tabela 2 mostra a relação entre as soluções encontradas e os requisitos mais importantes levados em consideração para a escolha da solução.

Tabela 2 - Soluções x Requisitos.

SOLUÇÕES	Tempo para implementação	Custo	Dificuldade de implementação	Atende aos requisitos de movimentação	Conhecimento técnico necessário
FPGA	alto	baixo	alta	sim	alto
DSP	alto	baixo	alta	sim	alto
Microcontrolador	alto	baixo	alta	sim	alto
Placa de controle de movimento	alto	baixo	alta	sim	alto
CNC Arquitetura fechada	médio	alto	baixa	sim	baixo
CNC baseado em PC	médio	baixo	média	sim	médio

Fonte: Do autor

A análise das soluções e requisitos mostrados na Tabela coloca duas soluções em evidência. As demais: FPGA, DSP, Microcontroladores e a placa de controle de movimento não se mostraram adequadas para a atual situação do sistema proposto. O principal motivo para desconsiderar estas soluções é o tempo longo para a implementação e a necessidade de um grande conhecimento técnico das respectivas áreas.

A solução com CNC de arquitetura fechada seria a mais adequada para o trabalho. Porém, apesar de o tempo para a implementação desta solução ser pequeno, o tempo para a aquisição de um produto com um valor tão elevado como este tem que ser considerado. Este aspecto coloca em risco a conclusão do trabalho até a data estipulada.

Decidiu-se utilizar um comando CNC baseado em PC, já que este é viável de ser realizado no tempo de implementação, dispõe-se os conhecimentos técnicos necessários e o custo atende as exigências mínimas de requisitos de movimentação.

Os CNCs baseados em PC utilizam *softwares* para a realização do comando/controle. Dentre os *softwares* existentes no mercado, os mais conhecidos e utilizados são: o EMC2, executado em ambiente Linux, muito conhecido por possibilitar alterações na forma de trabalho do processador, podendo evitar processamentos desnecessários. Outro *software* utilizado é o Mach3, o qual é executado na plataforma *Windows*.

Baseado em argumentos que serão descritos no decorrer deste capítulo, optou-se pela utilização do *software* Mach3, disponível para *download* e maiores informações em (ARTSOFT).

Um grande atrativo do Mach3 é a possibilidade de utilização deste sem custos, para programas com até 500 linhas de código G, o que

já viabilizaria diversos experimentos dentro do laboratório. O custo da versão completa é de US\$ 175,00.

Considerado o mais popular dos controladores de baixo custo, o Mach3 oferece considerável flexibilidade para se adaptar a máquinas específicas. Os sinais de comando para até seis eixos de movimento simultâneos são digitais e baseados no padrão *STEP/DIR* compatíveis com os *drivers* de motor de passo e com a maioria dos *servoconverters* modernos CSLAB, 2011; KSI Labs, 2011 *apud* (GESSER, 2012).

Outro aspecto muito relevante no quesito desenvolvimento é a grande quantidade de informações disponíveis em diversos fóruns e grupos de pesquisa na internet, o que confere um excelente suporte para a implementação e manutenção.

O *software* possui uma programação que permite alterar o funcionamento das prioridades de tempo do processador, otimizando o desempenho para interpolar os eixos e enviar os sinais para os acionamentos via porta paralela, sem a necessidade de qualquer *hardware* adicional para o controle.

Existem várias características que tornam o *software* muito vantajoso, como a compensação de folga, possibilidade de alterar o *layout* da tela de trabalho, ampla configuração das entradas e saídas, detector de presença (*charge pump*) muito útil para a segurança do sistema, dentre outras características.

Alguns fabricantes de máquinas CNC utilizam Mach3 para o comando e controle, como é o caso da empresa Vetor CNC (Fabricante de máquinas CNC de pequeno, médio e grande porte), disponível em (VETOR, 2014) e a empresa Machmotion (Especializada em soluções CNC), disponível em (MACHMOTION, 2013).

Este *software* disponibiliza saídas e entradas digitais suficientes para o acionamento e monitoramento de segurança da fonte LASER.

3.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO COMANDO E CONTROLE

Para a implementação do comando e controle foi necessário definir o modo como seria feita a comunicação entre o Mach3 e os servoconverters (SCA 04). O sistema Mach3 trabalha com sinais digitais (STEP e DIR) via porta paralela do PC e o SCA 04 necessita de

um dispositivo adicional do fabricante dos servomotores e servoconversores (cartão posicionador POS-01), que proporciona uma programação em linguagem *Ladder*, onde é possível desenvolver o comando e controle de maneira digital (WEG, I. S. A.-A.).

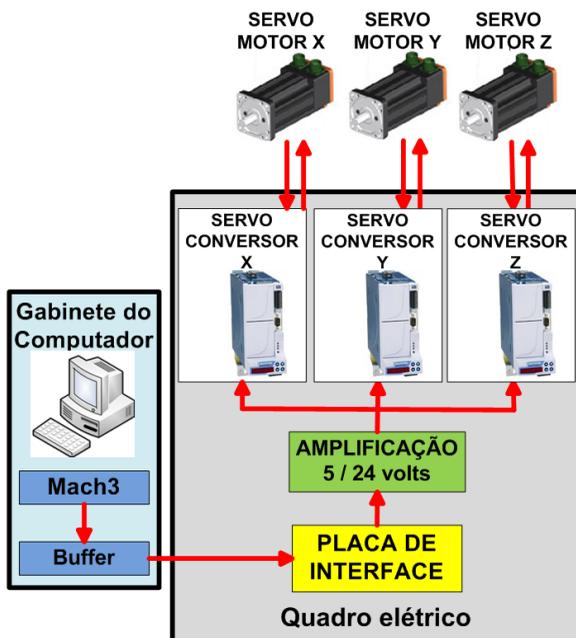
Foram encontradas placas de controle de movimento que trabalham de forma analógica ou digital. Algumas podem realizar a conversão de sinais de entrada digitais STEP e DIR para sinais analógicos de -10V a +10V. Possuem *plugins* para o funcionamento com o Mach3 e possibilitam trabalhar em malha fechada. Estes aspectos que tornam esta uma excelente solução a ser adotada. Como exemplo citam-se as placas KFLOP da marca Dynomotion (DYNOMOTION), a placa DMC-18x6 da marca Galil (GALIL, 2013a) e a placa DMC-40x0 também da marca Galil (GALIL, 2013b), a importação destas placas é demorada e não viabiliza seu emprego no escopo deste trabalho.

Os servoconversores instalados no sistema de movimentação não permitem ser controlados diretamente pelo Mach3. Considerando que o LMP dispunha de servoconversores SCA 06 (WEG), capazes de comandar e controlar os servomotores WEG SWA 56-2,5-60 e de estes serem compatíveis com motores *brushless* da WEG e dispor de programação *Ladder* sem a necessidade de dispositivos adicionais, optou-se pela troca dos servoconversores SCA 04 por SCA06. Deste modo o Mach3 utiliza o mesmo padrão de acionamento de motores de passo (sinais digitais STEP e DIR), para comandar os servomotores WEG através de suas entradas digitais e uma programação *Ladder* pré-estabelecida na memória do servoconversor. Desta maneira é fechada a malha de posicionamento e movimentação nos próprios servoconversores.

A programação *Ladder* adota um ambiente de programação de linguagem gráfica, onde é necessário desenvolver o programa de movimentação do servomotor de forma digital, com base no manual de programação (WEG).

A partir da solução adotada foi estabelecido um diagrama de sinais para a lógica do comando e controle, o qual pode ser visto na figura 37.

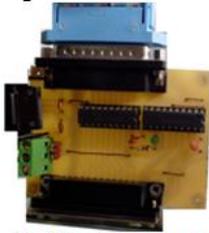
Figura 37 - Diagrama de sinais simplificado (lógica de acionamento)



Fonte: Do autor

O computador, com auxílio do *software* Mach3 gera os trens de pulsos digitais que comandam a movimentação. Estes sinais saem do PC e passam por um *buffer* de corrente, desenvolvido para a função de amplificação da tensão e corrente (3.5 para 5 volts). Isto é feito porque a porta paralela do computador utilizado e a maioria dos computadores modernos (desktop) trabalham com 3.5 volts em média na saída da porta paralela. Existe a necessidade de trabalhar com sinais de 5 volts para o correto funcionamento do acionamento. Do *buffer* os sinais são enviados por meio de uma porta paralela para a placa de interface, onde são recebidos pelos opto acopladores e em seguida devidamente separados e enviados para a placa de amplificação de tensão (5 para 24 volts), para atender a tensão de trabalho da lógica de acionamento dos servoconversores (SCA 06). As três placas foram desenvolvidos e confeccionados no escopo deste trabalho e podem ser vistas na figura 38.

Figura 38 - Placas para o comando e controle dos servoacionamentos



Buffer de corrente



Placa de interface



Placa de amplificação
de tensão 5 - 24 volts

Fonte: Do autor

Dando sequência à lógica de acionamento, os servoconvertidores recebem os sinais, que são interpretados pela programação *Ladder* e repassados para os servomotores que executam o acionamento. Com a movimentação do eixo, o resolver embutido no servomotor envia sinais ao servoconvertidor realimentando a posição, desta forma fechando a malha de posição entre servoconvertidor e servomotor.

3.3.2 O QUADRO ELÉTRICO

O quadro elétrico foi projetado e construído baseado nas orientações do manual do SCA 06 do fabricante WEG, respeitando todas as exigências de instalação de componentes, comandos, sinalizações e as características determinadas para o acionamento dos servoconvertidores. Foram estudadas também algumas normas:

- a) ABNT NBR 5410 Instalações elétricas de baixa tensão;
- b) NBR IEC 6043;
- c) 9-1 Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão;
- d) NBR IEC 60947 Dispositivos de manobra e comando de baixa tensão;
- e) NBR IEC 62208 Invólucros vazios destinados a conjunto de manobra e controle de baixa tensão — Requisitos gerais.

A partir destas normas, levantou-se uma série de sugestões e orientações, as quais foram seguidas para a implementação do quadro elétrico, em diversos aspectos como:

- a) Minimizar as influências por parte de ruídos (separar potência e sinais);
- b) Identificação dos fios pelas cores;
- c) Temperatura ambiente (analisar catálogos técnicos de fabricantes);
- d) Tipo construtivo (painel modular);
- e) Disposição das entradas e saídas de cabos e/ou barramentos (pela parte inferior, superior ou lateral);
- f) Acesso interno, dispositivos que requerem rearme manual ou reposição durante o serviço de manutenção (relés, fusíveis), devem ter fácil acesso dentro do gabinete elétrico;
- g) Deve haver uma clara identificação dos componentes do gabinete elétrico, (relés, fusíveis, etc) e com os símbolos e nomenclatura padrão indicados nos desenhos e esquemas relacionados.

Os diagramas elétricos de potência e intertravamento do quadro elétrico estão nos APÊNDICES A, B, C.

O quadro elétrico dispõe de intertravamento de segurança, relés, contactores, fusíveis, disjuntores, relés de falta de fase, transformador, resistores de frenagem, botões de operações e parada de emergência, fontes, além da placa de interface, placa de amplificação (5 para 24 volts) e servoconversores. Na figura 39 são mostrados os componentes montados no gabinete de quadro elétrico. No APÊNDICE D, E, F são mostrados detalhes complementares do quadro elétrico.

As placas de: interface, amplificação (5 para 24) e o *buffer*, foram projetadas e fabricadas no escopo deste trabalho para desempenhar as funções necessárias para o correto funcionamento do comando e controle.

Figura 39 - Quadro elétrico



Fonte: Do autor

3.4 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO COMANDO E CONTROLE

Realizados os projetos e implementações do comando e controle, foram executados ajustes PID dos servoconversores para a obtenção de deslocamentos mecânicos dos eixos de forma precisa e com a dinâmica de movimento correta.

Cogitou-se a hipótese do desenvolvimento das funções transferências para a realização dos ajustes PID do sistema de movimentação. Porém, devido à complexidade e o tempo necessário para o desenvolvimento, deixa-se esta como sugestão para desenvolvimentos futuros. Utilizou-se a função *Auto-Tuning*, recurso disponibilizado pelo fabricante do servoconversor, que deveria ajustar os parâmetros PID praticamente de forma autônoma. O resultado foi um controle instável. Empregando a metodologia sugerida por ZIEGLER NICHOLS de "tentativa e erro" (ZIEGLER; NICHOLS, 1942), obtendo-se resultados mais estáveis. Baseado em conhecimentos prévios das reações de controle mostradas na tabela 3, e informações do tutorial rápido de PID de (ZHONG, 2006).

Tabela 3 - A influência dos ganhos K_P , K_I e K_D

Resposta em malha fechada	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de acomodação	Erro estacionário	Estabilidade
Aumento de k_p	diminui	aumenta	suave aumento	diminui	piora
Aumento de k_i	suave diminuição	aumenta	aumenta	grande diminuição	piora
Aumento de k_d	suave diminuição	diminui	diminui	suave alteração	melhora

Fonte: Adaptada de Ang, Chong e Li (2005) *apud*.

Foram também adotadas sugestões de (College of Engineering – University of Michigan) *apud* (SUNADA, 2007), para as etapas de controle PID:

- a. Obter a resposta em malha aberta e determinar as melhorias necessárias;
- b. Adicionar um controle proporcional para reduzir o tempo de subida;
- c. Adicionar um controle derivativo para reduzir o sobressinal;

- d. Adicionar um controle integral para reduzir/eliminar o erro em regime;
- e. Ajustar os parâmetros K_p , K_i e K_d até que a resposta esteja dentro das especificações desejadas.

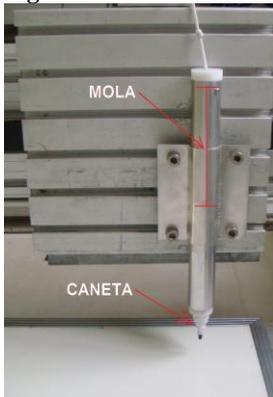
Nem sempre são necessárias as três ações de controle em um único sistema. Se, por exemplo, um controle PI fornece uma resposta satisfatória, não é necessária a implementação do termo derivativo. Desta forma o controlador mantém-se o mais simples possível.

Após os ajustes, foram feitos ensaios com trajetórias pré-determinadas com o intuito de avaliar aspectos como:

- a) A interpolação dos eixos de maneira correta ao executar uma reta ou uma circunferência;
- b) Verificar a execução de cantos vivos, como por exemplo, quando é feito uma inversão de movimento em 90 graus;
- c) Avaliar a repetibilidade no posicionamento para velocidades e trajetórias diferentes;
- d) Verificar através das trajetórias executadas se a regulagem PID ajustada, realmente esta adequada no posicionamento e suavidade na dinâmica de movimento.

Foi desenvolvido um suporte para a fixação de uma caneta (marcador para quadro branco com ponta de 5 mm) que, através de uma mola, mantém contato com o quadro instalado na área de trabalho da máquina (figura 40). Desta forma se podem registrar as trajetórias programadas para o movimento do cabeçote LASER.

Figura 40 - Caneta montado no carro “Y” e quadro branco



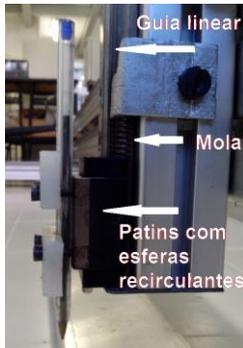
Fonte: Do autor

Os ensaios de movimento foram realizados inicialmente comandando apenas um eixo. Iniciou-se pelo eixo Y, uma vez que este deveria apresentar a menor dificuldade para o ajuste PID, por possuir maior rigidez estrutural e menor peso. Inicialmente adotou-se uma velocidade de 300 mm/min e aceleração de 10 mm/s² para realização das trajetórias. Seguindo a metodologia adotada regulou-se o parâmetro KP (ganho proporcional) seguido de um aumento da velocidade e aceleração. Esta ação se repetiu várias vezes gradativamente até alcançar a velocidade de 15.000 mm/min e a aceleração de 300 mm/s². No APÊNDICE G é mostrado o resultado completo de um dos ensaios realizados. O parâmetro KP foi ajustado até o ponto em que se verifica um comportamento da dinâmica de movimento satisfatório. Em seguida, corrigiu-se o sobressinal ajustando KD (ganho derivativo) e o erro nulo ajustando KI (ganho integrativo). O mesmo procedimento foi feito para o eixo X. Este apresentou uma dificuldade considerável de ajuste devido à maior massa (portal), além da menor rigidez mecânica.

Após os ajustes PID, foram realizados alguns ensaios com as rotinas de trajetórias idênticas. Os resultados iniciais apresentaram bastantes oscilações nas trajetórias, comprometendo a dinâmica de movimento. Além disto, a repetibilidade de posicionamento para diferentes velocidades não era a mesma, ou seja, para um mesmo comando de trajetória com velocidades diferentes, os eixos realizavam comprimentos de retas diferentes, então foram realizados novos ensaios para avaliar como a velocidade influenciava a repetibilidade de posicionamento.

Devido à necessidade de maior precisão do traço da caneta para a realização destes ensaios, foi projetado e construído um segundo dispositivo de fixação para dar suporte a uma caneta esferográfica da marca BIC com ponta (esfera) média de 1 mm e largura da linha impressa de 0,4 mm, segundo dados do fabricante (BIC, 2014), (figura 41). Com este procedimento obtiveram-se linhas traçadas sobre o quadro com larguras de linha que variavam de 0,1 a 0,3mm, como mostrado no APÊNDICE H.

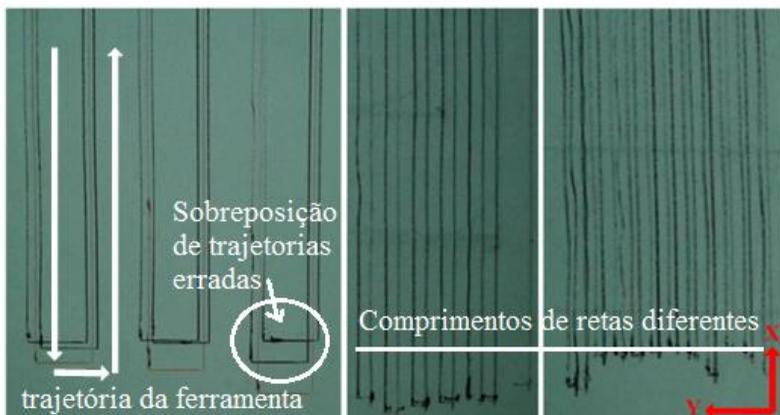
Figura 41 – Dispositivo para a fixação de uma caneta esferográfica no carro do eixo “X”



Fonte: Do autor

A figura 42 mostra detalhes dos ensaios realizados para verificar os comprimentos das trajetórias impressas pelo sistema de movimentação, para uma trajetória programada com percursos idênticos, modificando apenas a velocidade de deslocamento. Com estes ensaios foi possível constatar que, para um mesmo percurso executado com velocidades diferentes, o sistema executa percursos distintos, aumentando o percurso deslocado com o aumento da velocidade de deslocamento. Este sobredeslocamento também pode ser comprovado através da leitura do parâmetro do servo conversor, que monitora a posição do eixo do motor, APÊNDICE I.

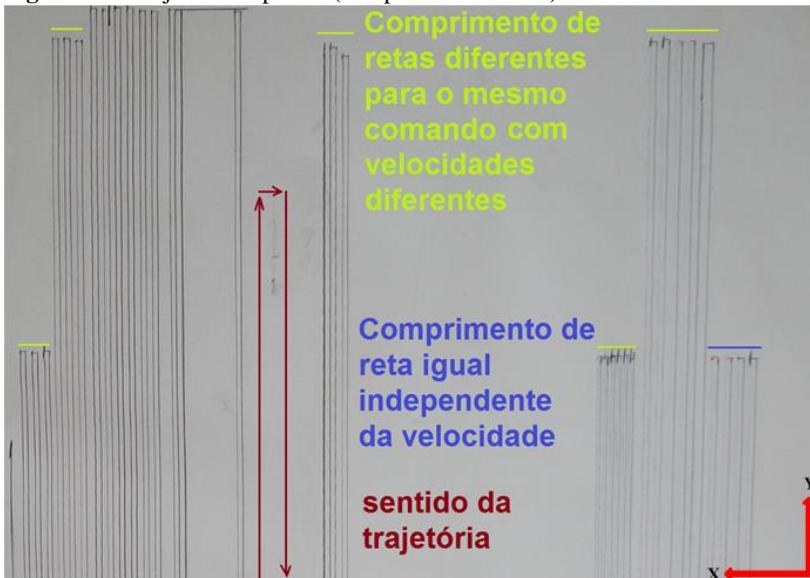
Figura 42 – Resultados dos ensaios de deslocamento como função da velocidade de deslocamento



Fonte: Do autor

As setas colocadas à esquerda da figura mostram o sentido de deslocamento do sistema de movimentação para todas as trajetórias impressas na figura 42. Avaliando o erro encontrado, inicialmente pensou-se que a causa poderia ser PID, porém quando se repetia um mesmo comando de deslocamento com a mesma velocidade a repetibilidade de posicionamento se situava no intervalo esperado. Considerou-se as possibilidades de erro no ajuste PID, influências mecânicas e problemas no programa *Ladder*. Descobriu-se que o programa *Ladder* desenvolvido com base no exemplo sugerido pelo fabricante WEG, continha um erro. Foram avaliadas diversas estratégias de programação. Para cada nova estratégia foram realizados ensaios de repetibilidade, para averiguação das características da estratégia. Todos os ensaios foram realizados executando-se deslocamentos no sistema e avaliando as características geométricas dos riscos produzidos sobre o quadro, e também pelo monitoramento da posição do eixo do motor, disponibilizado no servoconversor. Obteve-se uma estratégia do programa *Ladder* na qual os erros de percurso atenderam as exigências colocadas para o sistema de movimentação. O resultado dos percursos executados com velocidades distintas está representado na figura 43.

Figura 43 - Trajetória impressa (comprimento de reta).



Fonte: Do autor

Durante esta fase de ensaios foi verificado que o perfil estruturado do eixo Y (portal) sofre flexão em relação ao eixo X, quando se procedem deslocamentos sobre o eixo X. Isto acontece decorrente do fato de o portal do eixo Y ter um comprimento de 4 m e ser acionado sobre o eixo X em uma das extremidades. É possível observar a influência da flexão do portal na impressão realizada no teste. Quando a caneta passa do ponto final de posicionamento e retorna em seguida. Porém, mesmo com a flexão do portal, a exatidão de posicionamento e a repetibilidade sobre o eixo Y são boas, tanto para a mesma velocidade, como também para velocidades diferentes.

Realizou-se também uma rotina padronizada de trajetórias para a avaliação do sistema de movimentação, APÊNDICE J(1 e 2). Nesta os resultados proporcionados pelo comando e controle e ajustes PID ficaram na faixa de dispersão esperada com relação precisão, repetibilidade e dinâmica de movimento, validando o sistema de comando e controle realizado.

Durante a realização dos ensaios de validação do comando e controle, ainda em fase de ajuste de parâmetros PID, ao executar uma trajetória a máquina se moveu uma distância maior do que a distância prevista, acionando o sensor de fim de curso e desarmando a potência do servoconversor SCA 06. Este desligamento brusco danificou o servoconversor SCA 06, que teve que ser enviado para o fabricante (WEG) para as correções devidas. O problema foi resolvido com uma atualização *firmware* do servoconversor, disponibilizado também pelo fabricante (WEG). Após as devidas atualizações de todos os SCA 06, foram realizados movimentos que ultrapassassem propositalmente os limites de deslocamento máximo do sistema de movimentação e ativassem os fins de cursos, resultando no desarme da potência do servoconversor. Com o *firmware* atualizado, o problema não voltou a ocorrer.

Após esta etapa de desenvolvimento e otimização do sistema de movimentação, o mesmo encontrou-se operante e disponível para a posterior etapa de ensaios geométricos e a análises para avaliação deste.

4 ENSAIOS GEOMÉTRICOS E ANÁLISES NO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

Tendo como base os estudos realizados no capítulo 2 sobre ensaios geométricos de sistemas de movimentação, buscou-se elaborar testes viáveis em aspectos econômicos, tempo de execução, acessibilidade a equipamentos de medição, resultados consistentes, seguimento de normas e conhecimentos prévios da teoria de ensaios geométricos de sistemas de movimentação, para avaliar as características de movimentação da máquina.

Os métodos de avaliações elaborados visam aplicações fáceis e rápidas, envolvendo equipamentos simples que forneçam uma avaliação rápida e confiável sobre o estado geral da máquina.

Salienta-se que os parâmetros de trabalho como velocidade, aceleração, e trajetórias programadas foram otimizados, buscando sempre proporcionar que a máquina trabalhasse próxima das condições mais extremas suportadas por esta, com o intuito de conhecer os limites da máquina.

4.1 ENSAIOS E ANÁLISE DE ASPECTOS MECÂNICOS

Analisando a estrutura mecânica da máquina e levando em conta seu tamanho de 4 m x 2,5 m, é cabível questionar sua rigidez estrutural. A única ligação das bases do eixo X (distanciadas 4 m entre si) é feita por dois perfis retangulares de alumínio, fixados por dois parafusos em cada extremidade da estrutura do eixo X. Esta estrutura não apresenta qualquer tipo de elemento estrutural que garanta rigidez à mesma, como: reforços para as estruturas longitudinais da máquina, mãos francesas, e ligações em diagonal "amarrando" todos os perfis da estrutura da máquina, como nos exemplos mostrados no capítulo 2, tabela 1 e figura 5.

Esta falta de rigidez estrutural já havia sido aventada durante a realização de ajustes PID. Ao executar algumas trajetórias, constatou-se que o retângulo formado pela estrutura dos eixos X e os perfis de alumínio sofria deformações. Estas deformações foram verificadas com auxílio de marcações feitas na própria estrutura do sistema de movimentação e auxiliado por instrumentos, como esquadros, réguas e LASER auto nivelador.

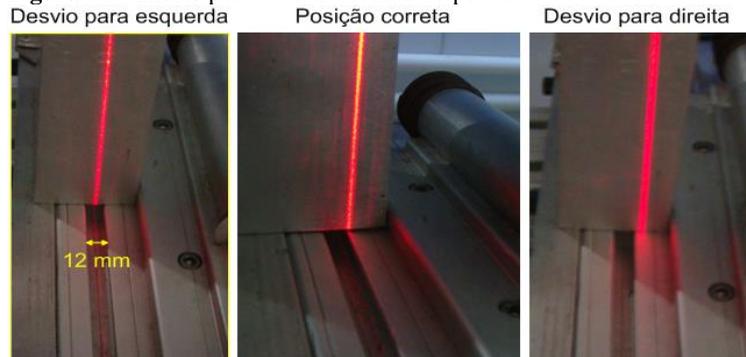
Durante os ensaios com maiores acelerações, percebeu-se que o perfil estruturado de alumínio (SCHÜCO) do eixo Y sofre flexão, o que

é muito preocupante do ponto de vista de precisão de posicionamento já que ele é o responsável pela rigidez estrutural do eixo Y (portal), sendo que a rigidez estrutural esta diretamente ligada à precisão de posicionamento. O portal tem um comprimento de 4 metros e está apoiado em suas duas extremidades sobre os dois carros dos eixos X dotados de patins de esferas recirculantes, porém, apenas um dos carros do eixo X é realiza o de acionamento deste eixo. O que traz consequências muito negativas para a precisão de movimento, principalmente durante acelerações acentuadas. De sobremodo quando se tem inversões bruscas do sentido de movimento do eixo X. O APÊNDICE L mostra os resultados deste comportamento em detalhes.

Foram então realizados ensaios para avaliar a magnitude da flexão do perfil estrutural. Para isso foi utilizado um LASER auto nivelador BOSCH 30M - GPL 5. Este LASER foi posicionado alinhado a uma aresta do perfil estrutural e então foram aplicados carregamentos da ordem de aproximadamente 100 a 200 Newton na extremidade livre do perfil do eixo Y.

Enquanto o carregamento é aplicado na extremidade livre do perfil, o lado oposto é mantido fixo através do acionamento. Com o LASER posicionado sobre a aresta do portal é possível visualizar a flexão e ter uma medida aproximada do deslocamento. O APÊNDICE M mostra como o LASER foi posicionado sobre a aresta do portal. A figura 44 mostra que a flexão sofrida pela extremidade livre do perfil no sentido do eixo X é da ordem de 10 a 12 mm. Durante a execução de trajetórias esta flexão pode ser ainda maior, já que o peso do portal e as acelerações envolvidas no movimento proporcionam carregamentos maiores do que os aplicados nestes ensaios.

Figura 44 - Ensaio para avaliar a flexão do portal



Fonte: Do autor

Num segundo ensaio, mantiveram-se as duas extremidades do portal do eixo Y fixas e aplicou-se o mesmo carregamento na região central do portal. Não se verificou uma flexão perceptível com os instrumentos utilizados.

4.2 ENSAIOS E ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS IMPRESSAS

Foram realizados ensaios com as trajetórias padronizadas para avaliação do sistema de movimentação em dois eixos. As trajetórias foram "impressas" em um papel fixado na superfície de um quadro posicionado na área de trabalho do sistema de movimentação. As impressões foram realizadas por meio de uma caneta esferográfica fixada no carro do eixo Y, de forma idêntica à dos ensaios descritos no capítulo 3.

O método de avaliação destes ensaios emprega metodologia similar aos ensaios de peças padrão usinadas (SOUSA, 2000), onde a peça é usinada e posteriormente medida em uma máquina de medir por coordenadas. De forma similar, as trajetórias são impressas e posteriormente é feito a análise e avaliação, de maneira visual e com o auxílio de instrumentos de medição.

A avaliação tem como objetivo avaliar os efeitos dos erros geométricos em trajetórias pré-determinadas. Adotando um conceito de metodologia similar ao que foi apresentado na figura 12, capítulo 2, a trajetória programada foi comparada com a trajetória realmente executada, viabilizando uma avaliação quanto à interpolação dos eixos, posicionamento, repetibilidade, perpendicularidade dos eixos, dentre outros aspectos de interesse.

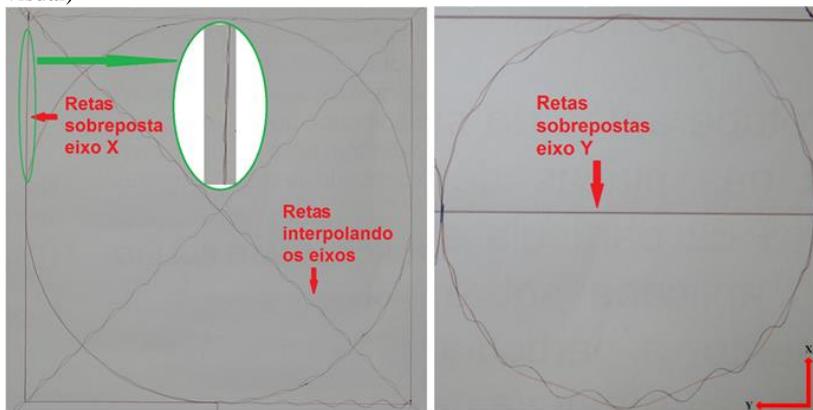
Os ensaios de trajetória foram executados em diferentes velocidades, com diferentes acelerações, sempre procurando simular as situações mais extremas e intermediárias de aplicações LASER cabíveis a este sistema de movimentação.

Após a execução de cada ensaio, tendo como resultado a trajetória impressa na cartolina, primeiramente é feita uma inspeção visual sem o auxílio de instrumentos de medição para detectar erros grosseiros, como desvios da trajetória planejada, erros de posicionamento, retilineidade e perpendicularidade dos eixos.

Nesta primeira análise ficou evidente a influência da flexão da extremidade livre do portal, principalmente nas trajetórias impressas com interpolação dos eixos, como mostra a figura 45. Nas regiões da impressão onde as trajetórias deveriam ser retas, círculos ou arcs,

apresentam oscilações senoidais em seu curso. Dependendo da velocidade utilizada estas senoides apresentam comprimento de onda diferentes. Nos ensaios de trajetórias impressas (inspeção visual) apresentados a seguir, foram utilizadas velocidades de 20 000 mm/min (vermelho) e 3000 mm/min (azul), sendo que, as trajetórias foram sobrepostas para facilitar comparações.

Figura 45 – Resultados gráficos dos ensaios de trajetória interpoladas (inspeção visual)



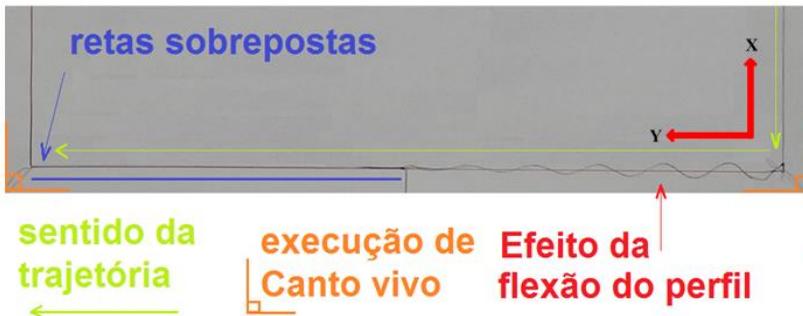
Fonte: Do autor

Observa-se que a retilineidade das trajetórias descritas isoladamente pelo eixo Y é boa (sem oscilações) e com boa precisão de posicionamento. Porém, é possível perceber que após a inversão do movimento de X para Y, a reta descrita pelo eixo Y sofre influência da flexão do portal gerando oscilações no início da trajetória, que são amortecidas com o tempo, pois a oscilação da extremidade livre do eixo Y do portal para de acontecer.

O efeito da flexão do portal se agrava pela influência exercida sobre o PID. Sendo assim, o controle executa o comando de posicionamento e chega à posição desejada, mas a flexão do portal exerce forças que retiram o posicionador da posição desejada, então, o controle realiza correções a fim de encontrar novamente a posição desejada. O que acontece de fato, porém, recebendo outra vez a influência da flexão do portal, agora com sentido contrário. Este efeito se repete algumas vezes até que a flexão do portal e o comando e controle consigam amortecer as influências e encontrar estabilidade na posição desejada. A figura 46 mostra com mais detalhes este efeito. Este

efeito se torna mais acentuado quando o movimento é executado na frequência de ressonância da extremidade livre do portal. Para evitar danos à estrutura, procurou-se não excitar a estrutura na frequência de ressonância.

Figura 46 - O efeito da flexão do portal se agrava pela influência exercida sobre o PID.

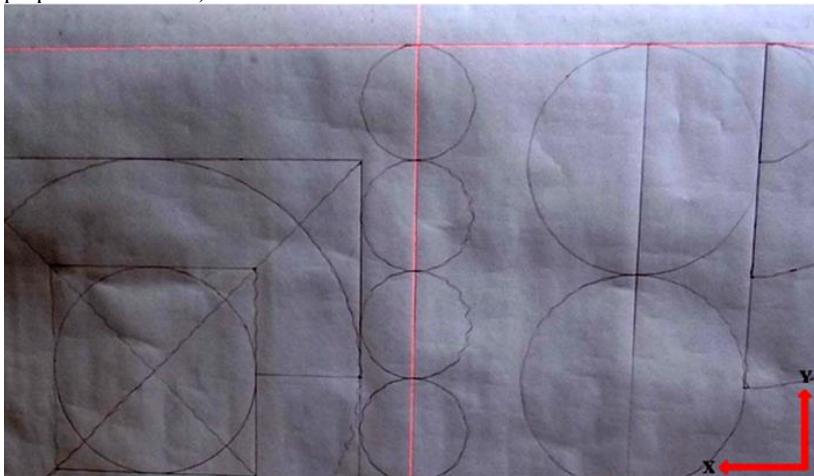


Fonte: Do autor

Observando a figura 46 e analisando o sentido da trajetória, verifica-se que a flexão do perfil exerce bastante influência sobre a execução de cantos vivos e no início da reta (eixo Y). Ao realizar a inversão do movimento em 90 graus, a linha impressa começa a realizar uma senoide, cuja amplitude é amortecida até que se torne não perceptível na metodologia de avaliação empregada. A reta descrita sobrepõe outra reta realizada anteriormente, o que mostra uma boa repetibilidade de posicionamento do eixo X, apesar das perturbações na dinâmica do movimento.

Dando sequência às análises, com o auxílio de régua, esquadro e do LASER auto nivelador sobre as trajetórias impressas, é possível obter mais detalhes, como mostra a figura 47.

Figura 47 -LASER auto nivelador sobrepondo a trajetória dos eixos (teste de perpendicularidade).



Fonte: Do autor

Neste ensaio a perpendicularidade dos eixos apresenta-se boa, ou seja, para os instrumentos de medição disponíveis (esquadro e LASER auto nivelador) a perpendicularidade não apresentou irregularidades. Salienta-se que a perpendicularidade dos eixos sofre alterações devido à baixa rigidez estrutural e as vibrações geradas pelo sistema de movimentação, gerando erros de guinamento.

4.3 PROPOSIÇÃO DE SOLUÇÕES PARA MINIMIZAR OS ERROS DE MOVIMENTAÇÃO

A proposta deste trabalho foi baseada na disponibilidade de um sistema de movimentação desenvolvido no LHW. Depois da avaliação geral de suas características, verificou-se a não suficiência das características dinâmicas do movimento do sistema desenvolvido no LHW. Assim, torna-se necessário reconfigurar o sistema de movimentação para adequá-lo às necessidades de movimentação do cabeçote LASER nas aplicações de interesse.

Depois de todas as manutenções e modernizações realizadas nos acionamentos e no software de comando e controle, os resultados obtidos na análise dos movimentos realizados pelo sistema de movimentação de grande porte, verificou-se que as características mecânicas do sistema de movimentação disponibilizado pelo LHW

atende apenas parcialmente as exigências das aplicações LASER. Haja vista que, segundo (SOUSA, 2000), estes são aspectos que permitem direcionar a utilização da máquina de acordo com a tolerância da aplicação a ser realizada ou afastá-la preventivamente de tal, antes que realize trabalhos fora das tolerâncias especificadas.

Os resultados gerados nos ensaios mostraram que a estrutura mecânica da máquina não oferece a rigidez estrutural adequada aos requisitos de processos de aplicações LASER. Requisitos estes, que tem como base o processo de soldagem, processo de revestimento e o processo de tratamento térmico, pois, dentre os processos LASER este são os que exigem menor desempenho dinâmico do sistema de movimentação.

A falta de rigidez estrutural tem como consequência grandes deformações na estrutura, o que resulta em problemas de linearidade dos movimentos, provocados pela deformação elástica do portal e na perda de paralelismo das bases que formam o eixo X e, por consequência, também se refletem na perpendicularidade dos movimentos dos eixos Y e X.

Considerando-se a urgência do LMP LASER dispor de um sistema de movimentação funcional, optou-se por buscar soluções que venham a contribuir no aumento da rigidez e melhorar a qualidade das trajetórias executadas pelo sistema de movimentação.

Visando melhorar o paralelismo das bases que formam o eixo X e adequar a instalação da máquina para aplicações de processos LASER no LMP, as soluções encontradas abrangem duas etapas. Na primeira a estrutura do sistema de movimentação deve ser fixa a uma base que garanta rigidez estrutural, e a segunda etapa abrange a adequação do eixo X para a realização do bi-acionamento sincronizado do portal.

4.3.1 Aumento de Rigidez da Estrutura da base do sistema de movimentação

Como base para a instalação do sistema de movimentação foi sugerida a utilização da estrutura de perfis de aço do teto do laboratório LASER do LMP. A figura 48 mostra de forma esquemática, como a estrutura do sistema de movimentação será montada. Detalhes são apresentados no APÊNDICE N.

Figura 48 – Fixação do sistema de movimentação na estrutura de aço do teto do laboratório



Fonte: Do autor

Esta solução, “*upside down*” vem sendo discutida no LMP para outras aplicações de máquinas feramentas, visando um melhor transporte de cavacos e meios lubrificantes para fora da área de trabalho de uma máquina ferramenta de usinagem e disponibilidade do espaço abaixo da máquina para livre acesso.

O espaço físico abaixo do sistema de movimentação do cabeçote LASER fica integralmente disponível para a montagem de corpos de prova, movimentação de cargas, entre outras.

A fixação do sistema de movimentação no teto deve ser ajustável e robusto, de modo que ofereça recursos para o ajuste de posicionamento das bases do eixo X e garantir o paralelismo destas. A mesa para a fixação de amostras deve satisfazer as exigências específicas dos componentes que deverão ser tratados pelo processo LASER em questão e não faz parte do escopo deste trabalho. Ela deverá ter regulagem de altura que poderá ser integrada ao comando e controle do sistema de movimentação como o terceiro eixo (eixo Z), que permitirá o ajuste do foco do LASER para o processamento de peças.

A seguir são descritos o projeto mecânicos e suas implementações.

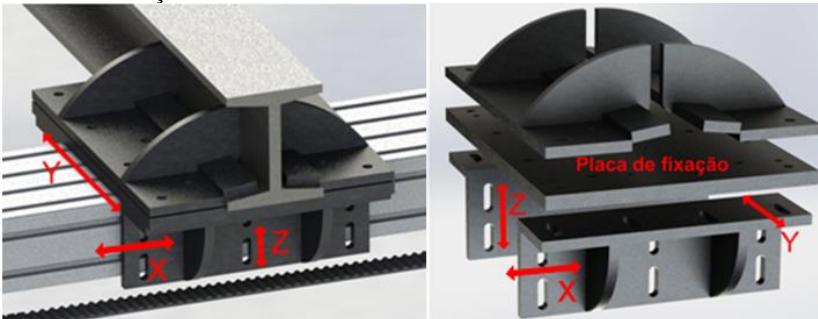
Conforme descrito no capítulo 4.3, foi adotada a solução de se executar um projeto que proporcionasse simultaneamente a adequação do sistema de movimentação para a instalação no LMP e uma maior rigidez mecânica. Para isto foi desenvolvido um projeto que teve como base os seguintes requisitos:

- a) Adequar a máquina para a instalação no teto. A mesa abaixo desta para o processamento de materiais com os processos a LASER não faz parte deste trabalho;
- b) Aumentar a rigidez estrutural, de modo a melhorar o paralelismo das bases que formam o eixo X, e a perpendicularidade entre os eixos X Y;
- c) Conceber o projeto de forma que viabilize regulagens de fixação em três eixos, para que seja possível alinhar a máquina;
- d) O projeto deve oferecer a robustez necessária para a aplicação;
- e) Projetar adaptações que utilizem ao máximo a concepção mecânica do sistema de movimentação, dentro dos limites possíveis, ou seja, torna-la funcional sem grandes modificações;
- f) Projetar os componentes para a fixação do sistema de movimentação nas vigas de aço, de maneira que não seja necessário qualquer tipo de alteração nas mesmas.

Os desenhos dos componentes foram executados com auxílio do *software* CAD (SolidWorks).

A figura 49 mostra as peças das sapatas do sistema de movimentação (simulação) no teto e o APÊNDICE O mostra maiores detalhes do projeto dos componentes.

Figura 49 - Sapata de fixação no sistema de movimentação nos perfis estruturais de aço do teto



Fonte: Do autor

As peças que constituem o sistema de fixação da estrutura no teto foram todas projetadas para serem fabricadas através dos processos de

fabricação disponíveis no LMP/ USICON, bem como por fornecedores de serviços na grande Florianópolis.

As geometrias de componentes planos foram projetadas para serem cortadas por LASER, com encaixes que facilitam a montagem. O corte a LASER em chapas de aço 1020 de 12.25 mm de espessura foi feito por prestador de serviços (Metalúrgica Dominik). Os componentes foram montados e soldados através do processo MIG. Os componentes montados foram pintados para minimizar a corrosão e manutenção de um bom aspecto.

O sistema de fixação é composto por três subconjuntos permitindo um ajuste de posição em três eixos (X, Y e Z), como mostrado na figura 49.

A parte inferior tem a função de fixar o perfil de alumínio no sistema de fixação. Nela podem ser feitos ajustes de posição para os três eixos. O eixo X tem curso "ilimitado", já que o ajuste desse eixo é feito deslizando o sistema de fixação em relação ao perfil de alumínio. Já o eixo Z tem um curso para o ajuste de posição de 25 mm, deslizando o parafuso de fixação através do furo oblongo.

O desnível entre as vigas que servirão de sustentação para o sistema de movimentação foi medido com o auxílio de dois equipamentos de medição: uma mangueira de nível e o auto nivelador LASER, e encontrou-se uma diferença máxima de aproximadamente 6 mm. O curso de ajuste no eixo Z está sobredimensionado para alinhar a máquina.

O terceiro eixo (Y) também tem seu curso para ajuste de posição limitado pelo comprimento de furos oblongos, de 25 mm de comprimento. O ajuste é realizado deslizando a parte inferior do sistema de fixação em relação à placa de fixação (parte intermediária da sapata de fixação).

As sapatas são confeccionados em chapa de aço de construção mecânica recortada a LASER com furos roscados para a fixação da parte inferior e superior do sistema de fixação.

A parte superior foi projetada de modo que se acomode ao perfil I da estrutura do teto da sala LASER do LMP, para fixá-lo à sapata por compressão, para que não fosse necessário fazer nenhum furo nas vigas do teto.

Quatro sapatas fixam o sistema de movimentação no teto, sendo estas alocadas formando um retângulo. Desta forma, a rigidez da base é aumentada pela rigidez da estrutura do teto. Será necessário um ajuste de alinhamento e paralelismo entre as bases do eixo X. Uma vez alinhadas às bases do sistema de movimentação, para ocorrer um

desalinhamento será necessário também ocorrer desalinhamento nas vigas do teto e limitará o erro de perpendicularidade e linearidade dos eixos apenas a deformações dos componentes Mecatrônicos da máquina.

Para a instalação da máquina no teto está prevista a necessidade de desmontar o portal. Com a máquina disposta em módulos, primeiramente deverão ser fixos as bases do eixo X, uma de cada vez, executando os devidos alinhamentos e medições com o auxílio do auto nivelador LASER e da mangueira de nível. Em seguida posicionar o portal no local, acoplar este aos carros das bases já fixadas e realizar os devidos ajustes e medições convenientes, necessitando de um tempo considerável, que poderia colocar em risco a finalização deste trabalho dentro do prazo determinado.

Por estes motivos optou-se por não realizar a instalação da máquina nas vigas do teto até a realização das devidas avaliações da máquina referente a este trabalho, mesmo com os sistemas de fixação já fabricados.

4.3.2 Rigidez estrutural do eixo Y (flexão do portal)

Durante os ensaios realizados para a avaliação do sistema de movimentação foi verificada uma flexão demasiada da extremidade livre do perfil estrutural (portal) do eixo Y. O perfil estrutural de alumínio com comprimento de 4 metros acionado em uma das extremidades não oferece rigidez suficiente para a aplicação prevista do portal. Ao realizar o acionamento mecânico em uma extremidade do portal ocorre uma defasagem nos deslocamentos no sentido X ao longo do eixo Y, resultando em movimentos oscilatórios apresentados nos ensaios de impressão de trajetória.

A segunda etapa das modificações prevê a minimização das deflexões das deformações do perfil estrutural (portal) do eixo Y.

Buscou-se alternativas para encontrar a melhor alternativa de solução para este problema. Abaixo são apresentadas algumas das soluções encontradas:

- a) Substituição do perfil do portal por um perfil mais rígido que agregue a rigidez necessária;
- b) Aumentar as dimensões das sapatas de deslocamento sobre o eixo X, objetivando uma maior rigidez da estrutura;
- c) Alterar a posição do acionamento eletromecânico para uma parte central da máquina visando distribuir melhor a flexão do portal;

- d) Utilizar um acionamento eletromecânico em uma das extremidades do eixo Y com transmissão mecânica para a outra extremidade do portal e aproximar as bases dos eixos X, visando proporcionar um "biacionamento" sincronizado através de transmissão mecânica e a minimização das flexões da estrutura do portal;
- e) Instalar dois acionamentos eletromecânicos idênticos, um em cada extremidade do portal e aproximar as bases dos eixos X, visando realizar um biacionamento sincronizado com maior desempenho dinâmico e a minimização das flexões da estrutura do portal.

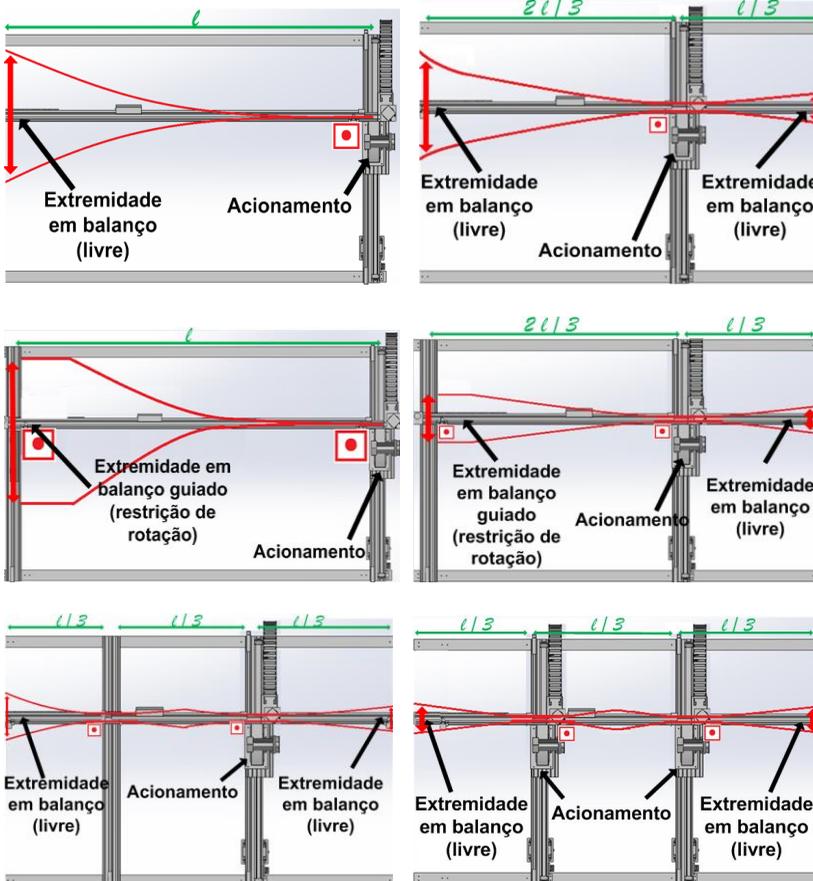
Todas as soluções apresentadas agregariam melhorias consideráveis no sistema de movimentação, com o intuito de atender as características de movimentação requisitadas pelos processos LASER planejados. Porém, decidir pelas soluções a serem adotadas considerou-se a viabilidade técnica e econômica disponível para este projeto e o tempo de implementação, fator limitante de alguns pontos deste trabalho.

Analisando as soluções propostas, pode-se afirmar que as primeiras duas soluções sugeridas, aumentar a rigidez do perfil do portal e substituição das sapatas do eixo X, implicam em substituição completa dos componentes do sistema de movimentação e não pode ser justificada economicamente para as aplicações propostas.

A terceira solução, alterar a posição do acionamento eletromecânico disposto em uma das extremidades livres do eixo Y para uma posição mais central do portal, deixando uma das extremidades do portal em balanço livre e a outra extremidade em balanço, porém guiada pelo segundo par de guias do eixo X, leva a uma redução das flexões das extremidades livres do portal. Para as mesmas acelerações apenas a metade do comprimento está em balanço (diminuído tamanho do braço de alavanca de 4 m para aproximadamente 2 m) e metade da massa em cada extremidade está envolvida. Esta concepção não requer modificações na estrutura física do sistema de movimentação, apenas uma montagem dos eixos X diferenciada em relação ao eixo Y. As deflexões das extremidades livres seriam reduzidas à $\frac{1}{4}$ das deflexões verificadas para a concepção original, limitando ainda a área de uso para as aplicações planejadas à região central do sistema de movimentação. A figura 50 mostra as diversas concepções projetadas e análises de flexões realizadas para cada concepção. Até chegar a solução de

posicionar as bases do eixo X de maneira mais centralizada distribuindo melhor as a flexão sofrida pelo portal.

Figura 50 - Concepções de montagem do sistema de movimentação.

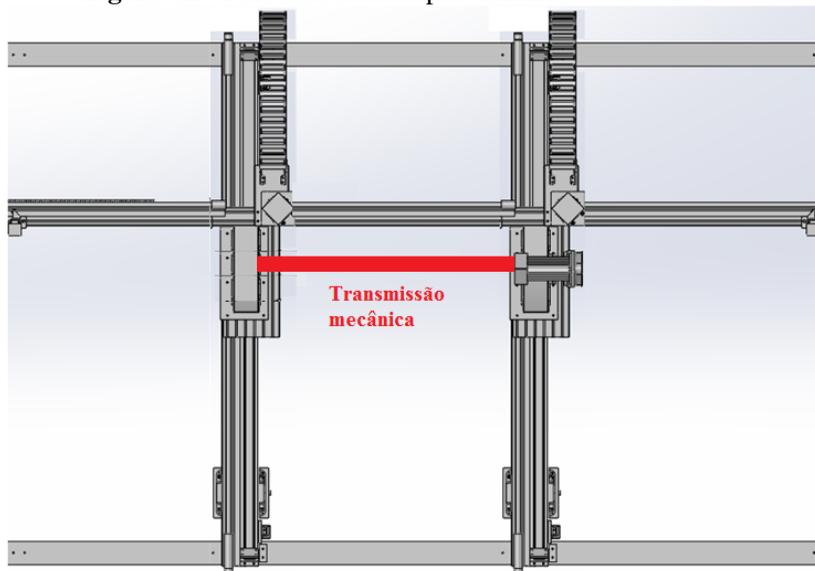


Fonte: Do autor

A quarta solução proposta visa utilizar um acionamento eletromecânico em uma das extremidades do eixo Y, com transmissão mecânica para a outra extremidade do portal, visando um proporcionar um "biacionamento" sincronizado através de transmissão mecânica, assim, a extremidade livre do portal, passa a ser acionada. O eixo de transmissão de movimento do motor para a outra extremidade do portal deverá ser projetado de tal forma a apresentar máxima rigidez torcional

e mínima massa, para não influenciar negativamente a rigidez do sistema como um todo (figura 51).

Figura 51 - Portal biacionado por transmissão mecânica



Fonte: do autor

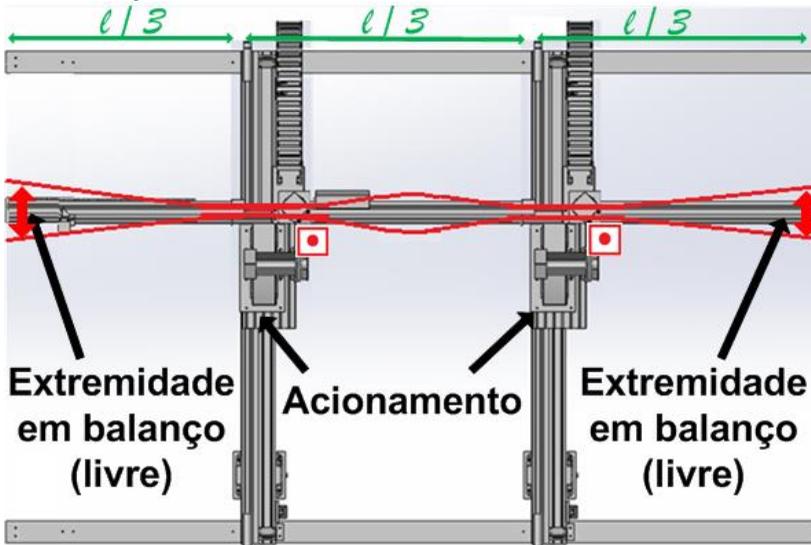
A quinta solução proposta, a qual foi avaliada como a melhor e mais viável para este trabalho, baseia-se na instalação de dois acionamentos eletromecânicos idênticos, um em cada extremidade do portal e aproximar as bases dos eixos X, visando realizar um biacionamento sincronizado com maior desempenho dinâmico e a minimização das flexões da estrutura do portal. Esta solução é baseada em concepções de portais biacionados, solução frequentemente utilizada em máquinas de grande porte segundo (URIARTE, L. et al., 2013). Os dois acionamentos eletromecânicos idênticos devem atuar de forma sincronizada nas duas extremidades do portal, de modo a distribuir os esforços de massa e minimizar a flexão.

O biacionamento, ou seja, a utilização de dois acionamentos eletromecânicos aumenta a abrangência de acelerações e velocidades de trabalho do sistema de movimentação, pois se dispõe do dobro do torque nos acionamentos servo controlados. Para tal implementação é necessário realizar o projeto mecânico do acionamento e adequação do comando e controle.

A aproximação entre as duas bases do eixo X permite otimizar as deflexões das extremidades em balanço e da região central do portal. Para isso foi projetado e construído um acionamento "idêntico" ao já instalado na outra extremidade do portal. Desta forma o portal é biacionado de maneira sincronizada.

A figura 52 mostra a solução adotada, com os dois acionamentos eletromecânicos e a aproximação das bases do eixo X.

Figura 52 - Solução adotada para a melhoria do sistema de movimentação



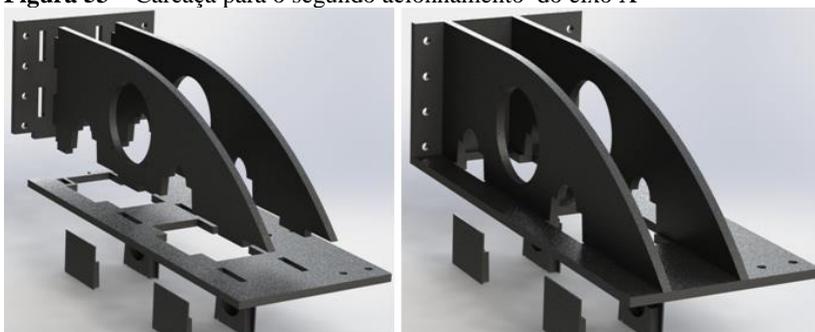
Fonte: Do autor

A flexão sofrida pelo perfil do eixo Y será reduzida, podendo ser otimizada pela escolha adequada da posição das bases do eixo X. A esta flexão se somam os possíveis erros decorrentes da defasagem dos acionamentos, causados pelo sistema de comando e controle, considerando que o PID exercido nestes acionamentos será individual, e poderá ser otimizado separadamente.

O projeto mecânico da carcaça do acionamento foi realizado com base na concepção do acionamento existente, seguindo a recomendação de Hocken "Utilizando projetos simétricos aumenta-se possibilidade de balanceamento das influências estruturais, (Robert J. Hocken, 1995)" *apud* (PEREIRA, 2010).

A estrutura fundida da carcaça existente foi substituída por uma estrutura feita em chapas de aço recortadas com LASER. Os componentes individuais foram providos de encaixes, objetivando maior facilidade de montagem e garantia de manutenção de referências de montagem entre os componentes. Os mesmos princípios de projeto que foi adotado no sistema de fixação do teto. As peças da carcaça, mostradas na figura 53, foram confeccionadas em chapas de aço ABNT 1020 de 12,25 mm de espessura. A carcaça, depois de montada, foi soldada por processo MIG e pintada.

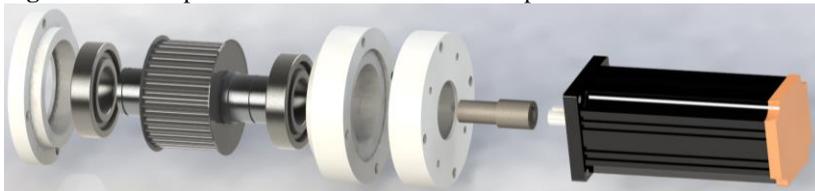
Figura 53 – Carcaça para o segundo acionamento do eixo X



Fonte: Do autor

Os outros componentes que compõem o acionamento foram projetados e fabricados nas dependências do USICOM e adquiridos no mercado, conforme a figura 54, que mostra como foi acoplado o motor ao eixo de transmissão de movimento (polia acionadora).

Figura 54 – Componentes internos da transmissão para o eixo X



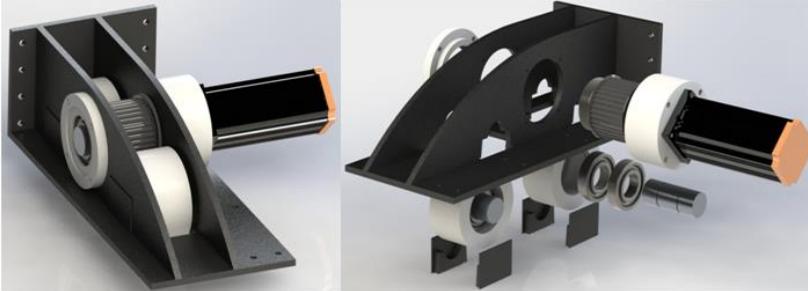
Fonte: Do autor

A polia sincronizada acionadora e o motor servocontrolado foram selecionados com características idênticas às do outro acionamento para facilitar a programação.

A montagem das polias nos eixos, assim como dos rolamentos, foram realizadas observando-se as recomendações dos fabricantes dos componentes.

A figura 55 e mostra mais detalhes do acionamento projetado.

Figura 55 – Vistas do acionamento



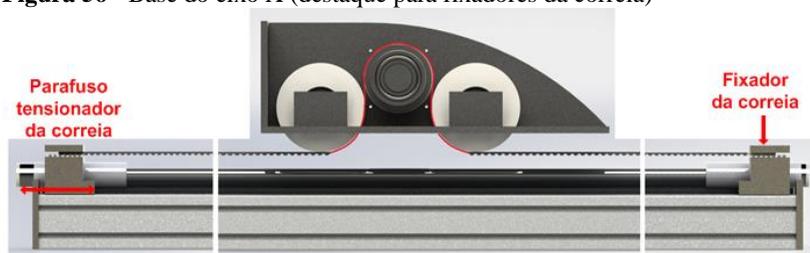
Fonte: Do autor

Para obter respostas idênticas entre o acionamento original e o replicado é fundamental:

- a) Utilizar dois motores idênticos nos acionamentos;
- b) Manter uma massa total igual a do acionamento existente, ou seja, mantendo as massas das bases do eixo X equilibradas. Para isto, foram considerados todos os componentes e os respectivos materiais que constituem cada uma delas, vide o APÊNDICE P(1 e 2).

A correia instalada no acionamento replicado é idêntica à utilizada no acionamento original. Para a fixação desta foram também replicados os suportes e o regulador de tensão da correia. A montagem do acionamento na segundo guia linear do eixo X foi executada de forma similar ao acionamento original. As duas extremidades da correia foram fixas nas extremidades e em seguida a correia é tensionanda, como mostra a figura 56.

Figura 56 - Base do eixo X (destaque para fixadores da correia)



Fonte: Do autor

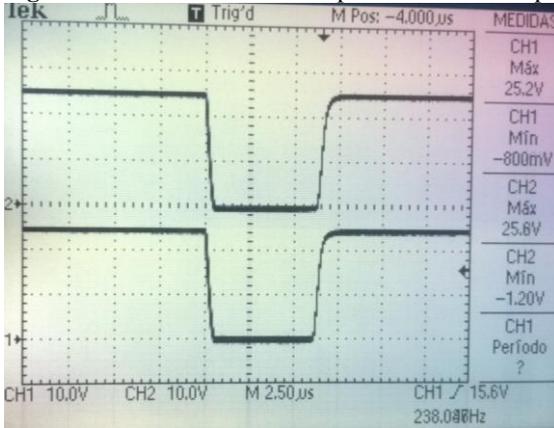
Para padronizar o tensionamento das correias dos dois acionamentos foi adotado um método de medição através da aplicação de um peso sobre um determinado ponto da correia, e foi medida a flexão desta em relação à base durante o tensionamento, procurando deixar a mesma flexão para ambos acionamentos, evitando diferentes respostas de acionamento.

Para acionar o sistema de movimentação foi necessário adequar o comando e controle e assim viabilizar o biacionamento do eixo X. O *software* Mach3 dispõem de uma função chamada *Slave Axis*. Através desta função o *software* é capaz de comandar dois motores de forma sincronizada. O fabricante do *software* informa que as informações de acionamento são repassadas simultaneamente. Para verificar a veracidade desta informação foram realizados dois ensaios para a validação do biacionamento.

No primeiro ensaio foi verificado o parâmetro do servoconversor que monitora a posição relativa do eixo do motor. Foram realizados diversos comandos distintos para o eixo X e monitorou-se a informação mostrada pelo parâmetro dos servos conversores.

No segundo ensaio foram monitorados os trens de pulsos enviados para os dois acionamentos com o auxílio de um osciloscópio, como mostra a figura 57.

Figura 57 - Leitura dos trens de pulsos no osciloscópio.



Fonte: Do autor

Também foram realizados testes visuais, onde foram colocadas referências sobre as guias lineares do eixo X, as quais foram observadas durante a movimentação. Em todos os ensaios os resultados foram positivos, ou seja, o número de pulsos e frequência com que estes são enviados são iguais para os dois acionamentos.

Com os acionamentos montados na máquina, deu-se início aos ajustes de ganho PID, adotando a mesma metodologia seguida anteriormente e nestes ajustes deparou-se com uma grande dificuldade para atingir acelerações mais elevadas dentro das limitações do servomotor. Foram cogitadas e estudadas as influências de aspectos como a troca pelo SCA 06 e as alterações mecânicas no acionamento, ou seja, a substituição de um acionamento por dois. Porém descobriu-se que, de acordo com os manuais do fabricante do servoacionamento (WEG), o servoconversor SCA 06 pode controlar diversos motores, inclusive os SWA 56.2,5-60 instalados no eixo X. Entretanto, os manuais não informam de maneira clara que este servoconversor controla estes motores de forma limitada, não podendo fornecer a corrente nominal requerida aos motores. A corrente fornecida pelo SCA 06 é de 5 A, e o motor requer de 8 A, refletindo diretamente no torque e por consequência na aceleração proporcionada.

Os servomotores SWA 56.2,5-60 foram substituídos por servomotores SWA 40.2,6-30, os quais disponibilizam as mesmas características do SWA 56.2,5-60, diferindo apenas na rotação máxima,

diminuindo esta de 6000 para 3000 RPM. Este fato não prejudica o acionamento, pois a máxima velocidade requerida no sistema de movimentação não requer a rotação máxima dos motores.

Os motores SWA 40.2,6-30 oferecem um torque nominal de 2,6 Nm cada para seu acionamento. Como estes motores trabalham de forma sincronizada, disponibilizam um torque total de 5,2 Nm. Os motores estão acoplados diretamente nas respectivas polias acionadoras de seus acionamentos. As polias têm diâmetro de 91,67 mm e passo 8.

Considerando que o servoconversor tem 4096 pulsos por rotação e somado às características do acionamento, o eixo X proporciona uma resolução de 0,07 mm e aceleração máxima de 0,674 m/s². Os cálculos detalhados destas informações estão no APÊNDICE Q e S.

Para o acionamento do eixo Y foi selecionado um motor SWA 40.0,8-30, com torque de 0,8 Nm e rotação de 3000 RPM. Este motor atende aos requisitos deste eixo para as aplicações desejadas, podendo ser controlado por um servoconversor SCA 06 sem limitações. Este motor é acoplado diretamente à polia acionadora, a qual tem 66,20 mm de diâmetro e passo 8. Assim, como os servoconversores do eixo X, o eixo Y também oferece 4096 pulsos por revolução, que somado as características do acionamento, proporciona uma resolução de 0,05 mm e aceleração máxima de 1,41 m/s². Os cálculos detalhados destas informações estão no APÊNDICE R e S.

4.4 ENSAIOS DE TRAJETÓRIAS E ANÁLISES PARA O ACIONAMENTO SINCRONIZADO DO EIXO X

Realizadas montagens do acionamento sincronizado da segunda guia linear do eixo X, deu-se início aos ajustes de ganhos PID baseado na mesma metodologia seguida anteriormente.

Primeiramente foram realizados ajustes no eixo biacionado X, tendo como ponto de partida dos parâmetros, os ajustes de fábrica. Diversas estratégias de ajustes foram adotadas:

- a) Ajuste simultâneo: nesta estratégia os parâmetros dos dois acionamentos são alterados ao mesmo tempo com valores idênticos e em seguida o eixo é avaliado com os dois acionamentos atuando;
- b) Ajuste aleatório: nesta estratégia procura-se observar o que acontece de mais grave no movimento da máquina e realizam-se os ajustes de maneira localizada, ajustando apenas um dos acionamentos visando melhorar a zona mais afetada;

- c) Ajuste individual: nesta estratégia os parâmetros PID são ajustados apenas em um acionamento por vez, em seguida são realizados testes com apenas o acionamento ajustado. Estas operações se repetem até se julgar que a resposta está adequada. Depois é feito o mesmo procedimento para o outro acionamento, ou seja, realiza-se os ajustes e testes individualmente para os dois acionamentos e por último são efetuados ensaios com os dois acionamentos atuando simultaneamente;
- d) Ajuste com o auxílio da função *AutoTuning*: os parâmetros são ajustados através da função *AutoTuning* disponibilizada pelo fabricante do servoconversor, seguindo as estratégias de ajustes simultâneos, aleatórios e separadamente.

O ajuste do PID para o eixo X proporcionou grandes dificuldades. O motivo das dificuldades se baseia no fato de este eixo ser biacionado, ou seja, dois motores atuam simultaneamente para executar o movimento do eixo. Em muitas situações um pequeno acréscimo nos valores de ajuste de KI ou KD, objetivando melhorar a precisão de posicionamento, resultava em uma instabilidade demorada na busca da posição final, perturbando a dinâmica de movimento caracterizado por vibrações fortes na estrutura mecânica.

O melhor ajuste foi obtido com a estratégia de ajustes simultâneos.

Com as alterações mecânicas e do comando e controle realizadas e o PID ajustado, deu-se início aos ensaios de trajetórias impressas. O APÊNDICE T(1) ilustra como foi posicionado o quadro para a realização dos testes de trajetórias impressas e o APÊNDICE T(2) mostra o resultado final de um teste de trajetórias impressas.

As figuras na sequência mostram aspectos interessantes observados durante estes ensaios, que focam e permitem a realização de análises mais detalhadas.

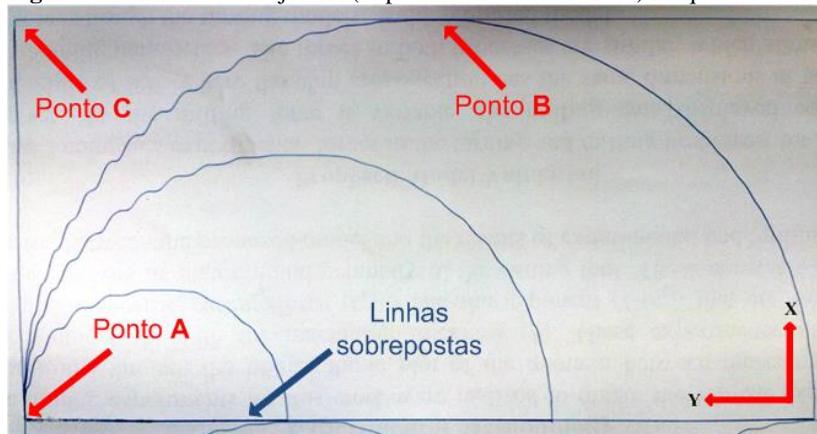
Para uma correta interpretação e análise dos ensaios fazem-se necessárias algumas considerações:

- a) É de suma importância considerar a direção e o sentido dos movimentos sobre os eixos nas figuras e explicados ao logo do texto;
- b) A espessura da linha impressa nos teste varia de 0,1 a 0,3 mm, conforme medições realizadas e citadas anteriormente no texto;

- c) Algumas trajetórias foram propositalmente sobrepostas. Algumas vezes, durante um mesmo ensaio, em decorrência de a caneta estar exercendo uma pressão demasiada sobre o papel, ocorreram danificações no papel, visíveis em algumas imagens;
- d) Os ensaios a seguir utilizaram velocidade de avanço de 3000 e 20 000 mm/min e aceleração de 117.5 mm/s^2 . Estes parâmetros simulam condições extremas das aplicações LASER previstas para o sistema de movimentação.

A figura 58 mostra o resultado de um ensaio de movimentação do sistema de coordenadas, onde é possível observar aspectos da precisão de movimento.

Figura 58 – Ensaio de trajetória (impressão de linhas e arcos) no quadrantes 1



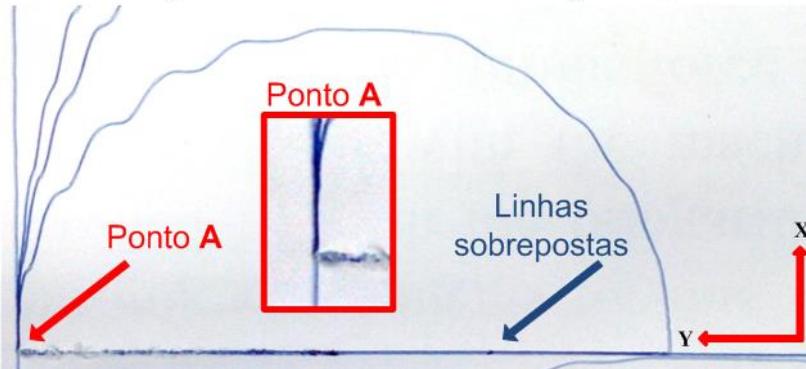
Fonte: Do autor

Para a interpretação destas trajetórias (arcos), é necessário conhecer a sequência de impressão da Figura. O movimento inicia no ponto A. Segue uma reta até o ponto C, onde descreve um ângulo de 90° continuando o movimento em direção ao ponto B. Posteriormente, foram impressos os arcos, que tiveram também como ponto de partida o ponto A, executando o arco de 180° até o ponto final (à direita). Em seguida descreve-se uma reta até o ponto A. Os diversos arcos são percorridos sequencialmente.

Analisando o ponto A é possível verificar que, independente do tipo de movimento descrito (arco ou reta), a repetibilidade de

posicionamento neste ponto pode ser considerada boa. Esta situação que pode ser mais bem observada no detalhe da figura 59.

Figura 59 – Detalhe ampliado na origem (ponto A)



Fonte: Do autor

Considerando que os três arcos tem o início de suas impressões a partir do ponto A, pode ser observado que no início das trajetórias dos arcos acontece com uma boa sobreposição das origens.

A figura 60 mostra em detalhe a base dos arcos impressos sequencialmente e mostrados anteriormente. A linha que parte da origem (ponto A) em direção horizontal (eixo Y) foi impressa 4 vezes. Uma na descrição da reta e três vezes na descrição da base dos arcos de circunferência. Pode-se observar que neste trecho acontece uma boa sobreposição dos traços em relação ao eixo X, já que esta não sofre alterações perceptíveis de espessura da linha.

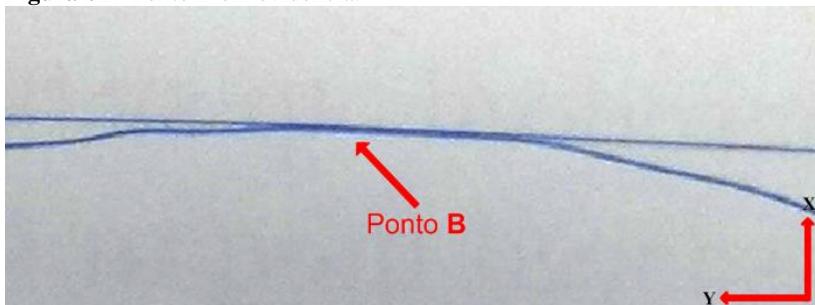
Figura 60 - Detalhe ampliado nas regiões de sobreposição das linhas



Fonte: Do autor

A figura 61 mostra em detalhe o ponto B, momento em que a linha do arco se sobrepõe à linha da reta, demonstrando que, mesmo em duas trajetórias distintas, a intercepção destas acontece em um mesmo ponto com boa precisão em relação ao eixo X.

Figura 61 - Ponto B em evidência.



Fonte: Do autor

Para proporcionar uma melhor avaliação e comparação entre os eixos analisados (X e Y), foi executada a mesma rotina de trajetórias de arcos durante o ensaio, porém, a Figura foi rotacionada em 90° para a direita, com o intuito de trocar os movimentos descritos pelos eixos X e Y. A figura 62 mostra esta parte do teste.

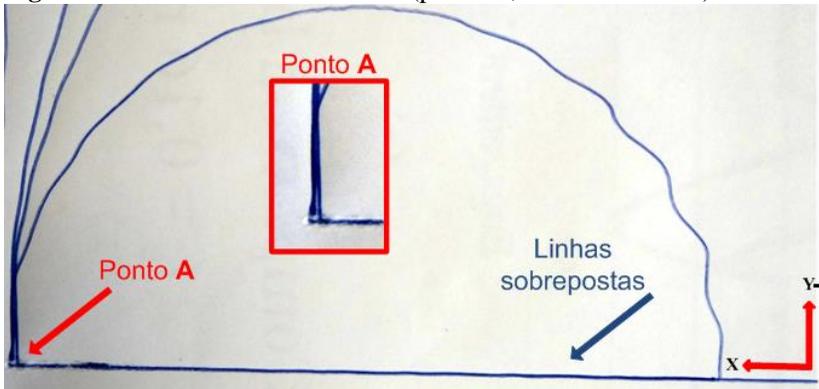
Figura 62 - Ensaio de trajetória impressa (com a figura rotacionada em 90° para a direita)



Fonte: Do autor

Analisando o ponto A no detalhe da figura 63, observa-se que a precisão no final da trajetória neste ponto apresenta erro em relação ao eixo X, pois o início dos arcos não parte do mesmo ponto. Situação que pode ser observada com mais detalhes na figura 64.

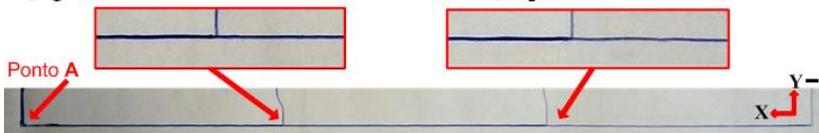
Figura 63 - Zoom na área analisada (ponto A, eixos invertidos).



Fonte: Do autor

Através da figura 64, é possível observar que a reta (eixo X) que passa pelo ponto A tem uma boa precisão de posicionamento. Porém, apresenta pequenas oscilações na trajetória, o que caracteriza perturbações na dinâmica de movimento.

Figura 64 - Zoom na área analisada (retas sobrepostas eixos invertidos)



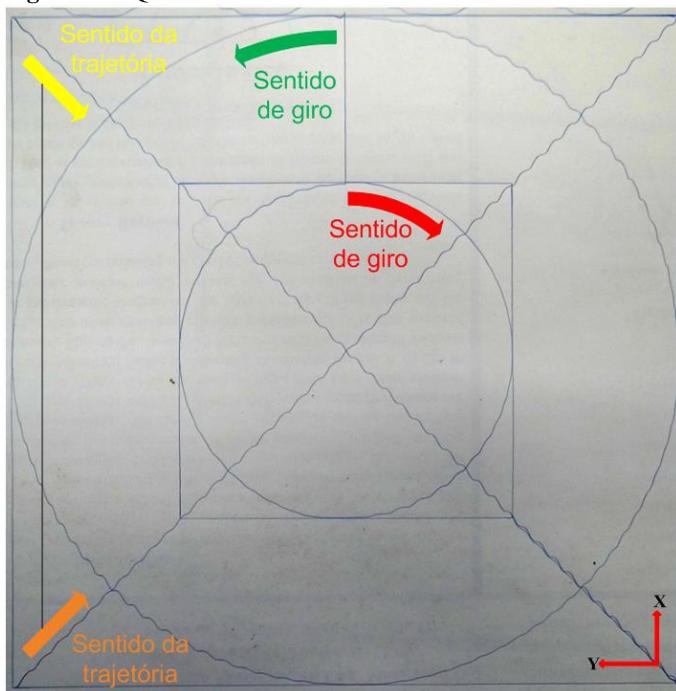
Fonte: Do autor

Analisando as trajetórias executadas pelo sistema de movimentação em relação à dinâmica de movimento, é possível perceber oscilações principalmente em trajetórias com interpolação dos eixos.

As seguintes análises darão prioridade ao eixo X, levando em consideração a concepção mecânica, todo o histórico relatado até o presente momento, sobre o sistema de movimentação.

A figura 65 mostra uma parte do ensaio onde foram traçados quadrados com círculos inscritos e as diagonais dos quadrados. As diagonais (trajetórias retas) foram executadas com acelerações, velocidades e tamanhos iguais, porém com direções distintas, com o intuito de verificar se existe alguma relação entre as oscilações e o sentido de avanço dos eixos. As oscilações são constantes e regulares nas duas diagonais.

Figura 65 - Quadrados com círculos circunscritos



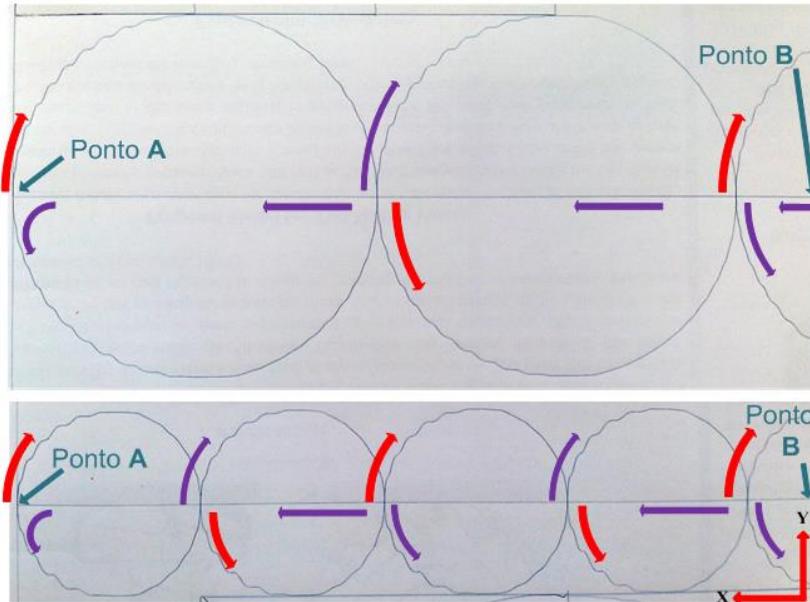
Fonte: Do autor

Seguindo o mesmo propósito de tentar estabelecer uma relação entre as oscilações e o sentido de avanço dos eixos, foram executadas duas circunferências com sentidos de giro contrários.

Nesta parte do ensaio, foi possível verificar diferenças na amplitude das oscilações durante as trajetórias. Porém, não foi possível estabelecer relações com o sentido de avanço dos eixos, já que para um mesmo sentido de avanço as amplitudes das oscilações variam. Contudo, pode-se concluir que, existe uma relação entre as oscilações e a desaceleração do movimento, já que as oscilações aumentam com a desaceleração do eixo X.

Visto que existia relação entre a aceleração do eixo X e a amplitude de oscilações, foi efetuado um ensaio de trajetórias circulares sequenciais, passando de um quadrante para outro quadrante, objetivando comprovar a relação entre oscilações das trajetórias e desaceleração do eixo X. A figura 66 mostra resultados impressos.

Figura 66 – Trajetórias circulares nos quadrantes I e IV.



Fonte: Do autor

O ponto de partida é o ponto A, executando um arco de circunferência (de $\pi r d$ no) sentido horário no primeiro quadrante (sentido das setas vermelhas). Sequencialmente executa-se um arco de circunferência (de $\pi r d$ no) sentido anti-horário no quarto quadrante e novamente um arco no primeiro quadrante, etc., até atingir o limite da região de ensaio no ponto B. A partir do ponto B, se executa um movimento de retorno em linha reta até o ponto A, figura 57. A partir do ponto A, onde novamente inicia uma trajetória de arcos de circunferências, agora iniciando no quarto quadrante, sentido anti-horário (sentido das setas roxas). O resultado mostra várias circunferências com uma linha central.

Estas trajetórias foram geradas para dois raios distintos.

A análise dos resultados do ensaio com trajetórias circulares comprova que ocorre um erro provocado pela dinâmica da movimentação quando ocorre uma desaceleração do eixo X.

Os possíveis motivos que poderiam gerar estas oscilações estão listados a seguir.

a) **Desalinhamento grosseiro das bases do eixo X**

O desalinhamento das guias lineares do eixo X poderia gerar forças sobre os carros que dão suporte ao portal. Porém, um desalinhamento que chegasse a influenciar a dinâmica de movimento deveria apresentar-se constantemente ou mesmo respeitar uma relação, como por exemplo: dependendo do sentido de avanço do eixo X as oscilações deveriam estar presentes tanto aceleração como da desaceleração do movimento, o que não ocorre. Além disto, um desalinhamento grosseiro seria perceptível nos ensaios geométricos realizados na montagem. Contudo, deve se considerar que, pequenos desalinhamentos imperceptíveis aos métodos de medições utilizados influenciam de alguma maneira a dinâmica de movimento.

b) **Rigidez mecânica da máquina**

Para analisar as influências da rigidez mecânica de modo prático seria necessário trocar partes ou toda a estrutura do sistema de movimentação, ou trabalhar com modelos matemáticos complexos que demandam tempo considerável para o desenvolvimento, e não faz parte do escopo deste trabalho.

c) **Inércia da massa transportada pelo eixo X**

Considerando que em diversos testes realizados os acionamentos foram capazes de acelerar as massas envolvidas e alcançando um comportamento dinâmico do movimento satisfatório, descarta-se esta hipótese.

d) **Dimensionamento dos motores**

Os cálculos efetuados para o dimensionamento dos motores mostram que o problema na dinâmica de movimento não deve estar relacionado ao torque do motor, já que o torque dos motores proporcionaria força suficiente ao acionamento para acelerar e desacelerar normalmente o eixo X da máquina, além dos valores empregados nos ensaios.

O eixo X é capaz de promover uma aceleração máxima de 674 mm/s^2 . E as acelerações utilizadas para a realização dos ensaios é de $117,5 \text{ mm/s}^2$.

a) **Influência do atrito**

É sabido que o atrito exerce uma influência que deve ser levada em conta em um sistema de movimentação quando se almeja obter movimentos mais precisos, porém, haja vista a pequena parcela de

influência sobre o movimento quando comparados a outros aspectos citados anteriormente, optou-se por não aprofundar o estudo deste aspecto.

Concluiu-se que o PID ajustado poderia ter relação com as oscilações apresentadas nas trajetórias. Para confirmar esta suspeita, foi realizado um novo ajuste PID somente para o eixo X, priorizando a dinâmica de movimento.

Para alcançar este tipo de ajuste foram considerados os seguintes aspectos:

O parâmetro KP (ganho proporcional), exerce maior influência sobre o tempo de resposta e sobressinal, além de outros aspectos não tão relevantes para o presente momento.

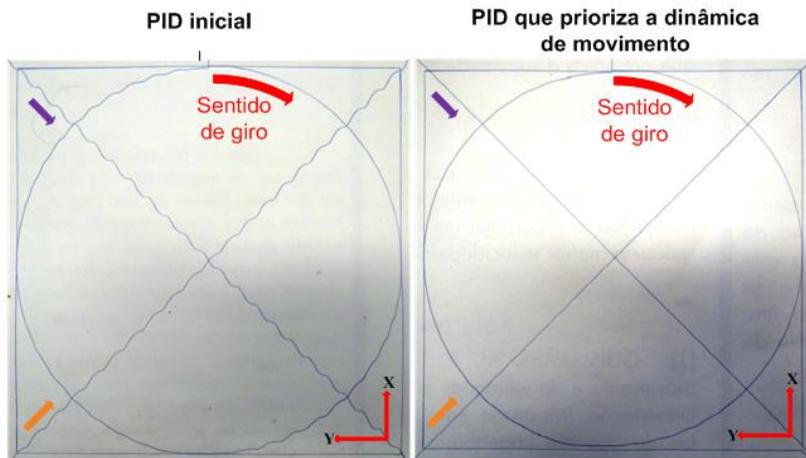
O parâmetro KI (ganho integrativo) é responsável por garantir o erro nulo. Ou seja, se este parâmetro não estiver bem ajustado e a máquina for realizar um posicionamento, esta pode passar da posição desejada pelo controle PID, então o controle realiza um novo comando para que a máquina retorne a posição correta, podendo efetuar estas ações diversas vezes, até que a posição seja encontrada, ou mesmo realizar um novo comando enviado pelo CNC sem que a busca do posicionamento anterior tenha sido terminado, gerando desta forma, as oscilações observadas nos testes de trajetórias impressas. Por este motivo, as influências geradas por este parâmetro podem ser as causadoras das oscilações verificadas nos ensaios de impressão de trajetórias. Então, optou-se por deixá-lo em 0, assumindo desta maneira, que a precisão de posicionamento poderá estar comprometida.

O parâmetro KD (ganho derivativo) exerce influência sobre o amortecimento dos dois parâmetros citados anteriormente (amortecimento do sobressinal), com o intuito de diminuir as oscilações para atingir da melhor maneira o erro nulo. Porém, assim como KI, este parâmetro também foi inutilizado por possivelmente influenciar a dinâmica de movimento.

Através destes ajustes objetivou-se priorizar a dinâmica de movimento com o intuito de promover comparações com os resultados do PID anterior, e comprovar se os antigos ajustes PID eram os causadores das oscilações. Então, foram realizados novos ensaios de trajetórias impressas, idênticos aos executados anteriormente, como mostra o APÊNDICE U.

A figura 67 mostra uma parte dos resultados dos ensaios de movimentação, denominada de quadro com círculos inscritos, onde é possível comparar as trajetórias realizadas com o PID na configuração inicial e com o PID que prioriza a dinâmica de movimento.

Figura 67 - Testes de quadros com círculos circunscritos

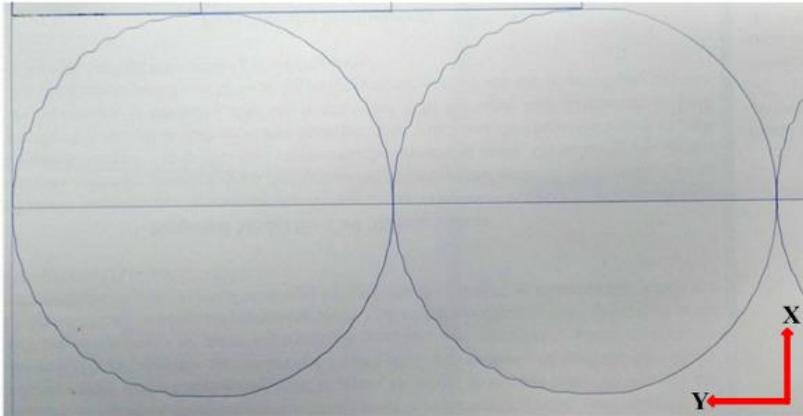


Fonte: Do autor

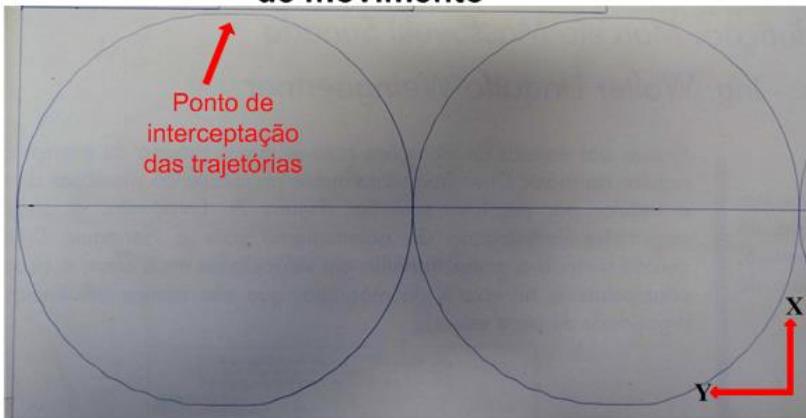
Analisando as trajetórias impressas com os dois ajustes PID, pode-se comprovar que o PID ajustado para priorizar a dinâmica de movimento realmente conseguiu atingir seu objetivo. A figura 68 mostra outra parte dos testes, onde é possível observar mais detalhes.

Figura 68 – Ensaio de movimentos circulares (comparação dos resultados obtidos após os ajustes PID)

PID inicial



PID que prioriza a dinâmica de movimento



Fonte: Do autor

É possível perceber que a dinâmica de movimento proporcionada pelo ajuste PID que prioriza a dinâmica de movimento gera um resultado de movimento muito melhor que o ajuste do PID inicial, tanto nas trajetórias retas como nas circulares, e a qualidade das trajetórias independe a aceleração ou desaceleração no eixo X.

A precisão de posicionamento piorou bastante em relação ao eixo X, haja vista o ponto que as trajetórias deveriam se interceptar. Esta

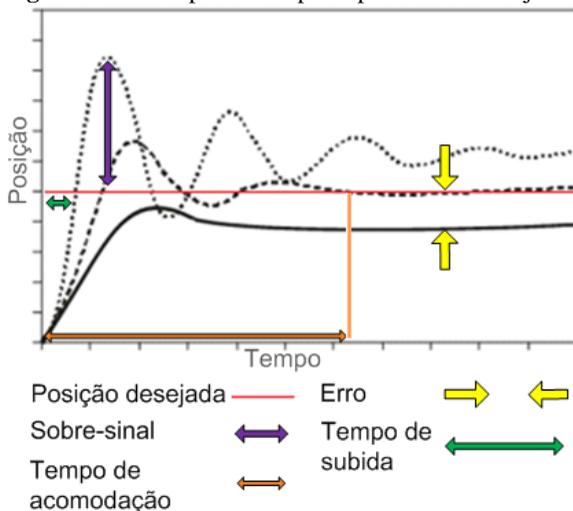
piora era esperada, uma vez que durante os ajustes PID, optou-se por não garantir o erro nulo (ausência de KI). O APÊNDICE V mostra os ensaios realizados com trajetórias de arcos, onde é possível comparar as trajetórias descritas por ambos os ajustes PIDs.

Considerando a complexidade da teoria de controle PID, uma vez que pequenos ajustes nos parâmetros exercem grande influência sobre diversos aspectos. Procurou-se esclarecer o que acontece nos PIDs ajustados, ou seja, PID ajustado inicialmente para os testes e o PID que prioriza a dinâmica de movimento.

O problema acontecido com o ajuste PID inicial pode ser causado pelo fato de que os ganhos não estão ajustados adequadamente. Por exemplo, o parâmetro K_P pode estar muito alto, gerando um baixo tempo de subida, porém, o sobressinal aumenta. Para diminuir o sobressinal e amortecer a resposta é adicionado K_D . Em seguida é adicionado K_I para tentar alcançar o erro nulo ou o menor erro possível. Porém, quando o sistema procura parar na posição desejada, o ganho de resposta é muito alto, novamente gerando sobressinal, que é corrigido e assim por diante, podendo realizar este ciclo diversas vezes, até achar a posição correta para um único comando, aumentando o tempo de acomodação.

A figura 69 exemplifica três diferentes tipos de respostas proporcionadas por ajustes PID diferentes.

Figura 69 - Exemplos de resposta para diferentes ajustes PIDs



O que pode ter acontecido com o PID que prioriza a dinâmica de movimento é que apenas com o parâmetro KP, o comando e controle da máquina não garante o erro nulo, ou seja, não corrige qualquer erro de posicionamento, realizando desta maneira um movimento muito mais suave e contínuo.

Com os resultados dos ensaios, ficou claro que o PID tem grande influência na ocorrência dos problemas com a dinâmica de movimento do sistema de movimentação. Estas dificuldades para realizar o ajuste PID adequado são influenciadas por alguns motivos, os quais foram listados abaixo:

- a) Elasticidade da correia de acionamento dos eixos na concepção mecânica utilizada;
- b) Tensionamento aplicado nas correias de ambos os acionamentos pode ser diferente, o que pode gerar pequenas defasagens nas respostas dos acionamentos,
- c) O tamanho da correia pode agravar as deformações elásticas sofridas pelos acionamentos;
- d) A rigidez mecânica do sistema de movimentação ainda não fixo em sua posição definitiva (na estrutura do teto do Laboratório LASER) contribui muito para a otimização do controle de posicionamento;
- e) Os dois acionamentos atuam simultaneamente em um único eixo. Pequenos ajustes mecânicos e de comando e controle destes podem não estar em perfeita harmonia, não serem perfeitamente idênticos ou não estarem perfeitamente balanceados;
- f) O tamanho dos cabos que levam informações para os motores é diferente. Apesar de que, segundo o fabricante apenas para cabos a cima 20 metros de comprimento acontece uma diferença significativa no envio de informações e desta forma possibilitando algum pequeno erro de movimentação de um acionamento em relação ao outro. Porém, a diferença de tamanho dos cabos utilizados é de 6 metros, já que os cabos utilizados têm 12 e 6 m de comprimento.

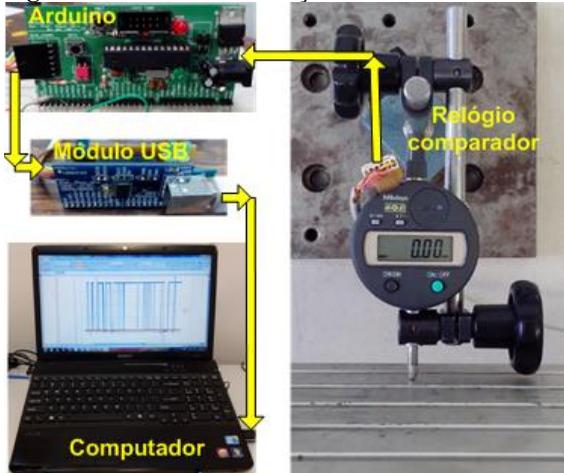
Para alcançar um ajuste PID ainda mais adequado para o sistema de movimentação, é necessária a realização de novos ensaios com estratégias diferentes, como:

- a) Realizar novos ensaios através do método de tentativa e erro, porém avaliando estratégias de ajustes diferentes;
- b) Equacionar o problema matematicamente, estabelecendo modelo matemático para o sistema de movimentação que forneça informações para um bom ponto de partida para os ajustes PID. Esta operação exige um tempo considerável para aplicação devido à complexidade física do sistema, acrescida pela complexidade do acionamento sincronizado do eixo X;
- c) Segundo (RACHADEL JÚNIOR, 2013) se levar-se em conta a capacidade de posicionamento do sistema de acionamento WEG, na velocidade de 200 RPM há uma tendência de se obter erros menores de posicionamento do que em velocidade de 50 rpm, ou seja, o erro de posicionamento para velocidades abaixo de 200 RPM pode ser maior. Considerando que os motores do eixo X estão trabalhando também dentro desta faixa de rotação, uma alternativa para que não se tenha este problema seria a instalação de uma caixa de redução idêntica para cada acionamento. Desta maneira, diminuindo a resolução de posicionamento, aumentando a precisão de posicionamento e forçando o motor a trabalhar em rotações mais altas para atingir a mesma velocidade linear. Nos requisitos do sistema de movimentação esta alteração é viável para a faixa de rotações de funcionamento dos servoacionamentos.

4.5 ENSAIOS DE EXATIDÃO DE POSICIONAMENTO E REPETIBILIDADE

Dois aspectos muito importantes para a avaliação de um sistema de movimentação são a precisão de posicionamento e a repetibilidade com que este posicionamento é executado. Para avaliar estes aspectos, foi desenvolvido um sistema de medição, onde um relógio comparador digital desempenha a função de transdutor que se comunica com um computador através de um Arduino (*open-source* de prototipagem eletrônica) e registra as medições no *software* programado em plataforma MATLAB. O relógio comparador é fixo na mesa do eixo Y e é realizado um deslocamento até um anteparo. A figura 70 mostra o sistema de medição desenvolvido.

Figura 70 - Sistema de medição desenvolvido.



Fonte: Do autor

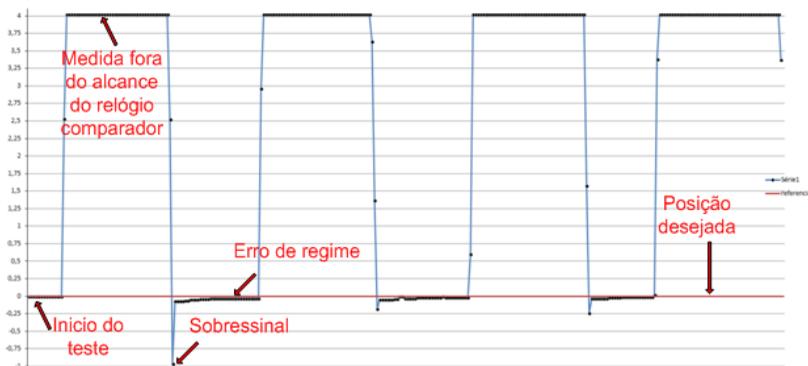
O relógio comparador utilizado é da marca Mitutoyo (modelo com resolução de 0,01 mm, e taxa de aquisição de um dado a cada 0,2s).

As leituras são realizadas no relógio comparador, os dados enviados ao computador através do Arduino e um módulo USB que facilita a conexão. O programa armazena os dados em uma planilha no *software* Excel e plota o respectivo gráfico.

Os ensaios de repetibilidade aqui apresentados se referem ao eixo X. As medições foram efetuadas com o carro do eixo Y posicionado na parte central do portal, já que esta é a posição que demonstrou ser a mais influente sobre a movimentação do sistema. Estes ensaios limitaram-se a apresentar os resultados para o eixo X. Uma vez que este eixo apresenta menor resolução e concepção mecânica mais influente na geração de erros no movimento.

Os ensaios são realizados da seguinte forma: primeiramente o carro do eixo Y é deslocado até uma posição onde mantém contato com o apalpador do relógio comparador, o qual é zerado (Zero de medição ou origem do movimento). Inicia a movimentação. É realizado um deslocamento do carro do eixo Y até uma posição pré-estabelecida (fora do alcance do relógio comparador), aguarda-se de 3 a 4 segundos e retorna-se o carro até a posição de origem. Novamente aguarda-se de 3 a 4 segundos, para repetir a mesma rotina de 5 a 8 vezes por ensaio. A figura 71 mostra um gráfico gerado em um dos ensaios.

Figura 71 - Gráfico gerado no teste de repetibilidade



Fonte: Do autor

Considerando que a posição de medição sempre é a origem do ensaio, observa-se que:

O erro de regime é a diferença entre a posição desejada (origem) e a posição executada pelo sistema de movimentação, após o controle alcançar a estabilidade.

O sobressinal é a diferença entre a posição desejada e o ponto mais extremo que a máquina ultrapassou a posição desejada, durante o posicionamento na origem.

Quando a máquina se desloca para uma posição pré-determinada (fora da origem), esta fica fora do alcance de medição do relógio comparador. Então, o relógio comparador permanece medindo o máximo valor dentro de seu alcance.

Os valores numéricos do gráfico apresentam sinais positivos ou negativos, que apenas representam para que lado os erros estão deslocados.

A figura 72 mostra uma parte ampliada dos resultados dos ensaios, para que seja possível observar estes detalhes.

Figura 72 - Ampliação do gráfico gerado no teste de repetibilidade



Fonte: Do autor

Analisando o gráfico percebe-se que, ao realizar o deslocamento de volta à origem, o sistema de movimentação ultrapassa a origem, apresentando um sobressinal de deslocamento de aproximadamente 1,1mm. Em seguida, o comando e controle efetua a correção necessária para retornar à posição desejada, novamente a ultrapassa (no sentido contrário), com um erro de aproximadamente 0,6 mm. Então, novamente é realizada uma correção pelo sistema de controle, porém, agora com mais suavidade (sem ultrapassar a posição desejada). Realizando um posicionamento final, com erro de regime em torno de 0,02mm. Dando sequência ao ensaio, esta rotina de posicionamento é repetida por mais algumas vezes para obter uma maior confiabilidade dos resultados.

Considerando o gráfico e fazendo uma analogia ao ajuste PID, o tipo de posicionamento apresentado na figura 63 demonstra que o PID ajustado não está adequado ao objetivado para este tipo de sistema de movimentação. É imprescindível que um sistema de movimentação CNC destinada à fabricação realize posicionamentos sem sobressinal, ou seja, não ultrapasse a posição desejada, o que poderia resultar na inutilização da peça que está sendo fabricada.

O fato de o controlador executar ações exageradas para chegar a um determinado *setpoint* e acabar ultrapassando-o, caracterizando um sobressinal, pode estar associado a um ganho KP muito alto.

Os erros de sobressinal e erro de regime podem estar associados, por exemplo, ao ganho derivativo KD baixo, o que pode gerar pouco amortecimento. Um ganho KI elevado, o que pode gerar oscilações. Ou ainda, pode haver um desequilíbrio entre os três parâmetros (KP, KI, KD).

Observa-se também que a máquina leva um tempo considerável para estabilizar a posição, o que é muito crítico quando se interpola eixos.

Para a realização dos ensaios no eixo X, estabeleceu-se condições de velocidade e distância de deslocamento para que fossem simuladas as situações de movimentação mais extremas e intermediária, para aplicações LASER suportadas pelo sistema de movimentação. Para isto foram realizados ensaios em velocidades de 1.000, 3.000, 8.000 e 20.000 mm/min e deslocamento de 10, 50, 150, 750 mm.

As tabelas a seguir apresentam o resumo dos ensaios realizados. O erro máximo de regime é o valor em módulo do maior erro de regime encontrado. Observou-se que todos os ensaios mantêm as mesmas características.

Para os ensaios apresentados na tabela 4, os valores de velocidades e distâncias se mantiveram fixos durante cada ensaio. Por exemplo, no ensaio 1 se manteve a velocidade de 1.000 mm/min, durante todos os deslocamentos. Os deslocamentos partiram da origem para a posição 10 mm e retornam a origem, diversas vezes durante o teste (6 a 8 vezes por ensaio). Cada ensaio foi realizado duas vezes.

Tabela 4 - Teste de repetibilidade (velocidade e distância fixa)

	Velocidade e distancias fixas			
	Velocidade (mm/min)	Distancia (mm)	Erro máximo em regime (mm)	Sobressinal máximo (mm)
teste 1	1000	10	0,02	0,36
teste 2	1000	50	0,03	0,96
teste 3	3000	10	0,02	1,78
teste 4	3000	150	0,04	1,58
teste 5	20000	10	0,05	2,02
teste 6	20000	750	0,04	1,19

Fonte: Do autor

O erro máximo de regime apresentado para todos os ensaios desta categoria foi de 0,05 mm, e o sobressinal máximo foi de 2,02 mm.

Para os ensaios apresentados na tabela 5, os valores de velocidades se mantiveram fixos e as distâncias foram variadas durante cada ensaio. Por exemplo, no ensaio 1 se manteve a velocidade de 3.000 mm/min durante todos os deslocamentos, partindo da origem para a posição 10 mm, retornando à origem, se deslocando para a posição 150 mm, retornando à origem, se deslocando para a posição 750 mm e retornando à origem. Repetindo de 6 a 8 vezes esta rotina durante o ensaio. Cada ensaio é realizado duas vezes.

Tabela 5 - Teste de repetibilidade (velocidade fixa e distância variável)

	Velocidade fixa e variação distancia no mesmo teste			
	Velocidade (mm/min)	Distancia (mm)	Erro máximo em regime (mm)	Sobressinal máximo (mm)
teste 1	3000	10	0,02	0,34
		150	0,08	1,29
		750	0,07	1,55
teste 2	20000	10	0,02	1,39
		150	0,03	0,94
		750	0,07	1,28

Fonte: Do autor

O erro máximo de regime apresentado para todos os ensaios desta categoria foi de 0,08 mm, e o sobressinal máximo foi de 1,55 mm.

Para os ensaios apresentados na tabela 6, os valores de distância se mantiveram fixos e as velocidades foram variadas durante cada ensaio. Por exemplo, no ensaio 1 realizou-se o deslocamento da origem para 150 mm, retornando à origem, primeiro com velocidade de 1.000

mm/min, em seguida com 3.000 mm/min e depois com 20.000 mm/min. repetido esta rotina de 6 a 8 vezes. Cada ensaio é realizado duas vezes.

Tabela 6 - Teste de repetibilidade (distância fixa e velocidade variável)

Distancia fixa e variação da velocidade no mesmo teste				
	Velocidade (mm/min)	Distancia (mm)	Erro máximo em regime (mm)	Sobressinal máximo (mm)
teste 1	1000	150	0,03	0,08
	3000	150	0,13	0,19
	20000	150	0,07	0,13

Fonte: Do autor

O erro máximo de regime apresentado para todos os ensaios desta categoria foi de 0,13 mm e o sobressinal máximo foi de 0,19 mm.

Os resultados apresentados nas tabela 4, 5 e 6 dos três ensaios mostram que, para as faixas de variação dos parâmetros deslocamento e velocidade se atingem precisões de posicionamento compatíveis para as aplicações LASER planejadas. A pior situação de precisão de posicionamento apresentada foi no ensaio de distância fixa e velocidade variável, onde o erro de posicionamento (erro máximo de regime), atingiu o valor de 0,13 mm. A repetibilidade de posicionamento do sistema de movimentação está dentro da mesma amplitude de erro. Já a pior situação de sobressinal aconteceu no ensaio de velocidade e distância fixa, onde o sobressinal máximo atingiu 2,02 mm.

Os ensaios de erro e repetibilidade de posicionamento se apresentam como mais um artifício para a avaliação da máquina e auxílio nos ajustes PID, já que através dos gráficos gerados é possível observar perfeitamente o que acontece durante o posicionamento. Sendo assim, servem como parâmetro para a realização de novos ajustes PID, mais adequados aos requisitos do sistema de movimentação. Além disto, estes ensaios apresentam dados numéricos que permitem qualificar a máquina quanto à precisão e repetibilidade de posicionamento.

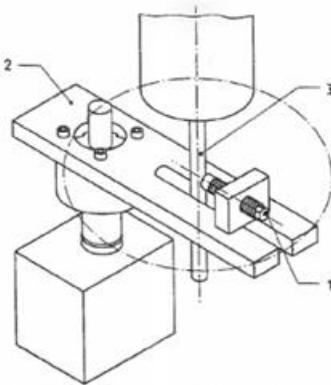
4.6 ENSAIOS COM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TRAJETÓRIAS CIRCULARES

A fim de realizar uma avaliação da exatidão de posicionamento dos dois eixos (X e Y) simultaneamente (interpolação) foi desenvolvido um sistema de medição que permite avaliar a trajetória circular programada em relação a uma trajetória circular desenvolvida por um braço articulado que gira sobre um ponto fixo (pivô central). O sistema

de medição foi desenvolvido e construído para a finalidade específica empregando os conhecimentos técnicos e os componentes mecânicos disponíveis no laboratório.

O sistema desenvolvido tem seus princípios baseados na (NBR-NM-ISO230-1, 1999). A figura 73 mostra um aparato de medição de circularidade.

Figura 73 - Aparato para a comparação de trajetórias circulares programadas com trajetórias circulares de raios pré-estabelecidos (pivot central)



- 1 Apalpador unidirecional
- 2 Dispositivo especial de rotação
- 3 Mandril de teste

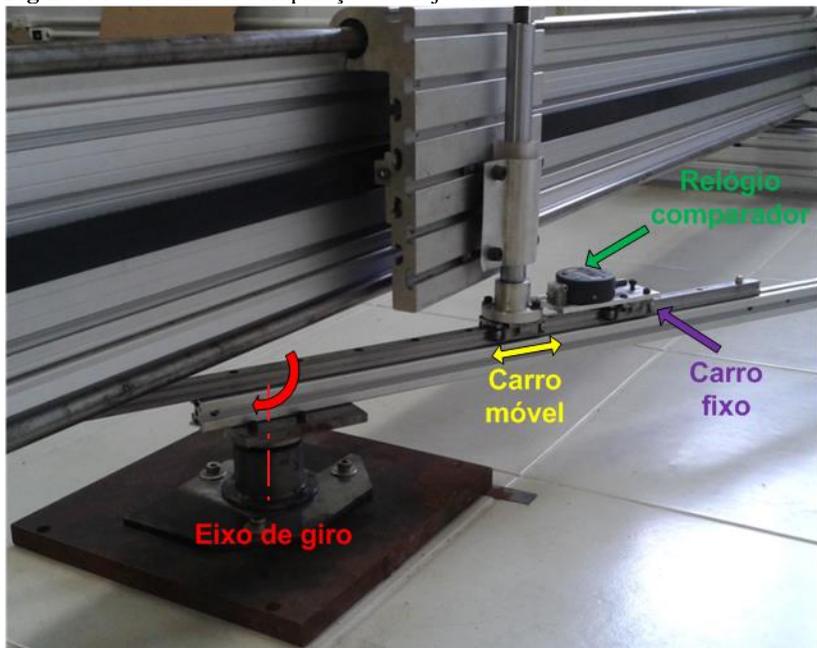
Fonte: Figura retirada de (NBR-NM-ISO230-1, 1999)

O sistema de medição é composto por um pivô central, com mancais de rolamento que apenas apresentam um grau de liberdade, a rotação sobre o seu eixo, aliado ao sistema de medição utilizado para os ensaios de deslocamento, posicionamento e repetibilidade de posicionamento. Para o uso deste sistema foram feitas as devidas adequações no *software*.

O sistema comparador de trajetórias circulares está fixo ao carro porta ferramentas do sistema de movimentação e tem como princípio de funcionamento a comparação de uma rotação de um braço articulado, fixado sobre um pivô central montado em uma base fixa. A medição é realizada com auxílio de um relógio comparador montado sobre o braço articulado. O sistema de movimentação tem sua origem coincidente com o eixo de rotação do pivô central, executa uma trajetória circular sobre o

mesmo raio de referência (posição do relógio comparador). O sincronismo entre aos dois movimentos circulares é obtido por um pivô rotativo secundário, fixo na mesa do sistema de movimentação CNC e sobre uma sapata que desliza na guia linear montada no braço articulado do pivô central. O relógio comparador, montado em uma posição fixa (regulável para cada raio) sobre o braço articulado, mede os desvios de posição entre a trajetória programada, em relação ao raio da trajetória executada pelo braço articulado. Os dados são armazenados e plotados em um gráfico polar. O sistema de medição é mostrado na figura 74.

Figura 74 - Sistema de comparação de trajetórias circulares

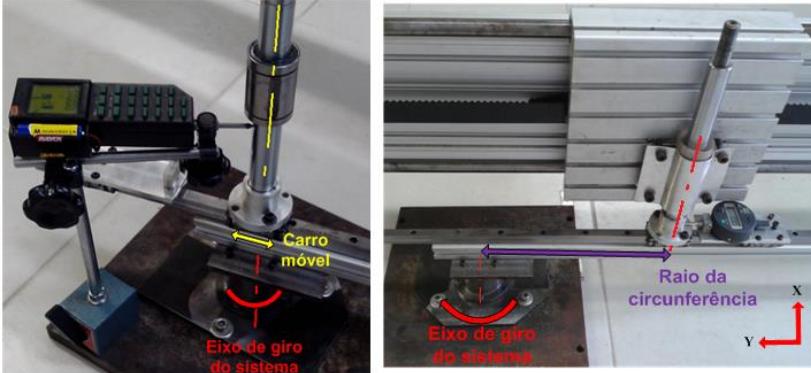


Fonte: Do autor

Para a realização dos ensaios de comparação de trajetórias circulares, primeiramente é necessário fazer um alinhamento do eixo de giro do pivô central do sistema de medição com o centro de rotação da trajetória circular programada para o carro móvel do sistema de movimentação, até que o eixo do carro do sistema de movimentação coincida como eixo de giro do pivô central. Para este ajuste foi utilizado um relógio comparador com resolução de 0,001mm. O sistema comparador acoplado ao carro do eixo Y e o sistema de movimentação

são posicionados na origem (centro da circunferência a ser executada), é realizada uma movimentação paralela a um dos eixos, referente ao raio da circunferência. Em seguida, o relógio comparador é posicionado em contato com o carro móvel do sistema de medição e zerado. São executadas trajetórias circulares de 180° (limitado pela amplitude de giro do sistema de medição desenvolvido), Maiores detalhes da preparação do sistema de medição para os ensaios são mostrados na figura 75.

Figura 75- Detalhes da preparação do sistema de medição para os testes.



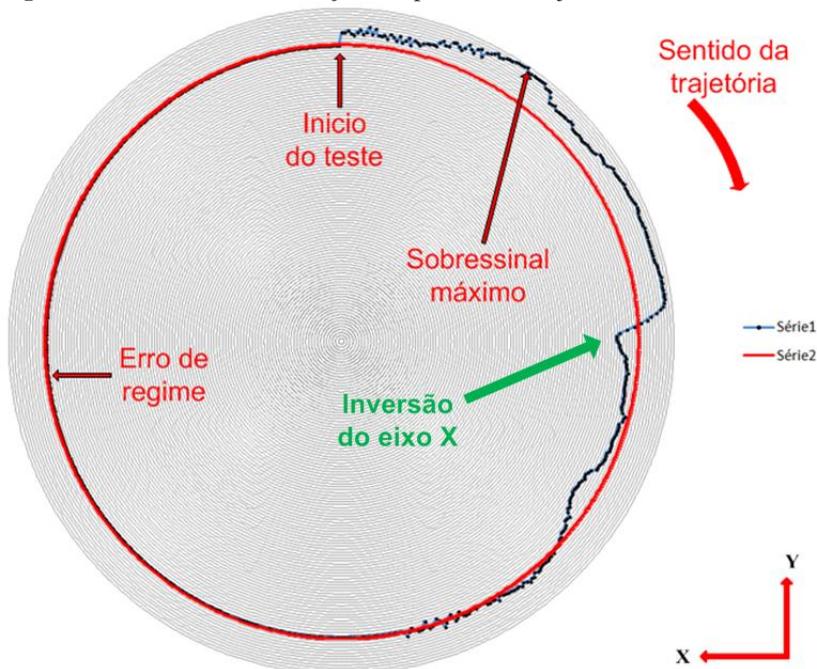
Fonte: Do autor

O sistema de medição permite observar o erro de regime do sistema de movimentação de grande porte para trajetórias circulares de até 1 m de raio, limitado para um deslocamento angular do sistema de medição de 180° com a resolução do relógio comparador empregado. Para cada velocidade utilizada nos ensaios, foi medido o tempo de execução da trajetória. Este tempo foi dobrado, objetivando considerar o tempo total de aquisição para 360° . Então, ajustou-se o tempo de aquisição de medidas para 360° . Visando plotar no gráfico uma circunferência inteira, mesmo a trajetória executada sendo apenas de 180° . De maneira que, a segunda parte das medições, é realizada com a máquina parada no final da trajetória de 180° . O que possibilita tempo suficiente para estabilizar o controle e obter o erro de regime.

A posição angular de cada erro de circularidade plotada no gráfico é aproximada, já que o sistema não dispõe de um transdutor para medição angular, como um encoder.

Os ensaios foram realizados com raio e velocidade constante. A figura 76 mostra os resultados de um ensaio de comparação de trajetória circular.

Figura 76 – Resultados da medição comparativa de trajetória circular

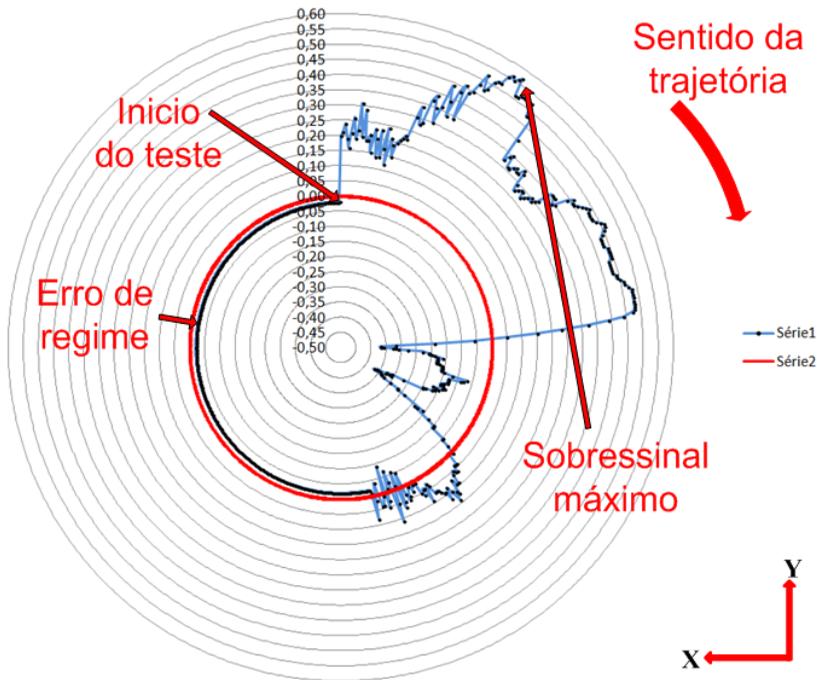


Fonte: Do autor

No gráfico da figura 76 observa-se que existem erros ou sobressinais, que se mantêm positivos de 0 até os 90° (a partir do início do teste no sentido da trajetória), quando ocorre a inversão do sentido de movimento no eixo X e o erro passa a ser negativo. Este erro apresenta oscilação que são amortecidas até o final do percurso (180°).

A figura 77 apresenta o gráfico em escala ampliada do mesmo ensaio, onde se observa os valores dos erros durante a trajetória.

Figura 77 – Resultados da medição comparativa de trajetória circular em detalhe (escala ampliada)



Fonte: Do autor

Para simular as aplicações LASER destinadas para o sistema de movimentação, foram utilizadas velocidades de deslocamento de 1.000, 3.000, 8.000 e 20.000 mm/min. Cada ensaio foi repetido 8 vezes, sendo que as trajetórias foram executadas 4 vezes no sentido horário e 4 vezes no sentido anti-horário. Com o intuito de analisar qualquer comportamento diferenciado entre os sentidos de avanço dos eixos, a tabela 7 apresenta o resumo dos ensaios realizados com o sistema de medição de circularidade.

Tabela 7 - Teste de medição de circularidade

Velocidade e distancias fixas				
	Velocidade (mm/min)	Raio (mm)	Erro máximo em regime (mm)	Sobressinal máximo (mm)
Ensaio 1	1.000	300	0,50	1,05
Ensaio 2	3.000	300	0,46	1,03
Ensaio 3	8.000	300	0,32	1,24
Ensaio 4	20.000	300	0,26	1,28

Fonte: Do autor

Considerando que a posição desejada para os ensaios sempre é a origem (ponto zero, posicionado sobre o raio da circunferência):

O erro de regime é a diferença da posição desejada e a posição executada pela máquina, após o controle alcançar a estabilidade.

O sobressinal máximo é a diferença entre a posição desejada e o posicionamento mais distante da posição desejada, executada pela máquina.

O erro máximo de regime apresentado para todos os ensaios foi de 0.50 mm e o sobressinal máximo foi de 1,28 mm.

Foi observado no ensaio de repetibilidade que o sistema de movimentação leva um tempo considerável para estabilizar a posição pelo fato de o PID ajustado proporcionar uma resposta lenta e com sobressinal. As trajetórias circulares apresentam bastantes oscilações pelas influências dos ajustes PID. Ou seja, é realizado um comando para uma posição e antes que a máquina possa estabilizar a mesma, outro comando é executado, o que acaba gerando os erros observados nos gráficos, resultando em trajetórias "senoidais", já vistas nos ensaios de impressão de trajetória.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, além de algumas sugestões e orientações para a realização de novos trabalhos ou aprimoramentos cabíveis ao sistema de movimentação. De modo geral, algumas observações sobre o trabalho e os sistemas desenvolvidos e testados merecem destaque:

- A avaliação do comando e controle da configuração original mostrou que o mesmo se encontrava inoperante e a documentação disponível é insuficiente para colocar em funcionamento o sistema de movimentação.
- O comando e controle desenvolvido para o sistema de movimentação utiliza um método de comando e controle bem atual, de baixo custo e proporciona que o sistema de movimentação atenda aos requisitos das aplicações LASER cogitadas.
- A avaliação das características mecânicas do sistema de movimentação mostrou que na configuração original o mesmo não atendia os requisitos das aplicações LASER cogitado.
- As diversas configurações mecânicas estudadas permitem concluir que a solução proposta para o sistema de movimentação proporciona menores flexões estruturais para os mesmos carregamentos.
- A fixação da estrutura da máquina a uma base de mais rígida (as vigas do teto) agregará uma ótima rigidez estrutural a máquina e contribuirá para que sejam alcançadas melhores característica dinâmica do sistema de movimentação.
- A implementação do biacionamento sincronizado através da instalação de mais um servoacionamento, reduziu as flexões máximas sofridas pelo portal do eixo Y quando deslocado no sentido do eixo X, proporcionou maiores acelerações, melhor dinâmica de movimento e exatidão de posicionamento.
- O sistema de movimentação desenvolvido combina soluções inovadoras, de baixo custo e bem atuais, que atendem perfeitamente as aplicações LASER almeçadas.

5.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

Os resultados dos ensaios de trajetórias impressas mostram que a dinâmica de movimento da atual situação da máquina melhorou

consideravelmente, apesar de a dinâmica de movimento não estar totalmente adequada aos requisitos das aplicações LASER almejadas, pelo fato de não ter sido alcançado um ajuste PID adequado.

O curso total para o eixo X é 1100 mm e para o eixo Y 3000 mm. O eixo X é capaz de proporcionar uma aceleração máxima de $0,674 \text{ m/s}^2$, e o eixo Y uma aceleração máxima de $1,41 \text{ m/s}^2$. Considerando uma rampa de aceleração e desaceleração triangular, o sistema de movimentação é capaz de atingir a velocidade de 51,66 m/min no eixo X, e a velocidade de 123,40 m/min para o eixo Y. O APÊNDICE X mostra os cálculos realizados.

Considerando 10% do curso total dos eixos para o sistema de movimentação atingir a velocidade máxima, o eixo X atinge a velocidade de 23,1 m/min, em 110 mm de deslocamento. O eixo Y atinge a velocidade de 55,18 m/min em 300 mm de deslocamento. Estas velocidades viabilizam os processos LASER de grande porte almejados. O APÊNDICE Z mostra os cálculos realizados.

O eixo X proporciona uma resolução de posicionamento de 0,07 mm e o eixo Y uma resolução de posicionamento de 0,05 mm.

Os ensaios de precisão de posicionamento e repetibilidade mostram que o eixo X apresenta precisão de posicionamento de 0,13 mm e a repetibilidade de posicionamento acontece dentro da mesma amplitude de erro. Apresenta sobressinal de 2,02 mm, o que é inadmissível para os requisitos das aplicações, porém, pode ser solucionado com novos ajustes PID e melhoria na rigidez estrutural.

Apesar de não terem sido realizados ensaios de precisão e repetibilidade para o eixo Y, é possível afirmar que este apresentará resultados muito melhores que o eixo X. Considerando que sua resolução é de 0,05 mm, enquanto o eixo X 0,07 mm e as características mecânicas de acionamento deste favorecem uma melhor dinâmica de movimento.

Os erros apresentados nos ensaios de medição de trajetórias circulares (interpolação) foram de 0,50 mm e o sobressinal máximo foi de 1,28 mm.

Os ajustes PID realizados proporcionam respostas lentas e com sobressinal.

Com a instalação do sistema de movimentação nas vigas do teto do laboratório diminuirá muito os problemas na rigidez estrutural do sistema de movimentação, o que facilitará também a realização de novos ajustes PID mais adequados, já que, não havendo mais falta de rigidez estrutural, a mesma não exercerá influência sobre a dinâmica de movimento.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que visem proporcionar melhorias ao sistema de movimentação desenvolvido neste trabalho.

- a) Estudo sobre projetos simétricos de máquinas, para aumentar as possibilidades de balanceamento das influências estruturais, (Robert J. Hocken, agosto de 1995) *apud* (PEREIRA, 2010);
- b) Estudo de sistemas de controle que obtenham alta dinâmica mesmo em estruturas de baixa dinâmica.
- c) Estabelecer relação com o setor de desenvolvimento da WEG, para obter mais informações que facilitem os ajustes PID no SCA 06.
- d) Comparar o desempenho de um CNC de arquitetura fechada (disponível no laboratório), em iguais condições utilizadas neste trabalho, a fim de estabelecer comparações entre sistemas de baixo custo e alto custo;
- e) Utilizar placas de conversão DA (digital analógica), específicas para aplicações com Mach3, controlando os servomotores analogicamente (forma nativa de controle servomotor WEG);
- f) Utilizar placas de controle de movimento que se integrem com o Mach3, proporcionando controle em malha fechada entre CNC e servo motores, diferente do controle atual que fecha malha entre servoconvertores e servo motores, além de possibilitar o comando dos servomotores de maneira analógica;
- g) Instalar sensores de *home* nas bases do eixo X do sistema de movimentação, a fim de garantir o correto alinhamento do portal.
- h) Utilizando o sistema de medição desenvolvido e adquirindo mais relógios comparadores, poderá ser realizado o teste de rigidez estrutural, conforme citado no capítulo 2.
- i) Realizar os ajustes PID com o auxílio de dois sistemas de medição (desenvolvidos neste trabalho), de maneira que estes avaliem simultaneamente o posicionamento realizado pelos acionamentos do eixo X. Podendo assim,

obter uma visualização gráfica de posicionamento dos acionamentos, facilitando os ajustes PID e comparações sobre as respostas executadas.

- j) Implementar encoder linear para a realimentação do sistema de controle, eliminando possíveis erros de posicionamento influenciados pela correia do sistema de acionamento, já que a medição atual é realizada com encoder rotativo no eixo da polia acionadora.

REFERÊNCIAS

ALCIATORE, D. G.; HISTAND, M. B. **Introduction to mechatronics and measurement systems**. Tata McGraw-Hill Education, 2007. ISBN 007064814X.

AMCI (Org.). **What Is A Resolver?** Disponível em: <<http://amci.com/tutorials/tutorials-what-is-resolver.asp>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

ANG, K. H.; CHONG, G.; LI, Y. **PID control system analysis, design, and technology**. *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, v. 13, n. 4, p. 559-576, 2005.

BIC (Brasil). **Produtos /Cristal**. 2014. Disponível em: <<https://www.bicworld.com/pt/produtos/details/7/cristal>>. Acesso em: 21 mar. 2014.

BRASIL. INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS-DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL. (Org.). **Laser a fibra óptica de alta potência é aplicado na indústria**. 2012. Disponível em: <<http://portal.ieav.cta.br/>>. Acesso em: 17 set. 2012.

BURGOA, David Guillermo Pimentel. **Análise e desenvolvimento de um sistema impressor Raster de formato extra-largo**. 2004. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CIMM (Brasil) (Org.). **Laser a fibra óptica de alta potência é aplicado na indústria**. 2014. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/2200-laser-a-fibra-optica-de-alta-potencia-e-aplicado-na-industria>. Acesso em: 17 jul. 2012.

CORREANAYAK (Org.). **Fresadoras de Puente móvil y mesa fija**. Disponível em: <<http://www.correanayak.eu/es/gama-de-productos/1184960198-mandradoras-puente-movil-y-mesa-fija/1184960263-fpm/>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

DAHOTRE, N. B.; HARIMKAR, S. P. **Laser fabrication and machining of materials**. Springer, 2008.

DOWNTIME SOLUTIONS (Org.). **Ballbar**. Disponível em: <<http://downtime-solutions.com/Ballbar.html>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

DYNOMOTION (Org.). **What is KFLOP?** 2014. Disponível em: <<http://dynamotion.com/KFLOP.html> 2014>. Acesso em: 01 mar. 2014.

FANUC (Org.). **Fanuc**. Disponível em: <<http://www.fanuc.co.jp>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

FOCUS MACHINE TOOLS (Org.). **FPT Industries Traveling Column Machine**. Disponível em: <http://focusmachinetools.com/?page_id=525>. Acesso em: 28 ago. 2014.

GALIL. **Products**. 2013. Disponível em: <<http://www.galilmc.com/products/dmc-18x6.php>>. Acesso em: 06 out. 2013.

GALIL (Org.). **DMC**. 2013. Disponível em: <<http://www.galil.com/motion-controllers/multi-axis/dmc-40x0>>. Acesso em: 06 out. 2013.

GESSER, Felício José. **PROPOSTA DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA O FRESAMENTO EM CINCO EIXOS**. 2012. 105 f. Tese (Mestrado

profissional) - Curso de Mecatrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

HAVRILLA, D.; ANTHONY, P. **Process fundamentals of industrial laser welding and cutting**. **Mechanical Engineer**, Product Support Group, p. 78, 1999.

HEIDENHAIN (Germany) (Org.). **Measuring Systems for Machine Tool Inspection and Acceptance Testing**. 2014. Disponível em: <http://www.heidenhain.de/de_EN/products-and-applications/comparator-systems/>. Acesso em: 24 mar. 2014.

HERRMANN, T. R. et al. **EAU guidelines on laser technologies**. **European urology**, v. 61, n. 4, p. 783-795, 2012.

ION, J. C. **Laser processing of engineering materials**. Ed. Elsevier, UK, 2005.

KAWAHITO, Y. et al. **High-power fiber laser welding and its application to metallic glass**. **Materials Science and Engineering: B**, v. 148, n. 1, p. 105-109, 2008.

LABMETRO. Notas de aula LABMETRO - PÓSMCI - **Interferometria LASER** avf@labmetro.ufsc.br,

LI, R. et al. A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method. ELSEVIER (Ed.). **Optics & Laser Technology**. 2014. Disponível em: <<http://www.journals.elsevier.com/optics-and-laser-technology/#help-and-contact>>. Acesso em: 18 mar. 2014.

MACH MOTION (Org.). **CNC Controls & CNC Kits**. 2013. Disponível em: <<http://machmotion.com/>>. Acesso em: 15 nov. 2013

MECALUX-LOGISMARKEt (Org.). **Robot de cinemática paralela**. Disponível em: <<http://www.logismarket.pt/adept-technology-iberica/robot-de-cinematica-paralela/1115009362-1411665633-p.html>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

NATIONAL INSTRUMENTS (Org.). **NI PCI-7344 4-Axis Stepper/Servo Controller for PCI**. Disponível em: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/13244>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

NBR-NM-ISO230-1. **Código de ensaio de máquinas ferramentas** Parte 1: Exatidão geométrica de máquinas ferramentas operando sem carga ou em condições de acabamento., 1999.

NEW FANGLED SOLUTIONS (Org.). **Art soft**. 2013. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/>>. Acesso em: 03 jun. 2014.

PARK, H. **Assessing machine tool performance**. *American Machinist*, p. pp. 39-42, Junho, 1992 1992.

PEREIRA, M. Notas de aula: **Engenharia de Precisão: Princípios I, Projeto mecânico de precisão**. . 2010.

PEREIRA, Milton. **Metodologia de Projeto para Sistemas Mecânicos de Precisão Reconfiguráveis**. 2004. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PETRUZZELLA, F. D. **Electric Motors and Control Systems**. 2010.

PKM (Org.). **TRICEPT MACHINE.** Disponível em: <<http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240413378>>. Acesso em: 28 ago. 2014.

PKM -TRICEPT (Org.). **Tricept vs Robots and Machine Tools.** Disponível em: <<http://www.pkmtricept.com/productos/index.php?id=en&Nproduct=1240413378>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

RACHADEL JUNIOR, Bernardo João. **AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE POSICIONAMENTO ANGULAR DE UM EIXO SERVOACIONADO.** 2013. 94 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica., Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

READY, J.; FARSON, D. **LIA handbook of laser materials processing**, vol. xxv Laser Institute of America. Orlando, Fl, 2001.

READY, J. F. **Industrial applications of lasers.** Academic press, 1997. ISBN 008050860X.

RENISHAW (Org.). **Telescoping ballbar systems.** 2014. Disponível em: <<http://www.renishaw.com/en/telescoping-ballbar-systems--6813>>. Acesso em: 24 mar. 2014.

ROSALES, Victor Daniel Heredia. **Projeto e implementação de uma máquina multifuncional para aplicação na área da comunicação visual.** 2007. 112 f . Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SCHNEIDER, C. A. **Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems.** . n. Aachen, Alemanha, , Novembro, 1978 1978.

SIEMENS (Org.). **Dörries Scharmann Technologie GmbH.** Disponível em: <<http://www.automation.siemens.com/mc-app/machine-booklet-mobile/MachineDetail.aspx?entry=0f812c00-88d0-4af3-b6e0-91b81d6153b2&booklet=e10205c2-5f21-41cb-a080-536abfcab41a&guiLanguage=1033>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

SOKOLOV, M.; SALMINEN, A. **Experimental investigation of the influence of edge morphology in high power fiber laser welding.** Physics Procedia, v. 39, p. 33-42, 2012.

SOUSA, A. R. D. **Padrões corporificados ea tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem.** 2000.

STEEN, W., M; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing.** v. 4th Edition, 2010.

STOETERAU, E. R. L. **Introdução ao Projeto de Máquina-Ferramentas Modernas.** Apostila da disciplina de projeto de máquinas-ferramenta, Curso Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

SUH, S.-H. et al. **Theory and design of CNC systems.** Springer, 2008. ISBN 1848003366.

SUNADA, Marcelo Massayuki. **ACIONAMENTO DE UM POSICIONADOR LINEAR DE ULTRAPRECI SÃO EMPREGANDO UMA REDUÇÃO HARMONIC DRIVE COM CONTROLE DE VELOCIDADE.** 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

THOMASNET (Org.). **Dual Spindle5-Axis gantry ...** Disponível em: <<http://news.thomasnet.com/fullstory/5-Axis-Gantry-Mill-features-dual-spindle-rams-582619>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

TOS-KURIM-CZ (Org.). **OBRÁBĚCÍ CENTRUM S POSUVNÝM STOLEM A PŘESTAVITELNÝM PŘÍČNÍKEM FRP.** 2014. Disponível em: <<http://www.tos-kurim.cz/vyrobni-program/univerzalni-stroje/portalova-obrabcicentra/frpf-frpn-a-b/>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

URIARTE, L. et al. **Machine tools for large parts.** *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 62, n. 2, p. 731-750, // 2013.

VETOR CNC (Brasil) (Org.). **Vetor CNC.** 2014. Disponível em: <<http://www.vetorcnc.com/>>. Acesso em: 04 abr. 2014.

WECK, M. **Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose.** Springer DE, 2006. ISBN 3540225064.

WECK, M.; BIBRING, H. **Handbook of Machine Tools, Vol. 4, Metrological Analysis and Performance Tests.** John Wiley and Sons, 1984.

WEG. **Manual de Programação SCA06.** 2009

WEG, I. S. A.-A. **MANUAL DO SERVOCONVERSOR SCA-04.** Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-80.pdf>>. Acesso em: 14 maio. 2014

WEG;, A. et al. **GUIA DE APLICAÇÃO DE SERVOACIONAMENTOS.** Disponível em:

<http://www.mundoelétrico.com/downloads/Guia_de_Aplicacao_de_Servoacionamentos.pdf>. Acesso em: 20 maio. 2014

ZAYER (Org.). **Gantry Neos-CNC**. Disponível em: <<http://www.zayer.com/en/product/gantry/neos/28>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

ZHONG, J. **PID controller tuning: A short tutorial. class lesson**, Purdue University, 2006.

ZIEGLER, J.; NICHOLS, N. **Optimum settings for automatic controllers. trans.** ASME, v. 64, n. 11, 1942.

ANEXOS

ANEXO A – TABELA DE COMPARAÇÕES DOS PROCESSOS LASER E AS TÉCNICAS ALTERNATIVAS.

Table 3.1 Comparison of different cutting processes [102]

Quality	Laser	Punch	Plasma	Nibbling	Abrasive fluid jet	Wire EDM	NC milling	Sawing	Oxy flame	Ultrasonic
Rate	✓	✓	✓	×	×	×	×		×	×
Edge quality	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	×	×	✓
Kerf width	✓	✓	×		✓	✓		×		
Scrap and swarf	✓	✓		×	✓			×		
Distortion	✓		×		✓		✓		×	✓
Noise	✓	×	×		×				×	
Metal and nonmetal	✓	×	×	×	✓	×	✓			✓
Complex shapes	✓	×	✓							
Part nesting	✓	×								
Multiple layers	×	✓			✓					
Equipment cost	×				×			✓	✓	
Operating cost								✓	✓	
High volume	✓	✓								×
Flexibility	✓	×	✓	✓	✓	×				×
Tool wear	✓	×	✓	×	✓			×	✓	
Automation	✓	×	×	×	✓	×	×		✓	
HAZ	✓	✓	×		✓	✓	✓		×	
Clamping	✓	×	✓		✓			×		
Blind cuts	✓	✓	✓	✓	✓	×	×		✓	×
Weldable edge	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Tool changes	✓	×	✓		✓			×	×	

Further comparisons can be found in Powell and Wykes [102].

EDM electric discharge machining, NC numerical control, HAZ heat-affected zone, ✓ point of particular merit, × point of particular disadvantage

Fonte: Figura retirada de (HAVRILLA; ANTHONY, 1999)

ANEXO B – CONSIDERAÇÕES DE SISTEMAS DE POSICIONAMENTO 2D PARA LASER

Table 3.1

SUMMARY OF 2-D MOTION SYSTEM CONSIDERATIONS

Parameter Considered In Design of Machine	Fixed Beam (moving x-y table)	Hybrid (x table, y optics)	Moving Beam ^[1] (flying x-y optics)
<i>Cost</i>	lowest	medium	highest ^[2]
<i>Laser Beam Alignment Time</i>	shortest	moderate	longest ^[3]
<i>Effects of Divergence on Weld</i>	none	some	most ^[4]
<i>Inertia Effects on Accuracy & Speed (also vibration)</i>	highest	medium	lowest
<i>Material Weight Restriction</i>	highest	medium	lowest
<i>Foot Print</i>	largest	medium	smallest
<i>Part Clamping & Handling Requirements</i>	highest	medium	lowest
<i>Optical Power Loss</i>	lowest	medium	highest
<i>Ability to Keep Optics Clean (Due to particulate migration^[5] & number of optics)</i>	highest	medium	lowest

[1] Including moving laser (e.g. Nd:YAG with reflective/transmissive beam delivery, and "no flow" CO₂ slab laser).

[2] Cost is relatively high due primarily to [3] and [4] below, but also because more optics are required.

[3] Orthogonality of beam delivery and mirror stability become critical, design and cost increase.

[4] Collimating of laser beam may be required, this adds optics and associated maintenance and alignment issues.

[5] Especially in the case of bellows w/o proper venting, or telescoping tubes w/o proper sealing.

Fonte: Figura retirada de (HAVRILLA; ANTHONY, 1999)

ANEXO C – FABRICANTE DE MÁQUINA LASER - JIATAI LASER TECHNOLOGY

▶ JTLC3015 ---High-speed Gantry CNC Fiber-optic Laser Cutting Machine

Model Demonstration:



O Princípio e características da máquina:

- a) Eixos bi-acionados com servomotores;
- b) Sistema Siemens 840D-SL (CNC de arquitetura fechada);
- c) LASER IPG 2000W, utilizado para o corte de alta velocidade, aceleração e estabilidade.
- d) Equipada com cabeçote de corte

Model	LC3015-2000
Processing size (length × width):	3000mm×1500mm
X-axis travel:	3050mm
Y-axis travel:	1550mm
Z-axis travel:	120mm
x, y, z-axis geometric positioning accuracy:	±0.025mm
x, y, z-axis repeated positioning accuracy:	±0.015mm
Minimum joint cutting:	0.15mm
Maximum positioning speed:	120m/min
Acceleration	1.2g
Laser power	2000W
External dimension of equipment	10000mm*3000mm*2100mm
Equipment weight	8.5T

Fonte: Disponível em
(<http://jt-laser.org/product/FiberOpticLaserCutti/1815.html>)

ANEXO D – SISTEMAS DE INTERFACE LASER TÍPICO.

Table 3.2	
TYPICAL LASER SYSTEM INTERFACE	
Program Controlled Outputs from System Controller	Status Inputs to System Controller
<u>Laser</u>	
Emergency Stop to Laser	Emergency Stop from Laser
	HV is ON (Ready)
HV Enable	System Safety Interlocks are Open/Closed (e.g. beam delivery components to enable HV)
Shutter Enable	System Safety Interlocks are Open/Closed (e.g. guards and access doors to enable shutter)
Open/Close Shutter	Shutter is Opened/Closed
Laser Discharge On/Off	
Select:	
a) Power Level (analog or digital)	
or	
b) Preprogrammed Power Level	
Select Preprogrammed Pulse or Ramping Program	
<u>Other Associated System Components</u> ^[1]	
Chiller Start/Stop ^[2]	Chiller Status (may require several inputs)
Shield Gas On/Off	Shield Gas Pressure/Flow Status
Exhaust System On/Off	Exhaust System is On/Off
<p>[1] Does not include I/O required for material handling. [2] Laser may have chiller remote start/stop capability.</p>	

Fonte: Figura retirada de (HAVRILLA; ANTHONY, 1999)

ANEXO E – LASER AUTO NIVELADOR BOSCH 30M - GPL 5

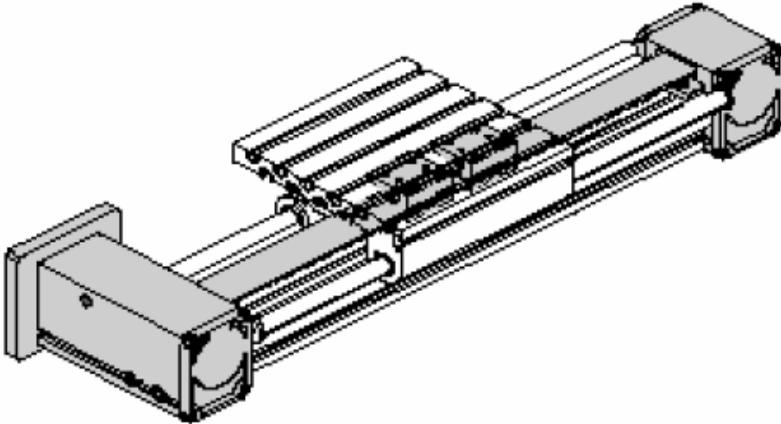


Fonte: Disponível em
(<https://www.rrmáquinas.com.br/canais/produtos/detalhes.asp?codLoja=1712>)

Características técnicas:

- a) Nível LASER de 5 pontos, ideal para checar esquadro, (3 pontos horizontais e 2 verticais);
- b) Classe do LASER 2;
- c) Faixa de trabalho 30 m;
- d) Precisão de nivelamento $\pm 0,3$ mm/m;
- e) Fixação em tripé 1/4".

ANEXO F – PERFIS E UNIDADES DE ACIONAMENTO EM ALUMÍNIO SCHÜCO DESIGN



Módulos de transmissão utilizando guias de precisão com correia dentada, força axial até 2.500 N, (SCHÜCO DESIGN, 2003).

Fonte: Figura retirada de (BURGOA, 2004)

ANEXO G – ENSAIO DE PERPENDICULARIDADE

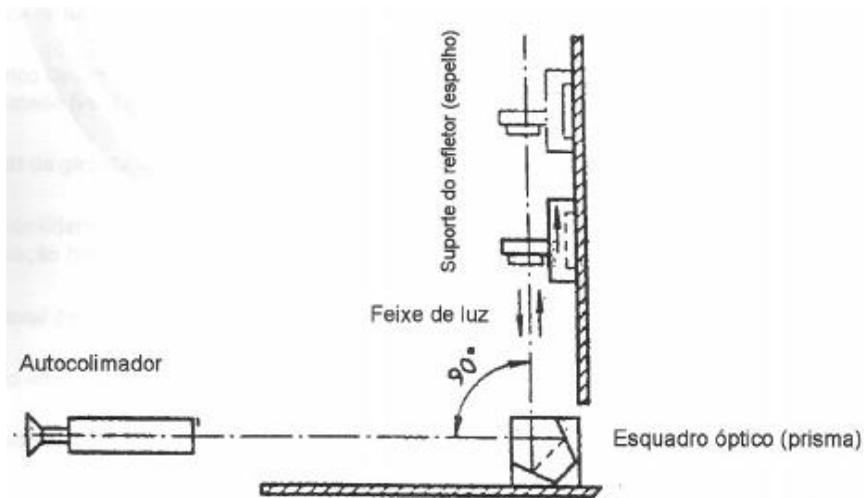
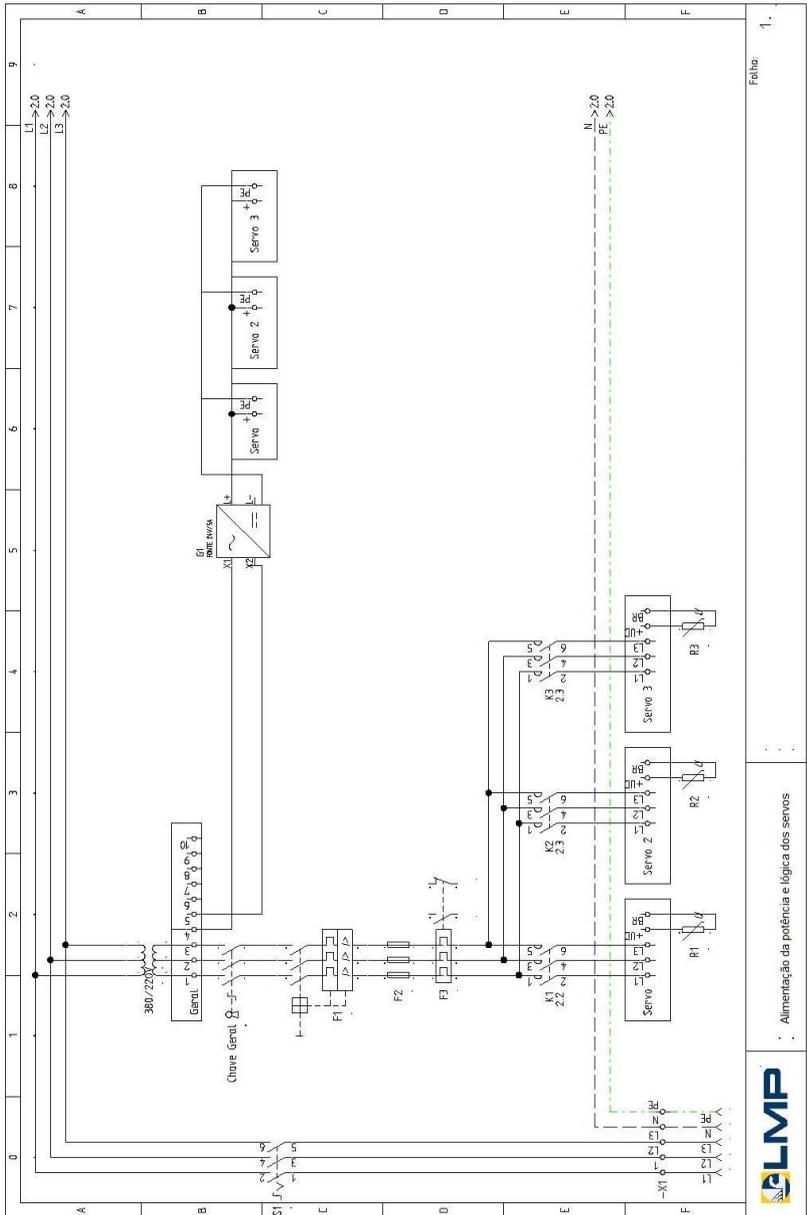


Figura 90

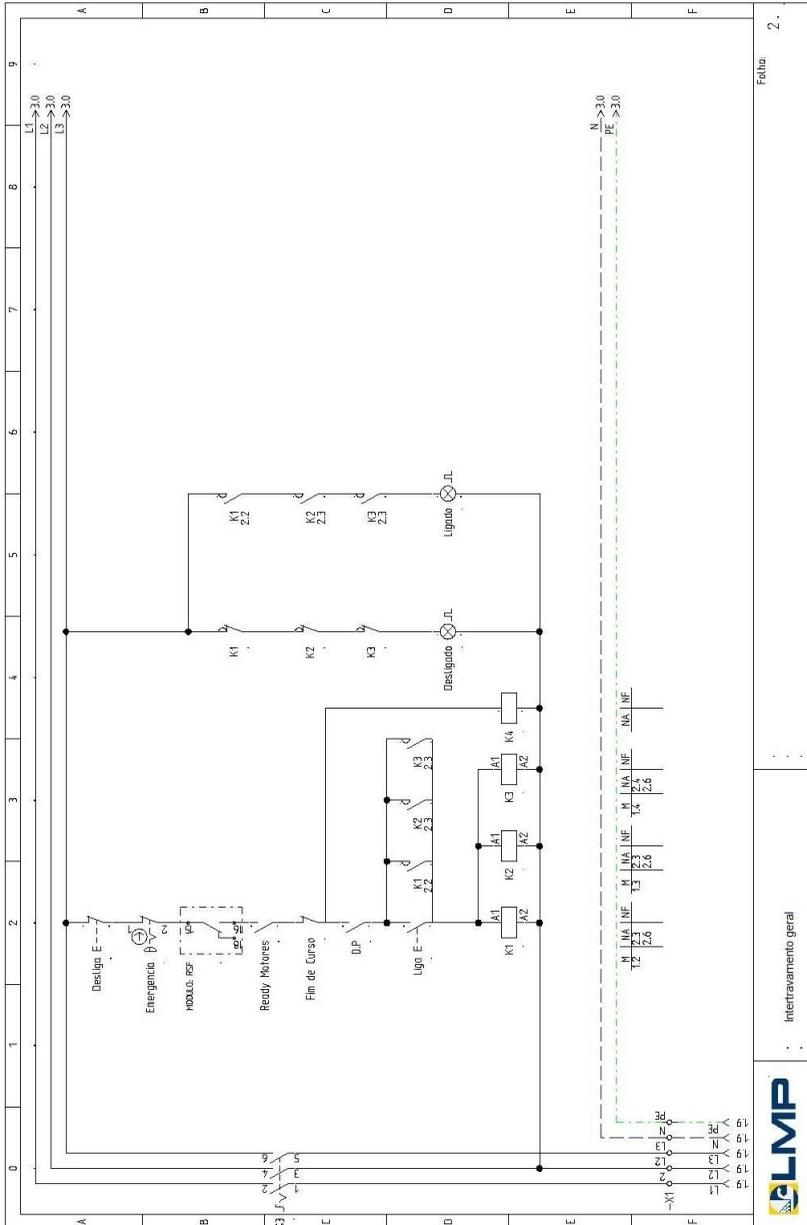
Fonte: Figura retirada de (NBR-NM-ISO230-1, 1999)

APÊNDICES

APÊNDICE A – CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO DA POTÊNCIA E LÓGICA DOS SCA06.



APENDICE B – INTERTRAVAMENTO GERAL.

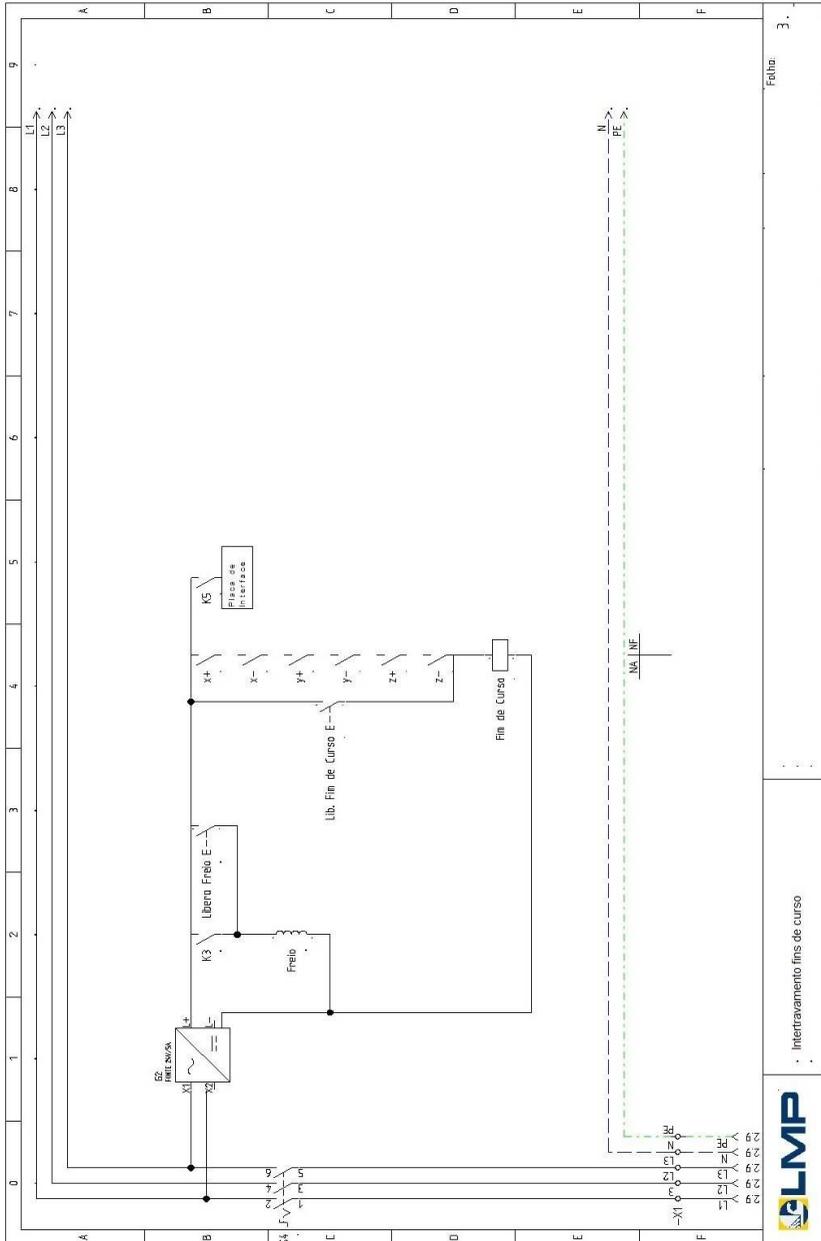


Folha 2.

Intertravamento geral

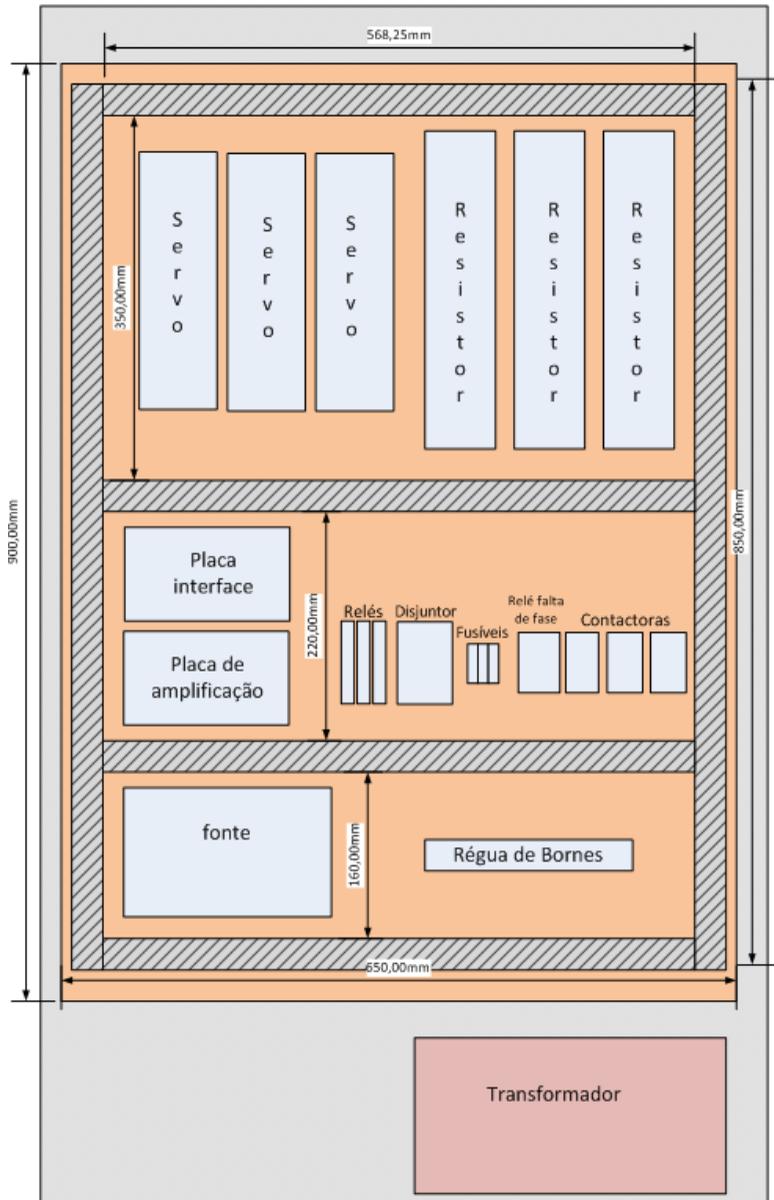


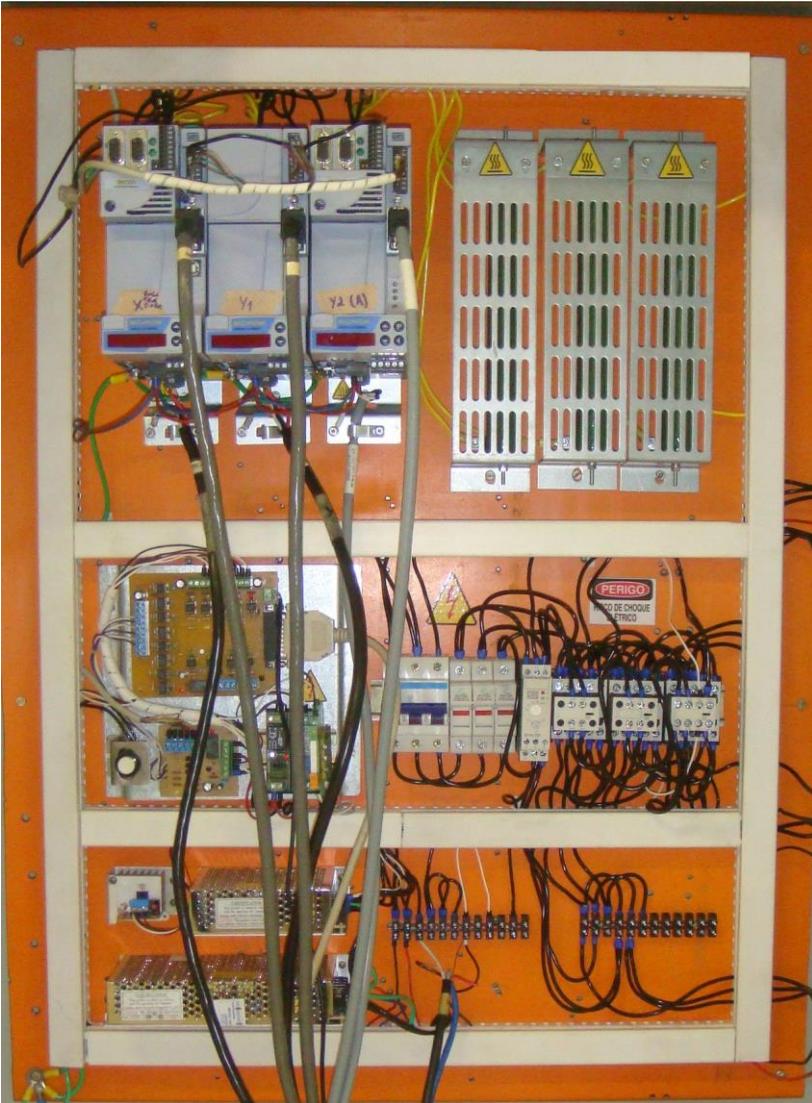
APÊNDICE C - INTERTRAVAMENTO DOS FFIND DE CURSO.



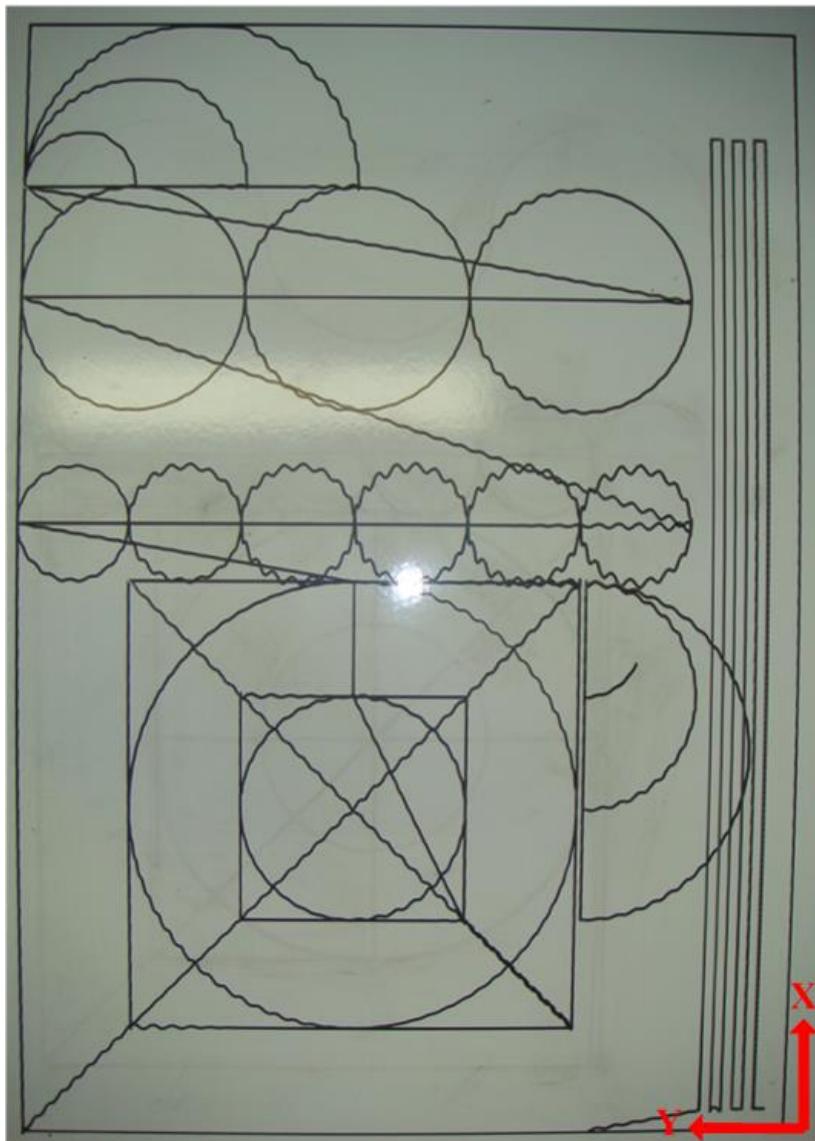
APÊNDICE D - QUADRO ELÉTRICO (VISTA EXTERNA).

APÊNDICE E - QUADRO ELÉTRICO (PROJETO INTERNO).

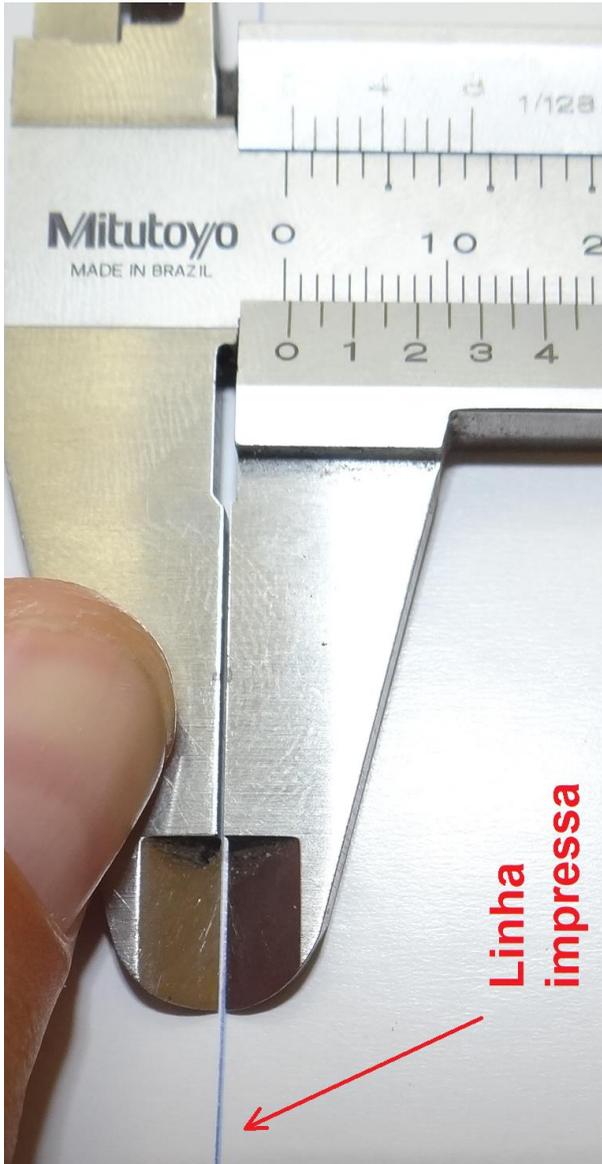


APÊNDICE F - QUADRO ELÉTRICO (IMPLEMENTAÇÃO).

APÊNDICE G - TESTE DE TRAJETÓRIAS IMPRESSAS (ROTINA PADRONIZADA PARA AVALIAÇÃO DA MÁQUINA)



**APÊNDICE H - TESTE DE ESPESSURA DA LINHA IMPRESSA
PELA CANETA (BIC).**

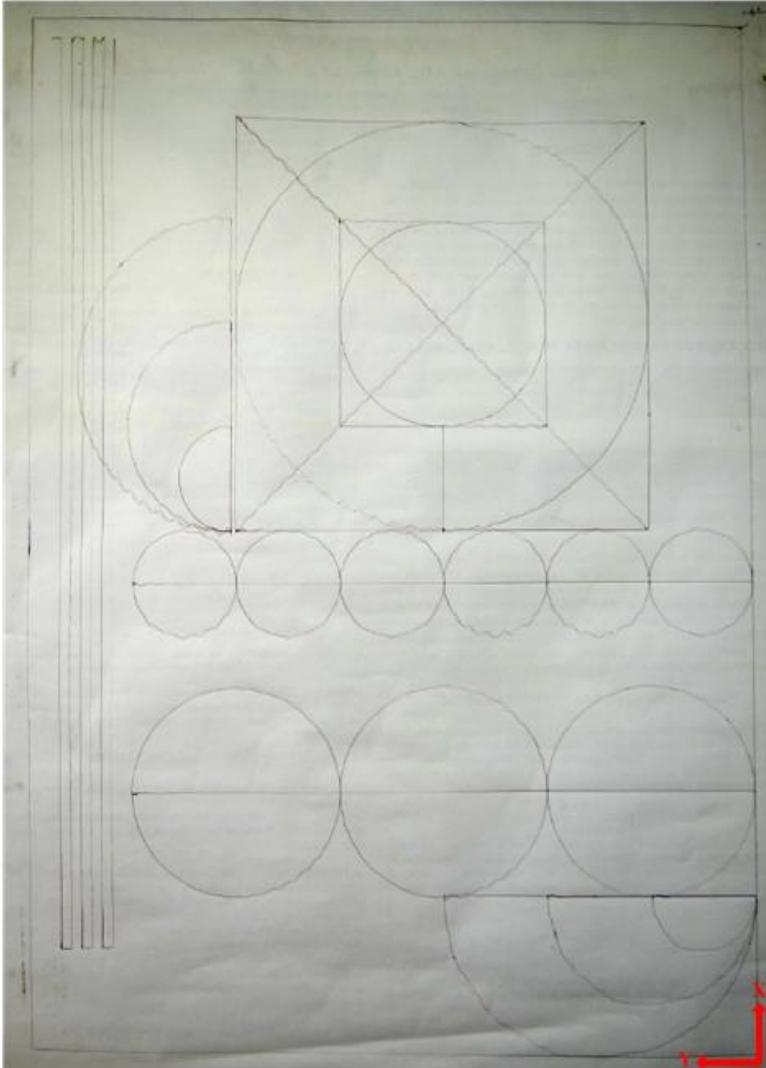


APÊNDICE I - MONITORAMENTO DA POSIÇÃO DO EIXO ATRAVÉS DO PARÂMENTRO 56 DO SERVOCONVERSOR (VALOR DO CONTADOR DE 0 A 65535 POR REVOLUÇÃO).

velocidade no software 20.000 mm/min	velocidade no software 3.000 mm/min																																								
maxima rotação atingida no motor: 210 RPM	maxima rotação atingida no motor: 33 RPM																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>posição no software</th> <th>leitura no SCA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>y0</td><td>3640</td></tr> <tr><td>y600</td><td>7693</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3698</td></tr> <tr><td>y600</td><td>7746</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3749</td></tr> <tr><td>y600</td><td>7763</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3729</td></tr> <tr><td>y600</td><td>7729</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3643</td></tr> </tbody> </table>	posição no software	leitura no SCA	y0	3640	y600	7693	y0	3698	y600	7746	y0	3749	y600	7763	y0	3729	y600	7729	y0	3643	<table border="1"> <thead> <tr> <th>posição no software</th> <th>leitura no SCA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>y0</td><td>3643</td></tr> <tr><td>y600</td><td>8168</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3665</td></tr> <tr><td>y600</td><td>8191</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3666</td></tr> <tr><td>y600</td><td>8180</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3670</td></tr> <tr><td>y600</td><td>8184</td></tr> <tr><td>y0</td><td>3646</td></tr> </tbody> </table>	posição no software	leitura no SCA	y0	3643	y600	8168	y0	3665	y600	8191	y0	3666	y600	8180	y0	3670	y600	8184	y0	3646
posição no software	leitura no SCA																																								
y0	3640																																								
y600	7693																																								
y0	3698																																								
y600	7746																																								
y0	3749																																								
y600	7763																																								
y0	3729																																								
y600	7729																																								
y0	3643																																								
posição no software	leitura no SCA																																								
y0	3643																																								
y600	8168																																								
y0	3665																																								
y600	8191																																								
y0	3666																																								
y600	8180																																								
y0	3670																																								
y600	8184																																								
y0	3646																																								
Obs: O motor deu seis voltas e mais alguns passos																																									
média y0 - y600	média y0 - y600																																								
-4028,75	-4519,75																																								
Media entre velocidades diferentes	491																																								
equivale a + ou - 2,7 graus																																									

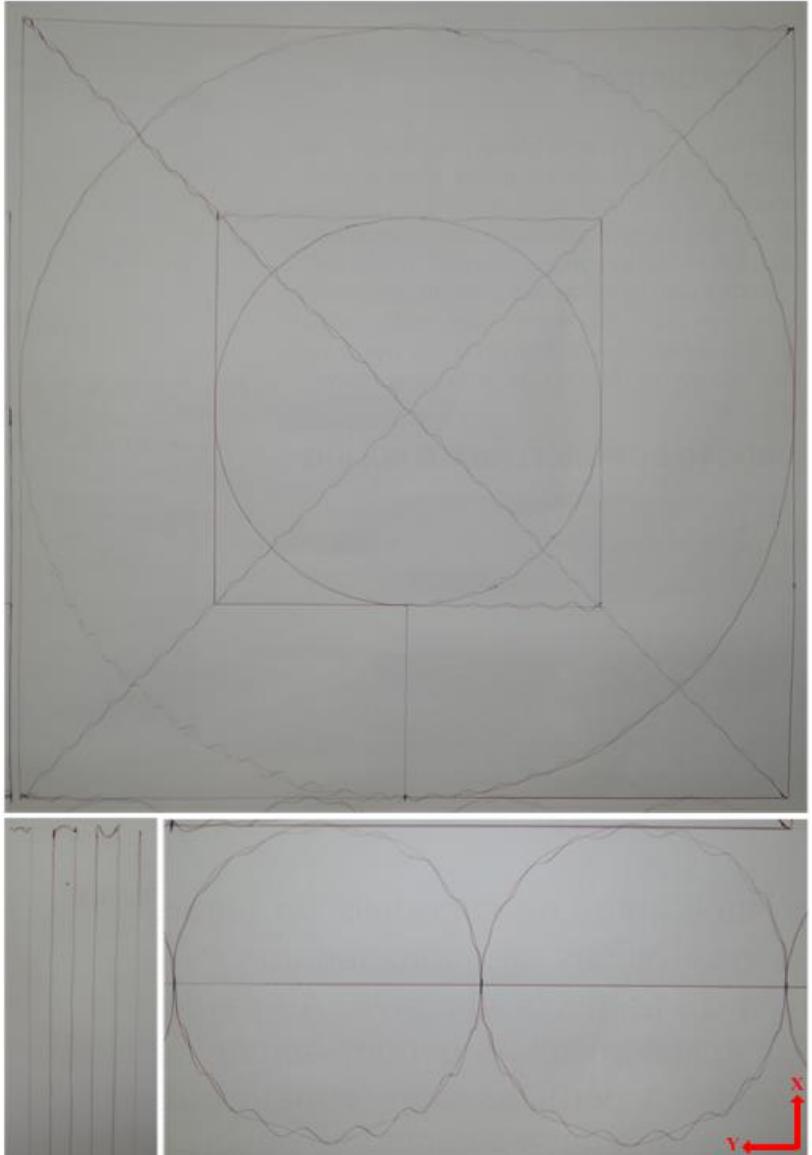
APÊNDICE J(1) - TESTE DE TRAJETÓRIA IMPRESSA (ROTINA PADRONIZADA) PARA A AVALIAÇÃO DA MÁQUINA.

Este teste foi realizado com velocidades de 20 000 mm/min (vermelho) e 3000 mm/min (azul), sendo que as trajetórias foram sobrepostas para facilitar comparações, verificação da repetibilidade, precisão e dinâmica dos movimentos.

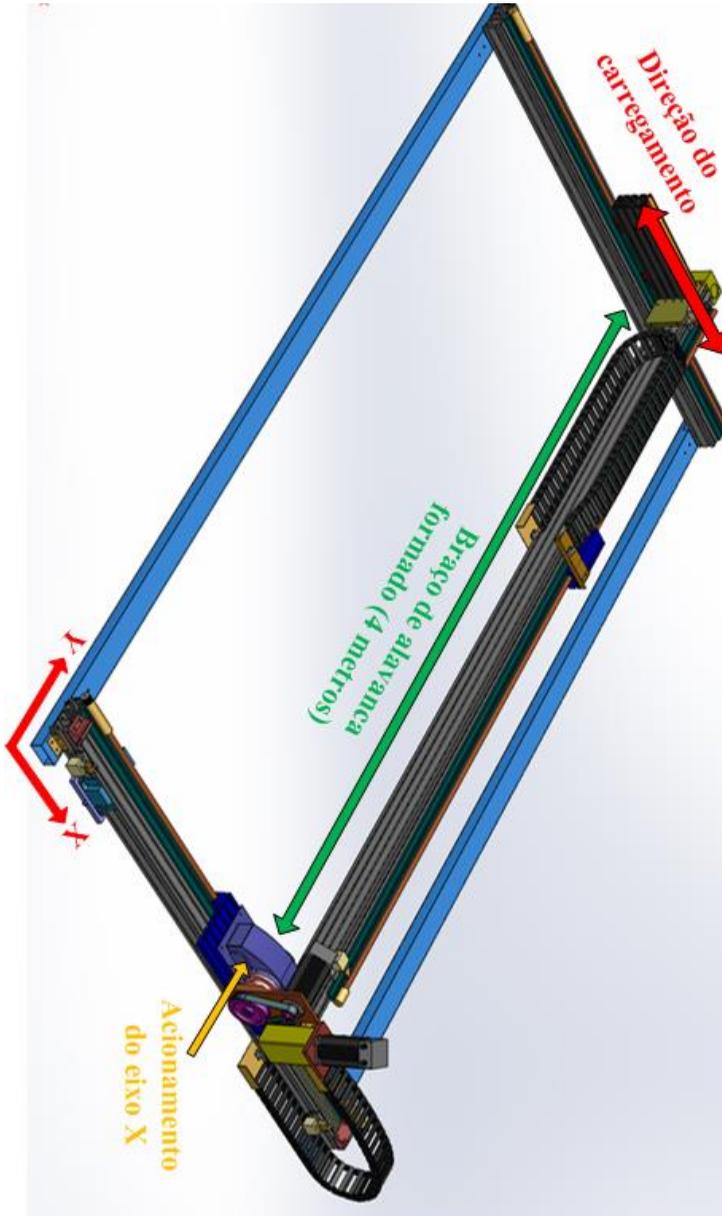


APÊNDICE J(2) - TESTE DE TRAJETÓRIA IMPRESSA (ROTINA PADRONIZADA) PARA A AVALIAÇÃO DA MÁQUINA.

Imagens com zoom em áreas específicas.



APÊNDICE L - ALVANCA FORMADA E DIREÇÃO DO CARREGAMENTO APLICADO NO TESTE DE FLEXÃO.



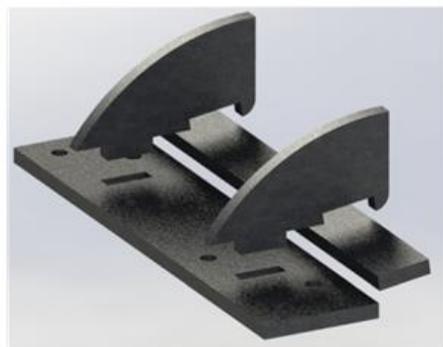
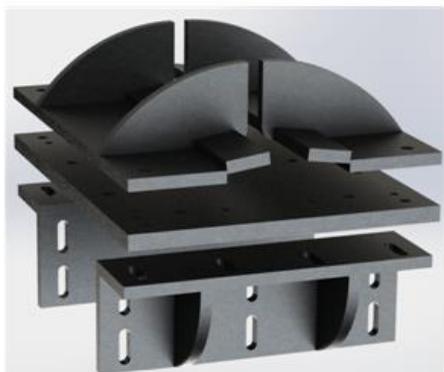
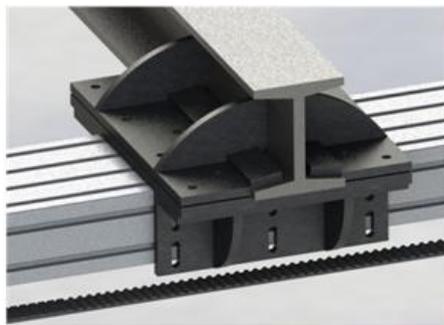
APÊNDICE M - ENSAIO COM LASER AUTO NIVELADOR.



**APÊNDICE N - POSIÇÃO QUE A MÁQUINA FICARÁ
INSTALADA NAS VIGAS DO TETO.**



APÊNDICE O - SISTEMA DE FIXAÇÃO (MÁQUINA X VIGAS DO TETO) QUE POSSIBILITA REGULAGEM EM TRÊS.



APÊNDICE P(1) - CÁLCULO DE MASSA DOS MÓDULOS DO EIXO X (LADO DO ACIONAMENTO NOVO).

A massa foi calculada através do software Solid Works.

Massa total do módulo de acionamento é 73681.89 gramas

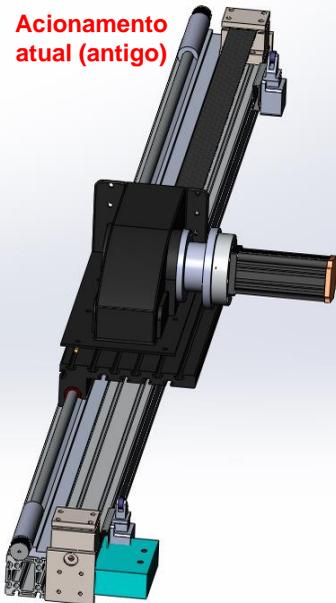


APÊNDICE P(2) - CÁLCULO DE MASSA DOS MÓDULOS DO EIXO X (LADO DO ACIONAMENTO ANTIGO).

A massa foi calculada através do software Solid Works.

Massa total do módulo de acionamento é 73806.62 gramas

**Acionamento
atual (antigo)**



Propriedades de massa de Eixo-Y2 (Assembly Configuration

Sistema de coordenadas de saída: -- valor predeterminado -

Massa = 66308.18 gramas

Volume = 21690150.68 milímetros cúbicos

Área de superfície = 6714392.30 milímetros quadrados

Centro de massa: (milímetros)

X = 119.14

Y = 41.23

Z = 1231.25

Eixos principais de inércia e momentos de inércia principais:

Tomado no centro da massa.

Ix = (0.02, -0.02, 1.00) Px = 1238684241.03

Iy = (0.56, -0.83, -0.03) Py = 20931710083.08

Iz = (0.83, 0.56, -0.01) Pz = 21702315717.91

Momentos de inércia: (gramas * milímetros quadrados)

Obtido no centro de massa e alinhado com o sistema de coo

Lxx = 21449007509.85 Lxy = -366338232.11 L

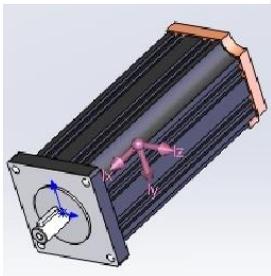
Lyx = -366338232.11 Lyy = 21168083159.47 L

Lzx = 452672093.57 Lzy = -359759578.79 L

Momentos de inércia: (gramas * milímetros quadrados)

Tomados no sistema de coordenadas de saída.

**Acionamento
do eixo Y**



Propriedades de massa de swa 40-1_6-30 (Part Conf

Sistema de coordenadas de saída: -- valor predeterm

Densidade = 0.01 gramas por milímetro cúbico

Massa = 7498.44 gramas

Volume = 954243.34 milímetros cúbicos

Área de superfície = 82595.26 milímetros quadrados

Centro de massa: (milímetros)

X = 0.00

Y = 0.00

Z = -91.84

Eixos principais de inércia e momentos de inércia prin

Tomado no centro da massa.

Ix = (0.00, 0.00, 1.00) Px = 6136623.76

Iy = (-0.00, -1.00, 0.00) Py = 26271002.29

Iz = (1.00, -0.00, 0.00) Pz = 26271117.55

APÊNDICE Q - CÁLCULO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA DISPONÍVEL PARA O EIXO X.

Considerando que o acionamento é feito por dois motores de torque 2,6 Nm trabalhando sincronizados

$$Torque\ Total = 2,6 + 2,6$$

$$Tt = 5,2\ Nm$$

Sendo:

Fd=força disponível

Rp=Raio da polia acionadora

Ta=Torque disponível para o acionamento

$$Ta = Fd \times Rp$$

$$5,2 = Fd \times 0,0458$$

$$Fd = 113,54\ N$$

Considerando 90% de rendimento do sistema:

$$Fr = Fd \times 0,9$$

$$Fr = 113,54 \times 0,9$$

$$Fr = 102,186\ N$$

Sendo:

Fr= Força real para acelerar

Fra= Força real disponível para acelerar

Fva= Força para vencer o atrito

$$Fr = Fra \times Fva$$

Como, para calcular **Fva** é necessário saber o valor de **Fn**.

Sendo:

Fn= Força normal

m= massa do sistema

$$Fn = m \times 9,8$$

$$Fn = 143,21 \times 9,8$$

$$Fn = 1403,458\ N$$

Assim:

$$Fva = 0,004 \times 1403,458$$

$$Fva = 5,614\ N$$

Então:

A força real disponível para acelerar o eixo X:

$$Fr = Fra + Fva$$

$$102,186 = Fra + 5,614$$

$$Fra = 96,572\ N$$

Então:

$$Fra = m \times Acel$$

$$96,57 = 143,21 \times Acel$$

$$Acel = 0,674\ m/s^2$$

A aceleração máxima que os motores podem proporcionar trabalhando sincronizados é de 0,674 m/s² ou 674 mm/s².

APÊNDICE R - CÁLCULO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA DISPONÍVEL PARA O EIXO Y.

Considerando que o acionamento é feito por um motor de torque 0,8 Nm

$$Torque\ Total = 0,8$$

$$Tt = 0,8\ Nm$$

Sendo:

Fd= força disponível

Rp= Raio da polia acionadora

Ta= Torque disponível para o acionamento

$$Ta = Fd \times Rp$$

$$0,8 = Fd \times 0,0331$$

$$Fd = 24,169\ N$$

Considerando 80% de rendimento do sistema:

$$Fr = Fd \times 0,9$$

$$Fr = 24,169 \times 0,9$$

$$Fr = 21,752\ N$$

Sendo:

Fr = Força real para acelerar

Fra = Força real disponível para acelerar

Fva = Força para vencer o atrito

$$Fr = Fra \times Fva$$

Como, para calcular **Fva** é necessário saber o valor de **Fn**.

Sendo:

Fn = Força normal

mcl = massa do cabeçote LASER

mc = massa do carro

$$m = mc + mcl$$

$$Fn = (mcl + mc) \times 9,8$$

$$Fn = (10 + 5) \times 9,8$$

$$Fn = 147\ N$$

Assim:

$$Fva = \mu \times Fn$$

$$Fva = 0,004 \times 147$$

$$Fva = 0,588\ N$$

A força real disponível para acelerar o eixo Y:

$$Fr = Fra + Fva$$

$$21,752 = Fra + 0,588$$

$$Fra = 21,164\ N$$

Então:

$$Fra = m \times Acel$$

$$21,164 = 15 \times Acel$$

$$Acel = 1,41\ m/s^2$$

A aceleração máxima que o motor pode proporcionar é de 1,41 m/s² ou 1410 mm/s²

APÊNDICE S - CÁLCULO DA RESOLUÇÃO PARA OS EIXOS X E Y.

Calculo de resolução para o eixo X

Sendo que:

n = O motor da 4096 pulsos por revolução

r = O raio da polia é 0,0458 m

$$\textit{Perimetro} = 2 \times \pi \times r$$

$$\textit{Perimetro} = 2 \times \pi \times 0,0458$$

$$\textit{Perimetro} = \mathbf{0,287624\ m}$$

$$\textit{Resolução} = \textit{perimetro} \div n$$

$$\textit{Resolução} = 0,287624 \div 4096$$

$$\textit{Resolução} = \mathbf{0,0702\ mm}$$

Calculo de resolução para o eixo Y

Sendo que:

n = O motor da 4096 pulsos por revolução

r = O raio da polia é 0,0331 m

$$\textit{Perimetro} = 2 \times \pi \times r$$

$$\textit{Perimetro} = 2 \times \pi \times 0,0331$$

$$\textit{Perimetro} = \mathbf{0,207868\ m}$$

$$\textit{Resolução} = \textit{perimetro} \div n$$

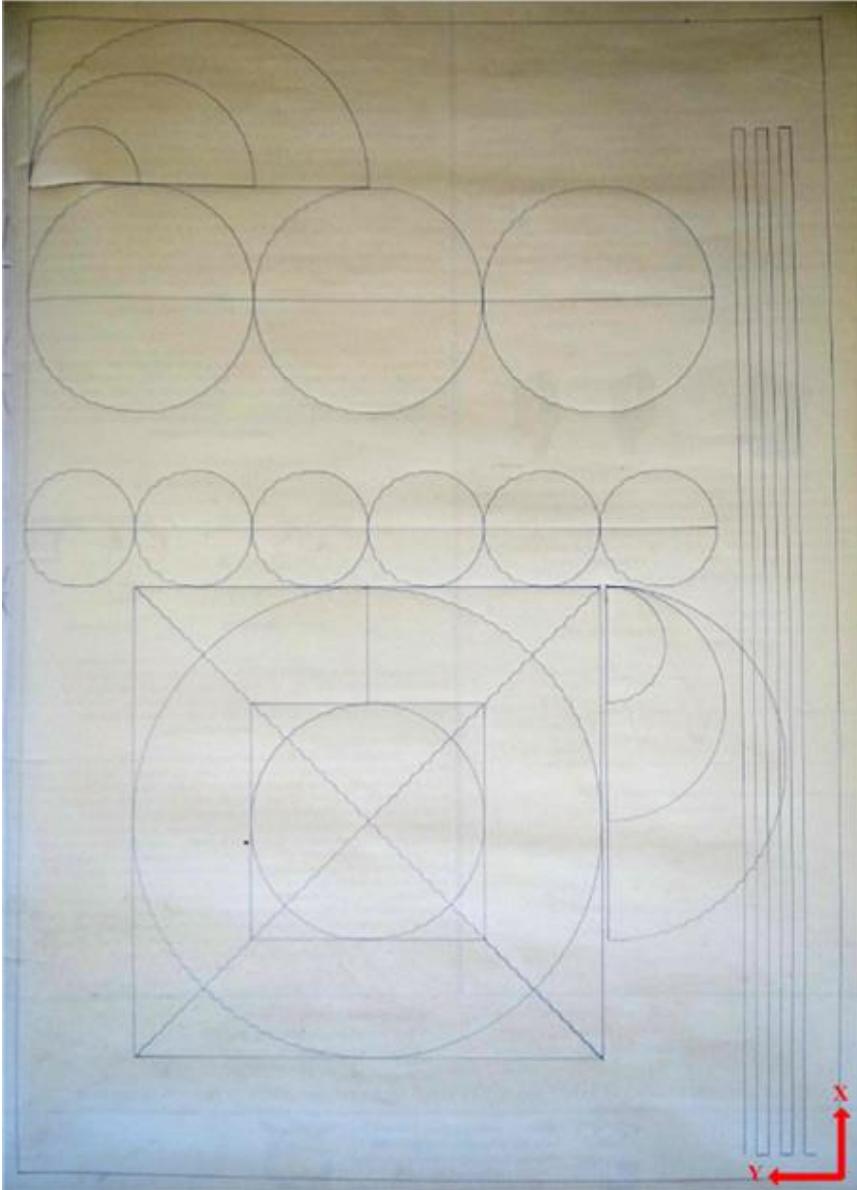
$$\textit{Resolução} = 0,207868 \div 4096$$

$$\textit{Resolução} = \mathbf{0,0507\ mm}$$

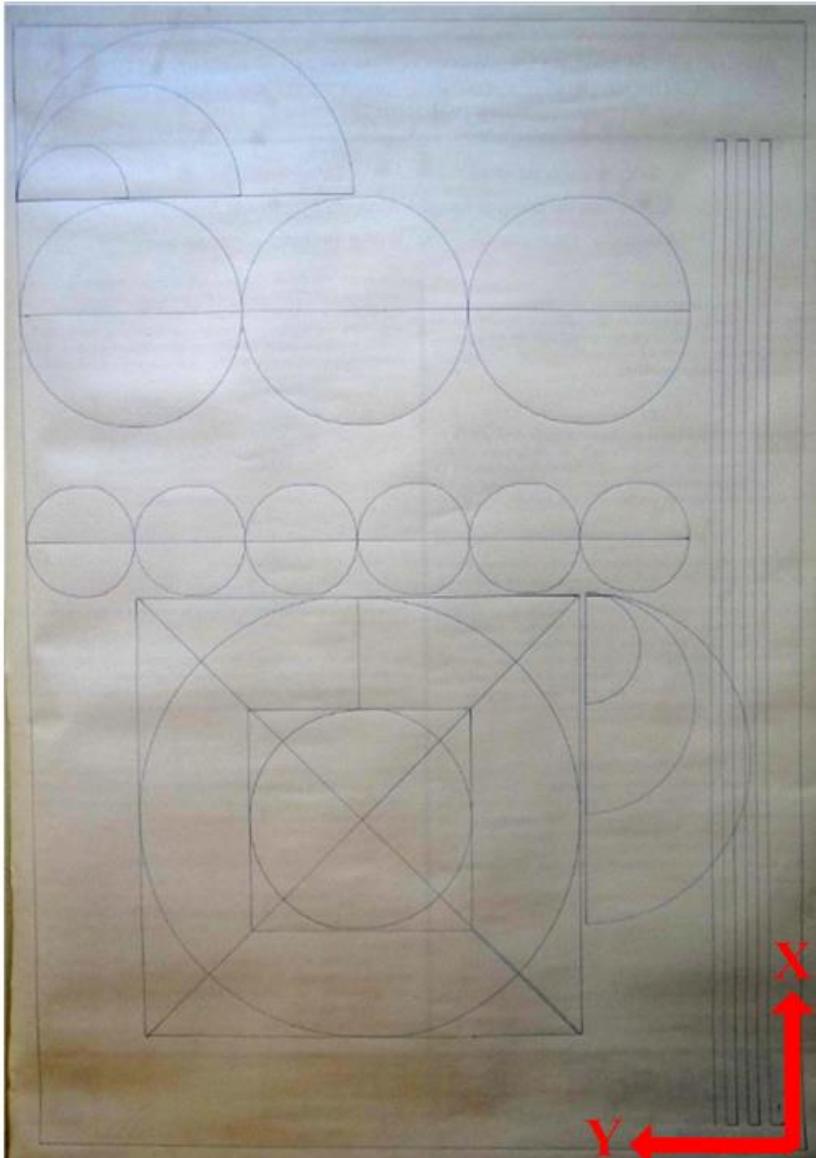
APÊNDICE T(1) - TESTE DE TRAJETÓRIAS IMPRESSAS APÓS AS ADEQUAÇÕES REALIZADAS NA MÁQUINA.



APÊNDICE T(2) - RESULTADO DE TRAJETÓRIAS IMPRESSAS APÓS AS ADEQUAÇÕES REALIZADAS NA MÁQUINA (PID ANTIGO).



APÊNDICE U - RESULTADO DE TRAJETÓRIAS IMPRESSAS APÓS AS ADEQUAÇÕES REALIZADAS NA MÁQUINA (PID QUE PRIORIZA A DINÂMICA DE MOVIMENTO)

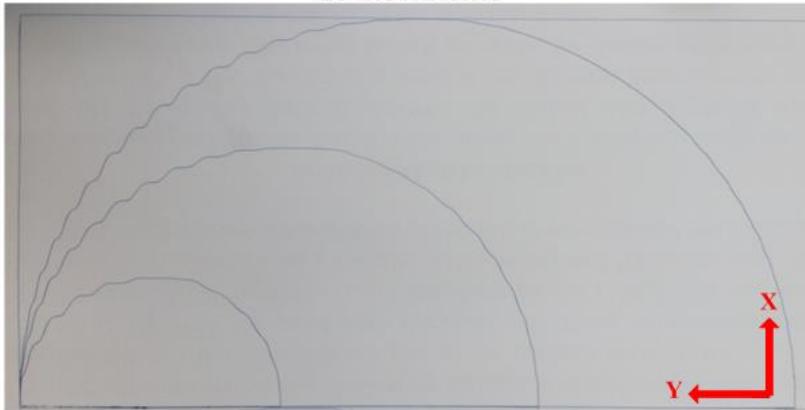


APÊNDICE V - RESULTADO DE TRAJETÓRIAS IMPRESSAS APÓS AS ADEQUAÇÕES REALIZADAS NA MÁQUINA (COMPARAÇÃO DOS AJUSTES PID_s).

PID inicial



PID que prioriza a dinâmica de movimento



APÊNDICE X - CÁLCULO DA VELOCIDADE MÁXIMA NOS EIXOS (X e Y).

Eixo X

Considerando que:

- O curso do eixo X é: 1100 mm
- A aceleração máxima proporcionada: $0,674 \text{ m/s}^2$

Sendo:

- Ca = Curso para acelerar
- Ct = Curso total

$$Ca = Ct \div 2$$

$$Ca = 550 \text{ mm}$$

Então:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \times Acel \times \Delta S$$

$$V^2 = 0 + 2 \times 0,674 \times 0,55$$

$$V = \sqrt{0,7414}$$

$$V = 0,861 \text{ m/s}$$

Ou

$$V = 51,66 \text{ m/min}$$

Velocidade máxima atingida pelo eixo X, utilizando 50% de seu curso para acelerar é de 51,66 m/min.

Eixo Y

Considerando que:

- O curso do eixo é: 3000 mm
- A aceleração máxima proporcionada $1,41 \text{ m/s}^2$

Sendo:

- Ca = Curso para acelerar
- Ct = Curso total

$$Ca = Ct \div 2$$

$$Ca = 1500 \text{ mm}$$

Então:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \times Acel \times \Delta S$$

$$V^2 = 0 + 2 \times 1,41 \times 1,5$$

$$V = \sqrt{4,23}$$

$$V = 2,056 \text{ m/s}$$

Ou

$$V = 123,40 \text{ m/min}$$

Velocidade máxima atingida pelo eixo Y, utilizando 50% de seu curso para acelerar é de 123,40 m/min.

APÊNDICE Z - CÁLCULO DA VELOCIDADE MÁXIMA ATINGIDA COM 10% DO CURSO DOS EIXOS (X e Y).

Considerando que:

- O curso do eixo X é: 1100 mm
- A aceleração máxima proporcionada: 0,674 m/s²

Sendo:

- Ca = Curso para acelerar
- Ct = Curso total

$$Ca = Ct \times 0,1$$

$$Ca = 1100 \times 0,1$$

$$Ca = 110 \text{ mm}$$

Então:

$$V^2 = V0^2 + 2 \times Acel \times \Delta S$$

$$V^2 = 0 + 2 \times 0,674 \times 0,11$$

$$V = \sqrt{0,14828}$$

$$V = 0,385 \text{ m/s}$$

Ou

$$V = 23,1 \text{ m/min}$$

Velocidade máxima atingida pelo eixo X, utilizando 10% de seu curso é 23,1 m/min.

Considerando que:

- O curso do eixo é: 3000 mm
- A aceleração máxima proporcionada 1,41 m/s²

Sendo:

- Ca = Curso para acelerar
- Ct = Curso total

$$Ca = Ct \times 0,1$$

$$Ca = 3000 \times 0,1$$

$$Ca = 300 \text{ mm}$$

Então:

$$V^2 = V0^2 + 2 \times Acel \times \Delta S$$

$$V^2 = 0 + 2 \times 1,41 \times 0,3$$

$$V = \sqrt{0,846}$$

$$V = 0,9198 \text{ m/s}$$

Ou

$$V = 55,18 \text{ m/min}$$

Velocidade máxima atingida pelo eixo Y, utilizando 10% de seu curso é 55,18 m/min.