

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Bernardo João Rachadel Junior

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE POSICIONAMENTO
ANGULAR DE UM EIXO SERVOACIONADO**

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

Orientador: Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. –Ing. Co-orientador: Prof. Carlos A. Martin, Dr. – Ing

Florianópolis
2013

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

Rachadel Junior, Bernardo João

Avaliação da exatidão de posicionamento angular de um eixo servoacionado / Bernardo João Rachadel Junior ; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner ; co-orientador, Carlos Alberto Martin. - Florianópolis, SC, 2013. 94 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Exatidão angular. 3. Posicionamento angular. 4. Servoacionamento. 5. Avaliação de posicionamento angular. I. Weingaertner, Walter Lindolfo. II. Martin, Carlos Alberto. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Bernardo João Rachadel Junior

**AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO DE POSICIONAMENTO
ANGULAR DE UM EIXO SERVOACIONADO**

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, 12 de junho de 2013.

Prof. Júlio César Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

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

Prof.º Carlos Alberto Martin, Dr. -Ing.
Co-Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.º João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.
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

Dedico esta dissertação aos meus pais Bernardo João Rachadel e Nelzita Maria Rachadel, e às minhas irmãs Karla Rachadel e Renata Rachadel.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Bernardo João Rachadel, Nelzita Maria Rachadel pelo incentivo aos estudos e pesquisa.

Às minhas irmãs Karla Rachdel e Renata Rachadel, pela paciência e apoio durante o trabalho.

Ao meu orientador, Walter Lindolfo Weingaertner e ao meu co-orientador Carlos Alberto Martin, por terem aceitado o desafio de orientar este trabalho.

Um agradecimento especial à todos os meus amigos, Leonardo Romero Monteiro, Edson Luiz Valmorbida, Eduardo Morel Hartmann, André Ferreira Bem Silva, Maycon Neykiel Bastos, Rodrigo Neri de Souza, Priscila Wessler, Bruno Roussenq Bichels, Mateus Furlan e tantos outros que me deram apoio e proporcionaram toda parceria necessária.

Um agradecimento carinhoso a Amanda Borges Becker, que durante toda a caminhada teve paciência e prestou todo cuidado e carinho que poderia existir.

Aos mestrandos Ismael Elias Lutz, Leandro Schmitz e Cláudio Silveira, pelo apoio técnico e amizade.

Aos bolsistas e pesquisadores, Larissa Santana, Artur Schutz e Thiago dias, pela grande ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

A todos os bolsistas e pesquisadores do LMP, LMP LASER e USICON.

Aos técnicos Hélio, Valtair e Joe, pela ajuda na construção do aparato e apoio técnico.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela oportunidade para aprimoramento técnico e acadêmico.

Agradeço a CAPES pelo suporte financeiro concedido durante esse período.

A todos que de alguma forma contribuíram durante o período de trabalho muito obrigado.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre
ombro de gigantes”*

(Isaac Newton, 1676)

RESUMO

Este trabalho avalia a exatidão de posicionamento angular de um sistema de servoacionamento WEG que integra um servoconversor SCA06 e motores da série SWA 40 que serão futuramente empregados em sistemas LASER para corte e soldagem. Para esta avaliação desenvolveu-se uma bancada experimental de um grau de liberdade translativo constituída de: servoacionamento, fuso de esferas recirculantes e guias lineares, *encoder* incremental de referência, sistema de condicionamento de sinais compatível e computador. Os ensaios de posicionamento angular se baseiam na norma ISO 230-2 que abrange máquinas-ferramenta, com enfoque na precisão e repetibilidade de posicionamento. Realizaram-se deslocamentos angulares sequenciais com incremento de 45° e 225°, e ainda ensaios com deslocamentos angulares pontuais de 180°, 360°, 720° e 1800°. Além disto, foram realizados ensaios com deslocamentos angulares sequenciais de mesmo ângulo com sentidos opostos (ensaios de ida e volta), para a determinação da histerese. Os ensaios tiveram como objetivo qualificar o sistema quanto à exatidão de posicionamento angular e repetibilidade. A partir dos dados coletados nos ensaios foram determinados os valores médios e o desvio-padrão dos deslocamentos angulares, indicadores da exatidão do sistema.

Palavras-chave: servoacionamento, posicionamento angular, precisão, repetibilidade.

ABSTRACT

This work evaluates the accuracy of angular positioning of a WEG servo system which integrates a servodriver SCA06 and motors of SWA 40 series, that will be applied at cutting and welding LASER systems in future. For this evaluation an experimental equipment was developed with one translative degree of freedom, composed of: servo, recirculating ball screw and linear guides, reference incremental encoder, compatible signal conditioning system, and computer. The tests of angular positioning were based on ISO 230-2 standard that covers machine-tool, focused on precision and repeatability of positioning. Sequential angular displacements were performed with an increment of 45° and 225°, and, tests with punctual angular displacements of 180°, 360°, 720° and 1800°. Furthermore, sequential angular displacements tests were performed with opposite directions (going and returning tests), for the determination of hysteresis. The tests had the goal of qualify the systems as angular positioning accuracy and repeatability. From the collected data of the tests, averages values and the standard deviation of the angulars displacements were determined, accuracy indicators of the system.

Keywords: servo, angular positioning, precision, repeatability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Precisão de posicionadores versus aplicabilidade de processos LASER.	23
Figura 2.1 – As diferentes formas de corte a LASER.	28
Figura 2.2 – Velocidade de soldagem vs. potência para o material Ti-6Al-4V	33
Figura 2.3 – Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada.	33
Figura 2.4 – Equipamento ou processo de comando (controle em malha aberta).	36
Figura 2.5 – Planta do sistema de controle com realimentação (controle em malha fechada).	37
Figura 2.6 – Gráfico de influência dos ganhos de controle PID.	39
Figura 2.7 – Classificação de sensores para realimentação de máquinas.	39
Figura 2.8 – Representação esquemática de um <i>resolver</i> ilustrando a excitação do rotor e a relação com os estatores.	40
Figura 2.9 – Exemplo de tensão nominal de entrada aplicada ao rotor para a excitação da bobina.	41
Figura 2.10 – Ilustração da saída dos canais do <i>resolver</i> , seno e cosseno, em relação a rotação.	41
Figura 2.11 – Exemplo de saída de <i>resolver</i> operando em dois ciclos por rotação.	42
Figura 2.12 – b) Sequência codificada demonstrando as sessões transparentes e opacas intercaladas; a) Estrutura física de um <i>encoder</i> óptico incremental comum.	43
Figura 2.13 – Representação esquemática de <i>encoders</i> evidenciando as diferenças principais entre <i>encoder</i> incremental e absoluto.	44
Figura 2.14 – Sequência binária e de Gray.	45
Figura 3.1 – Diagrama funcional da bancada experimental.	47
Figura 3.2 – Bancada com, suporte de ferro fundido cinzento com fuso de esferas recirculantes e guias lineares de esferas recirculantes montadas. Motor e <i>encoder</i> acoplados as pontas do fuso.	48
Figura 3.3 – Representação esquemática da bancada explicitando o sistema de movimentação longitudinal.	49
Figura 3.4 – Sequência para alinhamento e acoplamento dos dispositivos.	50
Figura 3.5 – (a) Servoconversor WEG SCA06, (b) Servomotor WEG SWA40	51
Figura 3.6 – Exemplo de código em diagrama de blocos Ladder desenvolvido no ambiente WLP.	52
Figura 3.7 – <i>Encoder</i> incremental da série ROD 800	53
Figura 3.8 – Condicionamento de sinal do ROD 800	53
Figura 3.9 – Subdivisão do sinal senoidal por modulação pulsada na saída do <i>encoder</i> .	54
Figura 3.10 – Imagem do identificador universal digital Diadur ID1400.	55
Figura 4.1 – Exemplo de ciclo de testes com 8 posições em 5 ciclos.	61

Figura 5.1 – Média dos valores médios de histerese para 50 rpm, motor #1.	74
Figura 5.2 – Média dos valores de desvio padrão da histerese para 50 rpm, motor #1.	74
Figura 5.3 – Média dos valores médios de histerese para ensaios a 100 rpm, motor #1.	75
Figura 5.4 – Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 100 rpm, motor #1.	75
Figura 5.5 - Média dos valores de médios para ensaios a 200 rpm, motor #1.	76
Figura 5.6 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 200 rpm, motor #1.	76
Figura 5.7 - Média dos valores médios para ensaios a 50 rpm, motor #2.	77
Figura 5.8 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 50 rpm, motor #2.	77
Figura 5.9 - Média dos valores médios para ensaios a 100 rpm, motor #2.	78
Figura 5.10 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 100 rpm, motor #2.	78
Figura 5.11 - Média dos valores médios para ensaios a 200 rpm, motor #2.	79
Figura 5.12 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 200 rpm, motor #2.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de energia para processo de corte a LASER CW CO ₂ obtidos experimentalmente.	30
Tabela 2.2 – Correlação das densidades de potência e perfis de zona fundida de diferentes procedimentos de soldagem.	31
Tabela 2.3 – Comparação entre processos de soldagem. (✓Pontos positivos, × Pontos negativos)	32
Tabela 2.4 – Comparação dos diferentes métodos de movimentação.	35
Tabela 2.5 - Resoluções típicas para determinadas faixas de operações em sistemas translativos.	35
Tabela 2.6 - Resoluções típicas para determinadas faixas de operações em sistemas rotativos.	35
Tabela 2.7 - Relação entre resolução e velocidade de sistemas translativos.	35
Tabela 2.8 - Relação entre resolução e velocidade de sistemas rotativos.	36
Tabela 2.9 – A influência independente dos ganhos P, I e D.	38
Tabela 3.1 – Especificações do sistema mecânico de posicionamento.	49
Tabela 3.2 – Matriz de comparação dos transdutores de posição rotativos. (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)	56
Tabela 3.3 – Matriz de comparação de sistemas de condicionamento de sinais. (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)	57
Tabela 3.4 – Matriz de comparação dos <i>softwares</i> de aquisição de dados. (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)	58
Tabela 4.1: Número de posições para ensaios de eixos rotativos até 360°	61
Tabela 5.1 – Resultados angulares para ensaios de 0° até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido horário, motor #1.	65
Tabela 5.2 – Resultados angulares para o posicionamento angular na faixa de 0 a 360° de movimentação e incremento de 45° para o sentido anti-horário, motor #1.	66
Tabela 5.3 - Erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios de até 360° com o motor #1.	66
Tabela 5.4 – Resultados de erros angulares para ensaios até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido horário, motor #2.	67
Tabela 5.5 – Resultados angulares para ensaios até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido anti-horário, motor #2.	67
Tabela 5.6 - Cálculo de erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios de até 360° com o motor #2.	68
Tabela 5.7 – Resultados dos movimentos angulares para ensaios com 5 rotações completas, avaliados em incremento de 225° para o sentido horário, motor #1.	69
Tabela 5.8 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, sentido anti-horário, motor #1.	69
Tabela 5.9 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, sentido horário, motor #2.	70

Tabela 5.10 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, anti-horário, motor #2.	70
Tabela 5.11 - Cálculo de erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios a mais de 360° com o motor #2.	71
Tabela 5.12 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido horário, motor #1.	72
Tabela 5.13 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido anti-horário, motor #1.	72
Tabela 5.14 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido horário, motor #2.	73
Tabela 5.15 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido anti-horário, motor #2.	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D – Analógico/Digital

App – Ampér pico a pico

ASCII - Código Padrão Americano para o Intercâmbio de Informação
(*American Standard Code for Information Interchange*)

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

LASER – Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação
(*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão

LHW – Laboratório de *Hardware*

PID – Controlador Proporcional Integral Derivativo

RPM – Rotações por Minuto

SISO – *Single Input, Single Output*

STX – Início de Texto (*Start of Text*)

TTL – Lógica Transistor-Transistor (*Transistor-Transistor Logic*)

ZAC – Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	24
1.2 OBJETIVOS	25
1.2.1 Objetivo Geral	25
1.2.2 Objetivos Específicos	25
2 ESTADO DA ARTE	27
2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO LASER	27
2.1.1 Corte a LASER	27
2.1.2 Soldagem a LASER	29
2.2 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO	33
2.3 CONTROLE	36
2.3.1 Controle PID	37
2.5 <i>RESOLVER E ENCODER</i>	39
2.5.1 <i>Resolver</i>	40
2.5.2 <i>Encoder Óptico Incremental</i>	42
2.5.3 <i>Encoder Óptico Absoluto</i>	44
3 ESTUDO DO OBJETO	47
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL	47
3.1.1 Mecanismo	48
3.1.2 Acionamento	50
3.1.3 Hardware de Aquisição e Condicionamento de Sinais	52
3.1.4 Programa de Aquisição e Processamento de Dados	55
3.2 SOLUÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA BANCADA	56
3.2.1 Transdutor	56
3.2.2 Sistema de Condicionamento de sinais	56
3.2.3 <i>Software</i> de Aquisição de Dados	57
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	59
4.1 NORMA ISO 230-2	59
4.1.1 Condições Ambientais	59
4.1.2 Máquina a ser testada	60
4.1.3 <i>Warm-up</i>	60
4.1.4 Ensaios	60
4.2 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DE POSIÇÃO	62
4.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE HISTERESE	63
5 RESULTADOS OBTIDOS	65
5.1 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM ROTAÇÃO ATÉ 360°	65

5.2 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM DESLOCAMENTO MAIOR QUE 360°	68
5.3 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM VALORES PUNTUAIS	71
5.4 ENSAIOS DE HISTERESE	73
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	81
6.1 HIPÓTESES PARA AS FONTES DE ERROS	81
6.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	83
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
7.1 CONCLUSÕES	87
7.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS	89
ANEXO A	93
PROGRAMA PRINCIPAL DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS DESENVOLVIDO EM C#	93

1 INTRODUÇÃO

A precisão de posicionamento de um feixe de LASER em relação ao componente é essencial para que se garanta a qualidade do processo e um resultado desejado em operação de corte e soldagem. A Figura 1.1 denota o crescimento das aplicações referente ao aumento da precisão dos sistemas robóticos.

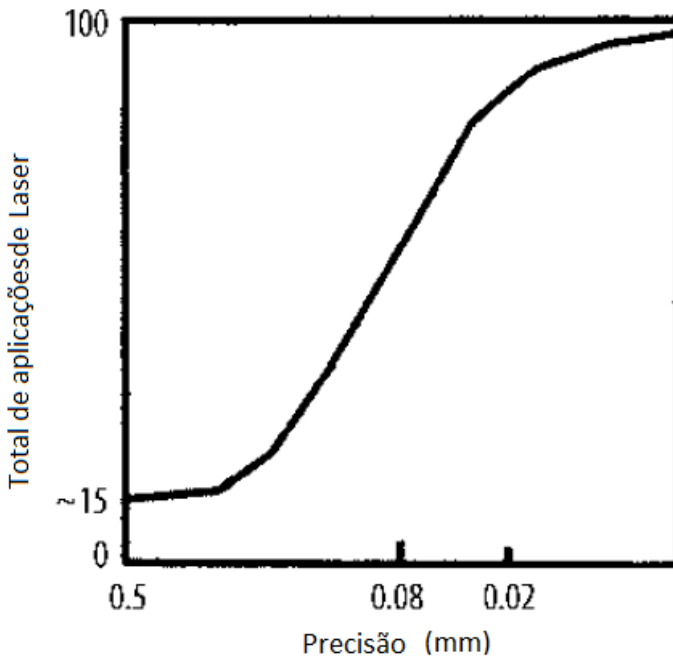


Figura 1.1 – Precisão de posicionadores versus aplicabilidade de processos LASER.

Fonte: Adaptado de STEEN e MAZUMDER (2010).

A precisão abordada na Figura 1.1 está relacionada principalmente ao sistema de posicionamento envolvido no processo. Estes sistemas são, geralmente, compostos pela integração de um sistema mecânico e servoacionamentos. Esta integração é também responsável pelo grau de precisão do sistema robótico em questão.

Estudos como os de LIRA e CARGILL (2003), tem como enfoque a análise de exatidão e, no caso dos autores em específico, incerteza de máquinas numericamente controladas.

O Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina desenvolveu alguns trabalhos relacionados à integração e acionamentos em parceria com o Laboratório de *Hardware* (LHW), como trabalhos envolvendo projeto e acionamento de torno de ultraprecisão e projetos envolvendo aquisição de dados. Assim como nas áreas citadas, este projeto envolve conhecimentos multidisciplinares, abrangendo eletrônica, elétrica, mecânica e aquisição e tratamento de dados.

Este trabalho visa a avaliação da precisão angular de um servoacionamento, tendo em vista as necessidades de desenvolvimento de sistemas de movimentação para processos LASER no âmbito do LMP.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Para que se possa desenvolver aplicações para processos de manufatura baseada em LASER, é necessário que se tenha sistemas de posicionamento adequados aos requisitos do processo e das operações por ela desenvolvidas. Dentre os sistemas de posicionamento mais utilizados estão os baseados em servoacionamentos.

De maneira geral, pode-se definir servoacionamentos por características como: alta dinâmica de torque, alta dinâmica de rotação, alto valor de torque máximo, elevada rigidez mecânica, alta capacidade térmica, larga faixa de controle de rotação, operação sem trepidação mesmo em baixas velocidades, alta precisão de posicionamento, versatilidade, baixo ruído, dentre outras. Sua definição vem de um sistema com um motor que, por meio de transdutor, é realimentado com dados de movimentação.

Uma característica fundamental que se deve dar atenção em processos de fabricação LASER, que envolvem resolução na ordem de centésimos de milímetro, é a precisão de posicionamento.

Nos últimos anos o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP), vem utilizando servoacionamentos da empresa WEG, compostos por servomotores SWA40 e o servocontrolador SCA06. A aplicação destes sistemas em máquinas de posicionamento para aplicações com LASER exige uma avaliação aprofundada de seu desempenho com o intuito de garantir que suas características venham de encontro dos requisitos das máquinas solicitadas.

No caso do servoacionamento WEG utilizado no LMP, a realimentação de posição é feita por um *resolver* montado diretamente ao eixo do motor.

Na pesquisa de NIREI *et al.* (2002), avaliou-se a influência da excentricidade de rotores de resolver para a exatidão de posicionamento por meio de elementos finitos. Na pesquisa em questão esta comparação se dará de forma prática com avaliação comparativa entre transdutores.

O tópico principal desta pesquisa consiste na a avaliação do *resolver* como sistema de medição para realimentação do sistema de controle do servoacionamento WEG.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é a avaliação da exatidão de posicionamento do servoacionamento baseado no servocontrolador SCA06 e o servomotor SWA 40, ambos da fabricante WEG.

O método de avaliação é baseado na adequação de uma bancada de ensaios onde é utilizado um *encoder* ótico incremental ROD 800 da fabricante Heidenhain, uma interface para condicionamento de sinais ID 1400 da linha DIADUR Heidenhain, um programa para a aquisição pelo computador desenvolvido em linguagem C#, e ainda a utilização do software Origin e Excel para o processamento dos dados a fim de se desenvolver tabelas e gráficos para posteriores análises.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para maior clareza, os objetivos específicos são listados abaixo:

- a) Adequar a bancada experimental;
- b) Desenvolver rotinas para os procedimentos experimentais;
- c) Realizar ensaios para coletar dados;
- d) Comparar os dados do sistema de avaliação com os do sistema avaliado;
- e) Avaliar as informações levantadas sobre a experimentação e comparação;
- f) Documentar a pesquisa.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 PROCESSO DE FABRICAÇÃO LASER

LASER é o acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. O primeiro LASER do mundo foi demonstrado por Maiman em 1960 que utilizou um cristal de rubi (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008, p. 3). STEEN e MAZUMDER (2010) afirmam que quando inventada, a tecnologia LASER foi descrita como uma solução à procura de um problema, mas o autor completa afirmando que em dias atuais a situação se alterou e se têm muitas aplicações para o LASER, como no caso das aplicações de potência, ópticas e processamento de materiais.

São várias as aplicações do LASER em processamento de materiais. Pode-se se citar como exemplo: corte, soldagem, tratamento de superfícies, ablação, conformação, dentre outros. Dentre estes destacam-se dois por sua vasta aplicação industrial: o corte e a soldagem.

2.1.1 Corte a LASER

O corte a LASER é um processo térmico bidimensional de remoção de material, no qual a remoção de material ocorre focando-se um feixe de LASER de alta intensidade sobre a superfície da peça. O feixe de LASER aquece a região de interesse e, como consequência funde, vaporiza ou produz à oxidação na região aquecida da peça. Um jato de gás auxiliar remove o material fundido e/ou oxidado da região aquecida e a frente de calor se estende por toda espessura criando uma frente de corte. Em consequência do deslocamento longitudinal do LASER, o material fundido e ou oxidado é expulso da frente de corte e se forma a fenda de corte (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008, p.144). READY e FARSON (2001 p. 425) complementam afirmando que o corte a LASER, que é o processo mais difundido dentre os processos LASER, é um método de separação da peça em segmentos nas geometrias desejadas.

São vários os métodos para a realização do processo de corte a LASER. Tais métodos podem envolver fusão, vaporização e ainda efeitos químicos utilizando-se de gases para auxílio. A Figura 2.1 lista os principais processos e indica os conceitos de remoção e a energia necessária para remover material em J/mm^3 .







Método	Conceito	Energia (J/mm ³)
Vaporização		40
Fusão		20
Fusão com queima		10
Quebra por estresse térmico		1
<i>Scribing</i>	 Picote	1
Corte a frio	 hν Fotons de alta energia ou multi fotons	100
Corte a Laser estabilizado por queima		5

Figura 2.1 – As diferentes formas de corte a LASER.

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

O objetivo desta revisão é uma abordagem geral para que se possam estabelecer relações entre variáveis do processo LASER como a velocidade e precisão de deslocamento, e a posterior abordagem sobre equipamentos de posicionamento. Tomar-se-á como estudo de caso o processo de corte por fusão para a determinação de um sistema de movimentação necessário a esta pesquisa.

No corte por fusão, um feixe de LASER se move relativo à peça seguindo um caminho preestabelecido (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008, p.152). No corte por fusão a LASER, o volume da fenda de corte é transformado principalmente para o estado fundido e é expulso da zona de corte por um jato de alta pressão de gás (inerte, nitrogênio ou ar – dependendo do material a ser cortado) (READY e FARSON 2001 p. 425).

Os procedimentos de modelagem para o corte por fusão e vários fenômenos como transferência de calor, fluxo de fluido e dinâmica dos gases devem ser considerados (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008, p.152). STEEN e MAZUMDER (2010, p.157) afirmam que o processo pode ser semiquantitativamente modelado, assumindo que toda a energia absorvida é removida antes que alguma condução significativa ocorra. Os autores concluem citando que tal suposição não é tão errada

tendo-se que a ZAC (zona afetada pelo calor) em bons cortes por este método, raramente passa de alguns micrometros. Assim obtém-se a Equação 2.1:

$$\eta P = wtV\rho (C_p\Delta T + L_f + m'L_v) \quad (2.1)$$

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

Onde P é a energia incidente (W), w é a largura média de corte (m), t é a espessura da peça (m), V é a velocidade de corte (m/s), m' é a fração de material fundido que foi vaporizado, L_f é o calor latente de fusão (J/kg), L_v é o calor latente de vaporização (J/kg), ΔT é variação de temperatura que causa a fusão (K), η é o coeficiente de acoplamento e ρ é a densidade do material da peça (kg/m³). Com a reorganização da equação tem-se a Equação 2.2 (STEEN e MAZUMDER, 2010, p.157):

$$(P/tV) = (w\rho/\eta)(C_p\Delta T + L_f + m'L_v) = f(\text{material}) \quad (2.2)$$

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

Exceto os valores de η e w que são funções de diâmetro de feixe e velocidade, as outras variáveis são constantes relacionadas ao material. Assim, é esperado que o agrupamento (P/tV) seja constante para um dado material e um dado feixe (STEEN e MAZUMDER, 2010, p.157).

Por meio deste modelo, STEEN e MAZUMDER (2010, p. 159) realizaram uma coletânea de valores na Tabela 2.1 baseados em experimentos de várias fontes.

2.1.2 Soldagem a LASER

A tecnologia LASER proporciona a possibilidade soldar componentes.

O feixe de LASER é uma das fontes de maior densidade de energia. Sua densidade de energia é similar à do processo de feixe de elétrons (STEEN e MAZUMDER, 2010, p. 199). A Tabela 2.3 correlaciona a densidade de energia e os perfis da zona de fusão de cada processo.

Tabela 2.1 – Valores de energia para processo de corte a LASER de feixe contínuo CO₂ obtidos experimentalmente.

Material	Valor mais baixo de P/Vt (J/mm ²)	Valor mais alto P/Vt (J/mm ²)	Média P/Vt (J/mm ²)
Aço macio + O ₂	4	13	5,7
Aço macio + N ₂	7	22	10
Aço inoxidável + O ₂	3	10	5
Aço inoxidável + Ar	8	20	13
Titânio + O ₂	1	5	3
Titânio+Ar	11	18	14
Alumínio + O ₂			14
Cobre + O ₂			30
Latão + O ₂			22
Zircônio + O ₂			1,7
Chapa Acrílica	1	3	1,2
Polietileno	2,7	8	5
Polipropileno	1,7	6,2	3
Poliestireno	1,6	3,5	2,5
Náilon	1,5	5	2,5
ABS	1,4	4	2,3
Policarboneto	1,4	4	2,3
PVC	1	2,5	2
Formica	51	85	71
Resina fenólica			2,7
Fibra de vidro (epóxi)			3,2
Madeira: pinos (amarelo)			23
Carvalho			26
Mogno			24
Aglomerado	45	76	59
MDF			50
Compensado			23
Laminada	20	65	31
Vidro			20
Alumina	15	25	20
Sílica			120
Telha cerâmica			19
Couro			2,5
Papel cartão	0,2	1,7	0,5
Carpê (automóvel)			0,5
Fibrocimento			5

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

Tabela 2.2 – Correlação das densidades de potência e perfis de zona fundida de diferentes procedimentos de soldagem.

Processo	Intensidade da fonte de calor (W/m ²)	Perfil da zona fundida
Arco de soldagem com fluxo de proteção	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Arco de soldagem com gás de proteção	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	
Laser ou feixe de elétrons	$10^{10} - 10^{12}$	

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

O LASER e o feixe de elétrons são os processos de maior densidade de energia e, conseqüentemente, seu perfil de zona fundida tem a característica de possuir alta penetração e ser estreito. Tais características fazem com que o processo de soldagem LASER e por feixe de elétrons tenham propriedades especiais.

A soldagem a LASER vem ganhando espaço e é usada quando é essencial se limitar o tamanho da ZAC, reduzir-se a rugosidade da superfície soldada e eliminar efeitos mecânicos (READY e FARSON 2001 p. 307).

O processo LASER permite um alto nível de automação, o que fornece vantagens econômicas no ambiente típico industrial. Apesar de o procedimento LASER parecer simples, ele apresenta grandes desafios para se produzir soldas sem defeitos em altas velocidades e com condições reproduzíveis (DAHOTRE e HARIMKAR, 2008, p.412).

A Tabela 2.3 retrata uma comparação entre os processos de soldagem mais utilizados incluindo LASER.

Para o procedimento por LASER a penetração da soldagem é um ponto crítico que deve ser controlado durante o procedimento. A penetração é influenciada por muitos fatores, como tipo de LASER, potência, velocidade de soldagem, dentre outros.

Tabela 2.3 – Comparação entre processos de soldagem. (✓ Pontos positivos, × Pontos negativos)

Qualidade	LASER	Feixe de elétrons	TIG	Resistência	Ultrassônica
Taxa	✓	✓	x	✓	x
Baixo aporte térmico	✓	✓	x	✓	✓
ZAC estreita	✓	✓	x		✓
Aparência do cordão de solda	✓	✓	x		✓
Facilidade de fixação de peça	✓	x	x		
Confiabilidade do equipamento	✓		✓	✓	
Alta penetração	x	✓		x	
Soldagem em ar	✓	x		✓	
Soldagem de materiais magnéticos	✓	x	✓	✓	✓
Soldagem de materiais reflexivos	x	✓	✓	✓	✓
Materiais sensíveis ao calor	✓	✓	x	x	✓
Acesso a junta	✓			x	x
Meio ambiente, som e fumaça	✓	✓	x	x	x
Custo do equipamento	x	x	✓		
Custo de operação	-	-	-	-	

Fonte: STEEN e MAZUMDER (2010).

STEEN e MAZUMDER (2010, p.209) definem que os dois principais problemas na soldagem são: a falta de penetração da solda e o vazamento do material liquefeito da região a ser unida. Os autores completam correlacionando a velocidade de soldagem e a potência do processo. A máxima velocidade de soldagem para uma dada espessura cresce com o aumento da potência. A Figura 2.2 mostra como e quando ocorre a penetração e vazamento para dados de potência e velocidade de soldagem.

Assim, conclui-se que tanto a potência quanto a velocidade de soldagem são limitadores de produtividade entre si, pois um limita o outro quanto à utilização de sua capacidade máxima. Por exemplo, no caso de um equipamento de posicionamento de baixa velocidade, um LASER de alta potência não poderia ser utilizado em sua capacidade máxima, pois o resultado da soldagem, em termos de penetração, seria inadequado, podendo haver vazamento do material liquefeito.

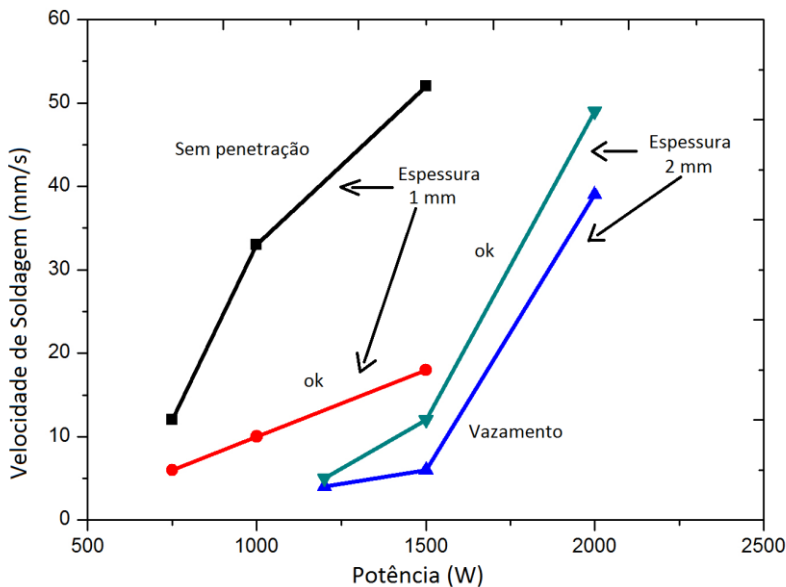


Figura 2.2 – Velocidade de soldagem vs. potência para o material Ti-6Al-4V
Fonte : STEEN e MAZUMDER (2010).

2.2 SISTEMAS DE POSICIONAMENTO

Um dos principais objetivos do desenvolvimento de máquinas-ferramenta é a fabricação de peças com características que atendam às especificações de um projeto. Para melhor entendimento das variáveis que compõe o resultado de uma peça, a Figura 2.3 retrata uma série de fatores a serem levados em consideração.

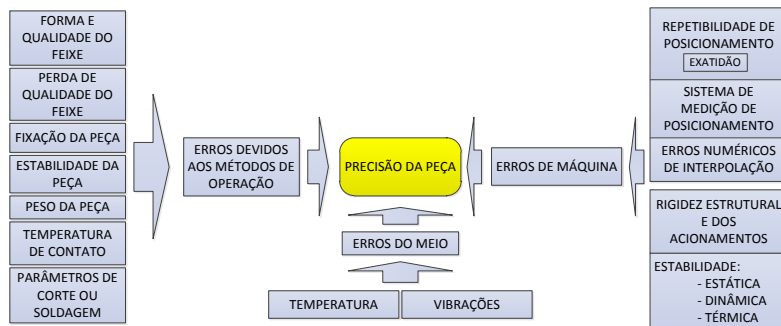


Figura 2.3 – Relações que envolvem a qualidade de uma peça usinada.
Fonte – Adaptado de Stoeterau (1999)

A Figura 2.3 retrata as relações envolvidas em processos principalmente convencionais. O processo LASER, como processo de fabricação, é considerado um processo não-convencional, assim deve-se ter atenção a alguns pontos como o fato de não existir: geometria de ferramenta, desgaste de ferramenta, contato; dentre outros parâmetros encontrados em processos convencionais. Contudo, a Figura 2.3 apresenta várias relações de grande importância para processos LASER como: repetibilidade de posicionamento, sistema de medição de posicionamento, erros numéricos de interpolação, estabilidade, dentre outros.

Posicionar, em aplicações LASER, abrange controlar e direcionar o foco de um feixe de LASER, nas coordenadas de um local específico numa peça (WEBB e JONES, 2004).

Usualmente um movimento de rotação é convertido para translação por meio de fuso de esferas e sistemas com correias dentadas. O movimento de rotação é obtido por um acionamento eletromecânico, (motor servocontrolado). (WEBB e JONES, 2004). A empresa LASAG emprega motores de translação de dois graus de liberdade cartesianos para movimentar o componente em relação ao LASER.

Um posicionador utiliza um acionamento, como um motor, para movimentar um fuso que controla a posição. O movimento é controlado por um sistema de guias (READY e FARSON, 2001).

Quatro métodos de guiagem garantem a exatidão de movimento das plataformas móveis onde componentes são montados. Estes métodos incluem: sistema com guia por cauda de andorinha, guias lineares de esferas recirculantes, guias prismáticas com roletes e guias flexíveis (READY e FARSON, 2001). A Tabela 2.4 estabelece uma comparação entre os diferentes métodos de guiagem.

Ready e Farson (2001) apresentam ainda informações sobre características de sistemas comerciais como: resolução, faixa de operação e velocidade, estabelecendo relações entre valores típicos, destas variáveis. Estas relações são apresentadas nas Tabelas 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8, e são utilizadas para que se possa estabelecer comparativos entre dados coletados durante a pesquisa e características típicas de equipamentos para aplicações LASER.

Tabela 2.4 – Comparação dos diferentes métodos de movimentação.

Método	Sistema guia cauda de andorinha	guias lineares de esferas recirculantes	guias prismáticas com roletes	guias flexíveis
Preço	Baixo	Moderado	Alto	Alto
Desgaste	Alto	Baixo	Baixo	Zero
Deslocamento	Grande	Moderado	Moderado	Pequeno
Capacidade de carga	Alto	Baixo	Alto	Alto
Precisão	Moderado	Alto	Muito alto	Muito alto

Fonte - (READY e FARSON, 2001).

Tabela 2.5 - Resoluções típicas para determinadas faixas de operações em sistemas translativos empregados em aplicações LASER.

Deslocamento (mm)	Resolução (μm)
20	0,1
100	1
250	10
1000	100

Fonte - (READY e FARSON, 2001).

Tabela 2.6 - Resoluções típicas para determinadas faixas de operações em sistemas rotativos.

Deslocamento (graus)	Resolução (graus)
45	$10^{-3} - 10^{-2}$

Fonte - (READY e FARSON, 2001).

Tabela 2.7 - Relação entre resolução e velocidade de sistemas translativos.

Resolução (μm)	Velocidade máxima (mm/s)
0,1	0,02
1	2
5	10
10	20

Fonte - (READY e FARSON, 2001).

Tabela 2.8 - Relação entre resolução e velocidade de sistemas rotativos.

Resolução (graus)	Velocidade máxima (graus)
0,001	2
0,01	20
0,05	100

Fonte - (READY e FARSON, 2001).

2.3 CONTROLE

O controle, como uma ação inerente a processos, corresponde ao meio a se utilizar para se atingir um valor determinado. Pode-se dividir de forma geral o controle em dois métodos primordiais: controle de malha aberta e controle de malha fechada.

Os sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema. Isto quer dizer que, em um sistema de controle de malha aberta o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada (OGATA, 2011, p. 7).

A Figura 2.4 ilustra um equipamento ou processo comandado em malha aberta.

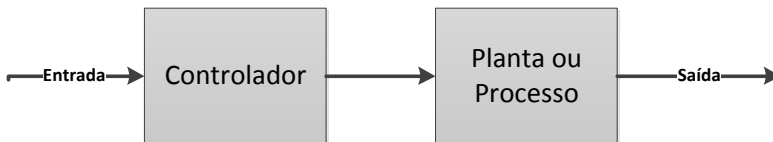


Figura 2.4 – Equipamento ou processo de comando (controle em malha aberta).
Fonte: OGATA (1982).

Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas ou integrais), realimenta o controlador de modo a minimizar o erro e ajustar a saída do sistema ao valor desejado (OGATA, 2011, p.7).

A Figura 2.5 retrata o sistema de controle com realimentação. A diferença em relação ao sistema de controle em malha aberta se encontra

na realimentação do controlador com uma informação relacionada à resposta gerada pelo acionamento.

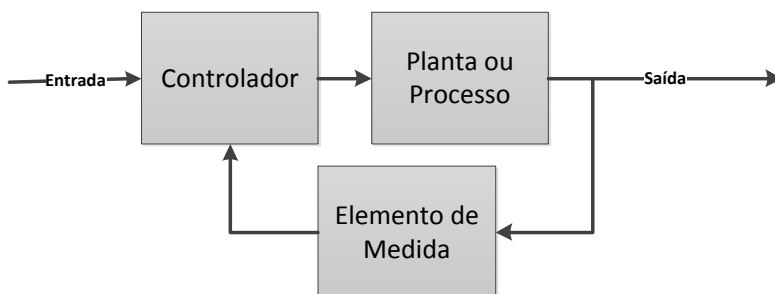


Figura 2.5 – Planta do sistema de controle com realimentação (controle em malha fechada).

Fonte: OGATA (1982).

Apesar de existirem uma série de técnicas de controle de sistemas, este trabalho se limitará a tratar da técnica de controle PID, por ser propriedade do servoacionamento empregado.

2.3.1 Controle PID

De acordo com RICO *apud* SUNADA (2007), o controlador Proporcional Integral Derivativo, ou simplesmente PID, é o tipo de controlador de estrutura fixa mais utilizado nas aplicações industriais, tanto no Brasil como no mundo. ANG, CHONG e LI (2005) afirmam que apesar de ter-se desenvolvido uma série de novas técnicas de controle, mais de 90% dos controladores são implementados com algoritmos PID.

SUNADA (2007) completa com justificativas para a grande difusão de tal técnica, citando dentre os fatores:

- controle simples com parâmetros ajustáveis;
- realimentação incorporada;
- número reduzido de parâmetros ajustáveis dependendo da implementação;
- permite eliminação de *offsets* por meio da ação integral;
- pode prever ações futuras por meio da ação derivativa e ainda pode tratar de saturações;
- permite uma variedade de métodos para ajuste adequado, sendo Ziegler e Nichols o mais conhecido.

O domínio de tempo constante otimizado de um controlador PID para um processo SISO, *Single input single output* é expresso no domínio de Laplace, como nas Equações 2.3 e 2.4. (O'DWYER, 2006):

$$U(s) = G_c(s)E(s) \quad (2.3)$$

com

$$G_c(s) = K_c(1 + 1/T_i s + T_d s) \quad (2.4)$$

Onde K_c é o ganho proporcional, $T_i s$ é a constante integral de tempo e $T_d s$ é a constante derivativa de tempo. Contudo o controle PID pode ser analisado de forma separada, dividindo-se as ações proporcionais, integral e derivativa.

YU (2006) define que a ação proporcional ajusta a saída do controlador de acordo com o tamanho do erro, a ação integral pode eliminar o *offset* de estado estacionário e que as tendências futuras podem ser antecipadas pela ação derivativa. Tais definições remetem a características de cada ganho que permitem a visualização da influência de tais isoladamente como na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – A influência independente dos ganhos P, I e 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: (ANG, CHONG e LI, 2005).

A Figura 2.6 retrata, de forma gráfica a influência dos ganhos de controle no resultado do sistema.

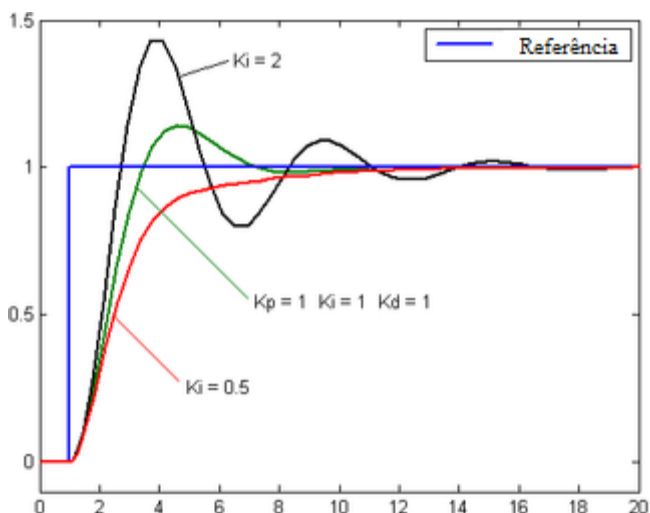


Figura 2.6 – Gráfico de influência dos ganhos de controle PID.

2.5 RESOLVER E ENCODER

Dentro da categoria de sensores para o desenvolvimento de sistemas realimentados, pode-se considerar o esquema representado na Figura 2.6, onde estão classificados alguns dos sensores utilizados para a tarefa de medição de posições.

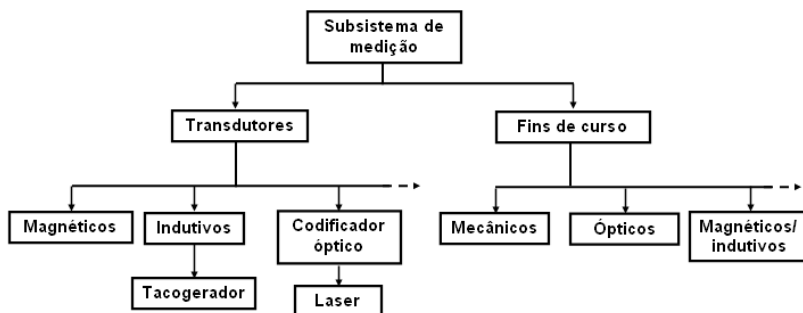


Figura 2.7 – Classificação de sensores para realimentação de máquinas.
Fonte: BERTRÁN (2009).

Nesta pesquisa trabalhou-se com dois tipos de transdutores: *resolver* (magnético) e *encoder* (codificador óptico).

Resolvers e *encoders* são transdutores que medem a variação de posição angular. No caso do *resolver* o efeito é magnético já o *encoder* funciona baseado em métodos fotoelétricos.

2.5.1 Resolver

A maioria dos transdutores eletromagnéticos de posição, como o é o caso do *Resolver*, são baseados na tecnologia da indução. As induções funcionam por meio da excitação do enrolamento primário com uma contínua alteração na tensão e induzindo uma tensão no enrolamento secundário pela alteração do campo magnético do enrolamento primário. Estas transformações são sempre procedidas em corrente alternada. Os transdutores relacionados são indutivos por natureza e trabalham com enrolamentos de bobinas. Assim, com a variação da união entre a bobina primária para com a bobina secundária, um sinal analógico é gerado e representa o deslocamento. Esta variação na união entre as bobinas é realizada por meio da movimentação entre as bobinas e o núcleo que induzem um fluxo entre as bobinas (WEBSTER, 1999, p.223).

Considerando que a saída de um *resolver* é formada por dois canais, tendo-se A representando a saída de seno, e B a saída de cosseno. Tendo-se a Figura 2.7, se o rotor (R1-R3) é excitado por uma tensão nominal de entrada como da Figura 2.8, a amplitude na saída do estator (S1-S3) será proporcional ao seno do ângulo θ deslocado pelo eixo do rotor, e a amplitude de saída do segundo estator (S2-S4) será proporcional ao cosseno de θ . A Figura 2.9 ilustra um gráfico com um exemplo de sinal de saída de rotação de um *resolver*.

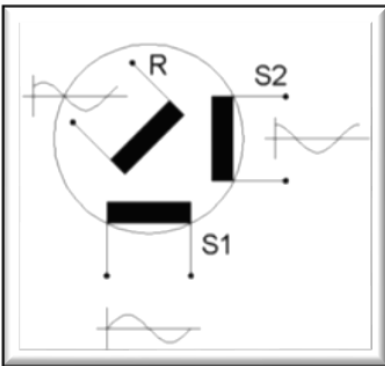


Figura 2.8 – Representação esquemática de um *resolver* ilustrando a excitação do rotor e a relação com os estatores.

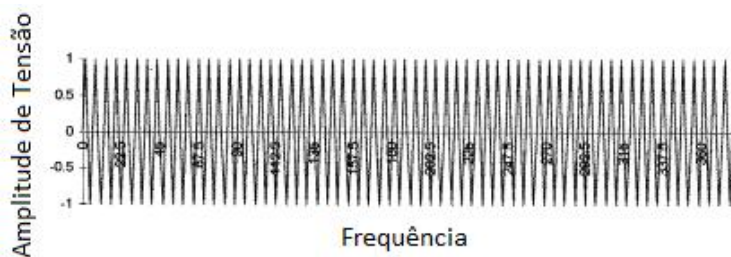


Figura 2.9 – Exemplo de tensão nominal de entrada aplicada ao rotor para a excitação da bobina.

Fonte: WEBSTER (1999).

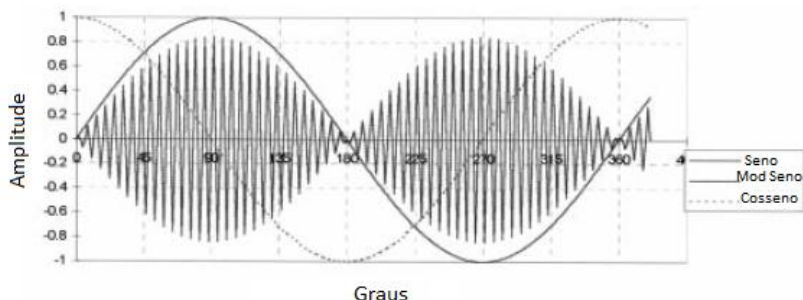


Figura 2.10 – Ilustração da saída dos canais do *resolver*, seno e cosseno, em relação a rotação.

Fonte: WEBSTER (1999).

Para que se possa obter o valor do ângulo Θ , é necessário que com os valores obtidos mostrados anteriormente (sinal de entrada, seno e cosseno de Θ) se calcule a seguinte equação:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{E_x \sin \Theta}{E_x \cos \Theta}\right) \quad (2.5)$$

Com o resultado desta equação pode-se obter a posição absoluta do *resolver* durante as medições.

Fabricantes de máquinas-ferramenta e robôs têm utilizado em larga escala *resolvers* como forma de se conseguir informações angulares e rotacionais precisas (WILSON, 2005, p.387)

Apesar dos *resolvers* serem, em comparação com *encoders* ópticos, de difícil implementação, estão ganhando espaço na indústria, devido a características como resistência, confiabilidade dentre outras.

Resolvers são frequentemente utilizados em conjunto com motores, e devido à similaridade entre as concepções, suas resistências às condições ambientais são bastante parecidas. *Resolvers* são ideais para aplicações onde poeira e líquidos transportados pelo ar poderiam afetar os efeitos ópticos de *encoders* ópticos. *Resolvers* se sobressaem em aplicações como máquinas de controle numérico, bobinadoras, prensas e mesas de posicionamento. Além disto, outro fator de importância sobre *resolvers* é sua resitência a impactos e vibrações, e a confiabilidade sobre sua operação mesmo atuando em sistemas com movimentação do transdutor (WEBSTER, 1999, p. 230).

A resolução teórica de um *resolver* é infinita, sendo limitada pela adequação do seu modo de operação, *multispeed* x2, x3 e etc, e por sua eletrônica, que definirá qual a resolução do sistema (WEBSTER, 1999, p.231).

A definição do modo de operação *multispeed* trata de quantos graus uma senóide descreverá, ou seja, quantas senóides haverá num intervalo de 360° . Se um *resolver* está operando em modo x2, então pode-se afirmar que a cada 180° haverá uma senóide completa, como ilustrado na Figura 2.10 (WEBSTER, 1999, p.230).

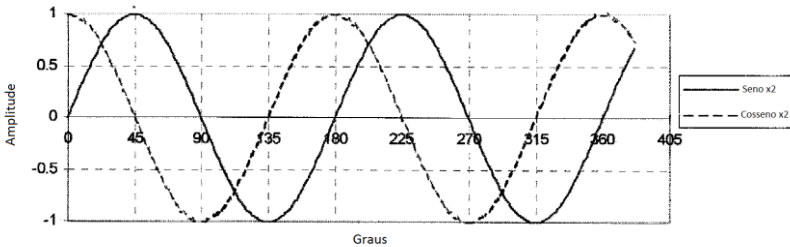


Figura 2.11 – Exemplo de saída de *resolver* operando em dois ciclos por rotação.

Fonte: WEBSTER (1999).

2.5.2 Encoder Óptico Incremental

Devido ao seu fácil manuseio e operação em relação à outras soluções para medições rotacionais, o *encoder* incremental óptico é amplamente utilizado em uma série de operações industriais.

Seu funcionamento é dado por um sensor fotoelétrico que é posicionado à frente de uma fonte de luz. Entre a fonte de luz e o sensor é posicionado um disco codificado com sessões opacas e transparentes em sequência alternada, de forma que a sessão transparente permite que o sensor seja excitado pela luz e a sessão opaca bloqueia. Assim, tem-se a saída de sinais do *encoder* que é transmitida por uma placa eletrônica contida no *encoder* para a comunicação com dispositivo externo. A quantidade de sequências de sessões transparente e opaco presentes no disco determina a resolução do *encoder*, que é dada em pulsos por volta. Geralmente as faixas de resoluções dos *encoders* incrementais ópticos são entre 100 a 65000 pulsos por volta (WILSON, 2005). A Figura 2.11 mostra a estrutura física do *encoder* tanto da sequência codificada, Figura 2.11 b) quanto da montagem do dispositivo, Figura 2.11 a).

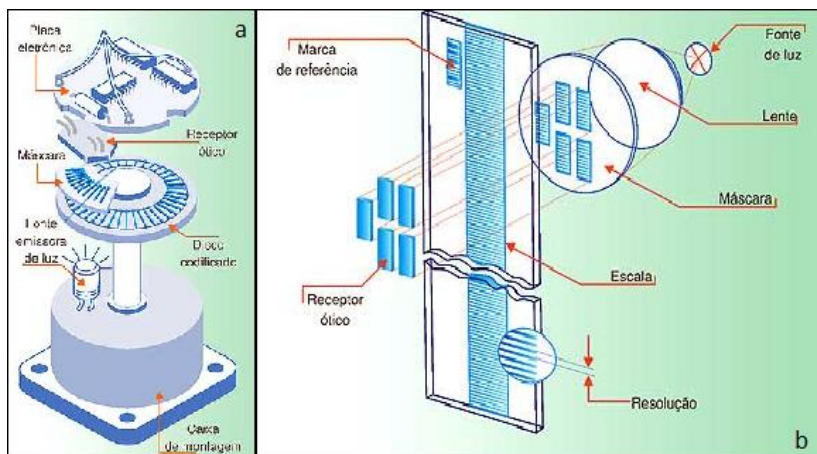


Figura 2.12 – b) Sequência codificada demonstrando as sessões transparentes e opacas intercaladas; a) Estrutura física de um *encoder* óptico incremental comum.

A maioria dos *encoders* incrementais apresentam ainda um segundo conjunto de luz e sensor com defasagem, geralmente, de 90° da primeira para que se possa determinar além da variação de posição, a direção desta variação. Por fim, tem-se ainda, em muitos casos, um terceiro conjunto com apenas uma sessão transparente, onde é possível se ter um canal de referência ou posição zero.

A desvantagem básica dos *encoders* incrementais é a necessidade de um contador externo para a determinação de ângulos absolutos com uma dada rotação. Além disto, se acontecer uma queda de energia, ou

ainda ocorrer uma perda informação devido a ruídos ou sujeira no disco, o resultado da saída trará erros (WILSON, 2005, p.386).

2.5.3 Encoder Óptico Absoluto

No caso do *encoder* absoluto, não se necessita de contador externo nem há problema com interrupções durante a aquisição de informações. O *encoder* absoluto fornece apenas uma informação para cada posição.

O *encoder* absoluto apresenta um disco codificado em n canais, sendo que cada canal apresenta uma série de intersecções opacas e transparentes. Assim, formando uma única codificação binária para cada posição, com a contagem máxima de $2^n - 1$. A Figura 2.12 ilustra a diferença entre os discos de um *encoder* incremental e *encoder* absoluto.

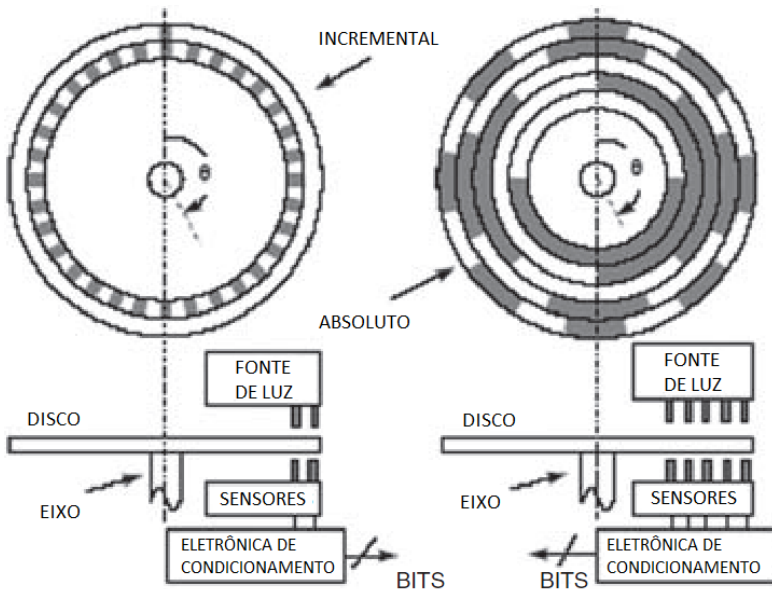


Figura 2.13 – Representação esquemática de *encoders* evidenciando as diferenças principais entre *encoder* incremental e absoluto.

Fonte – WILSON (2005).

A palavra digital formada na saída do *encoder* absoluto é normalmente implementada num formato chamado: código Gray. A sequência binária clássica pode ser usada, contudo esta pode causar grandes erros com apenas a falha de leitura de um bit. Já a sequência

imposta no código Gray não apresenta este problema, pois ela garante que durante a mudança de uma posição para outra, seja qual for a posição do *encoder*, apenas um bit será alterado, assim, se houver uma falha de leitura de bit, o erro será amenizado neste caso. A Figura 2.13 mostra de forma esquemática a diferença entre a sequência binária e o código de Gray. Com a evolução na sequência, o código Gray altera um bit por vez sendo que o código binário pode alterar tanto apenas um quanto mais de um.

<i>Decimal</i>	<i>Binário</i>	<i>Gray</i>
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Figura 2.14 – Sequência binária e de Gray.

Em comparação com o *encoder* incremental, o *encoder* absoluto apresenta a desvantagem de ter uma maior limitação de resolução e, restrições de custos.

3 ESTUDO DO OBJETO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada de ensaios utilizada na pesquisa consiste num sistema de posicionamento de apenas um eixo, acionado por meio de servoacionamento, tendo uma mesa montada sobre um par de guias translativas com esferas recirculantes, as quais vêm montadas sobre uma base de ferro fundido. A transmissão de movimento longitudinal é efetuada por um fuso de esferas. Para a comparação da posição fornecida pelo servomotor empregou-se um transdutor de posição angular caracterizado por um *encoder* óptico incremental Heidenhain ROD 800 acoplado a um indicador digital Heidenhain Diadur ID1400, com a função de condicionamento de sinais. O sistema de condicionamento de sinais é ligado a um computador para aquisição de dados, por meio de software escrito em C#, e processamento dos dados para posterior interpretação dos dados.

A Figura 3.1 mostra o diagrama funcional da bancada experimental, que será apresentada neste capítulo.

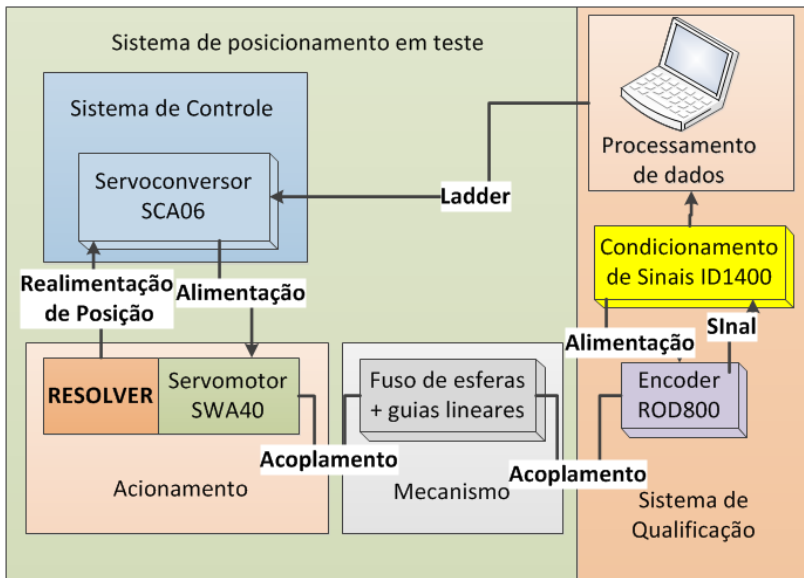


Figura 3.1 – Diagrama funcional da bancada experimental.

Para melhor compreensão da composição da bancada, serão apresentados os componentes divididos em duas partes: Sistema de posicionamento em teste (sistema de controle, acionamento e mecanismo) e Sistema de qualificação (sistema de aquisição e condicionamento de sinais).

3.1.1 Mecanismo

A bancada de ensaios utilizada na pesquisa consiste em sistema mecânico fuso com esferas recirculantes biapoiado em guias lineares de esferas recirculantes, conforme a Figura 3.2.

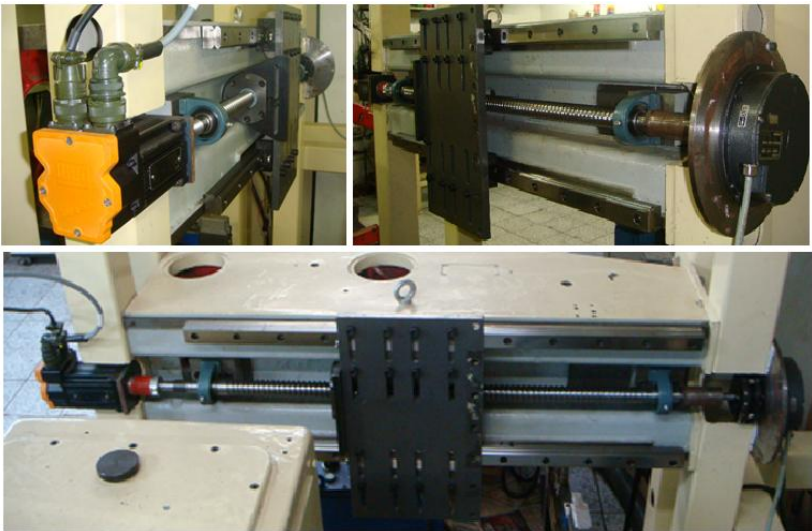


Figura 3.2 –Bancada com, suporte de ferro fundido cinzento com fuso de esferas recirculantes e guias lineares de esferas recirculantes montadas. Motor e *encoder* acoplados as pontas do fuso.

As especificações das guias lineares e fuso de esferas recirculantes, segundo o fabricante NSK, seguem na Tabela 3.1.

O sistema mecânico da Figura 3.2 está fixo numa estrutura metálica projetada por CASARIM (2007), conforme Figura 3.3, para uma bancada de roletagem profunda. A estrutura é fabricada de tubos quadrados de aço para o suporte do sistema de posicionamento longitudinal e uma estrutura complementar suporta o cabeçote para a rotação do componente.

Tabela 3.1 – Especificações do sistema mecânico de posicionamento.

Variável	Valor	Unidade
Comprimento do fuso	1030	mm
Diâmetro do fuso	32	mm
Passo do fuso	8	mm
Massa do Fuso	7,9	Kg
Massa da Guia Linear	14,4	Kg
Comprimento da Guia Linear	1000	mm

Fonte: MOTION & CONTROL NSK (2009).

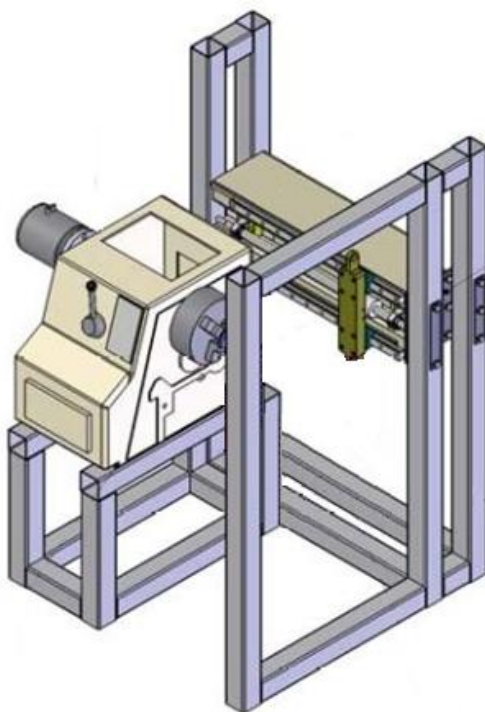


Figura 3.3 – Representação esquemática da bancada explicitando o sistema de movimentação longitudinal.

Nesta estrutura mecânica foi adaptado o acionamento WEG e o sistema de aquisição de dados. Para esta adaptação foi necessário um procedimento para alinhamento dos eixos, tanto do servomotor SWA 40

quanto do *encoder* ROD 800. O procedimento utilizado para ambos os dispositivos foi o mesmo. Foram fabricados acoplamentos rígidos (camisas), em uma só peça, onde os contatos eixo-camisa apresentam a mínima folga possível para, ainda, serem deslizantes e não apresentarem batimento. Este procedimento busca garantir o menor desalinhamento possível entre os eixos a fim de se reduzir os erros de medição.

Conforme a Figura 3.4, (1) alinham-se todas as peças do conjunto; (2) efetua-se o encaixe dos eixos na camisa e fixa-se o suporte do dispositivo, seja ele o motor ou o *encoder*, na estrutura mecânica do equipamento; (3) remove-se o motor ou *encoder* do suporte e retira-se a camisa; (4) alinham-se as partes, acoplamento flexível, motor ou *encoder* e eixo do fuso de esferas; (5) as partes são fixadas.

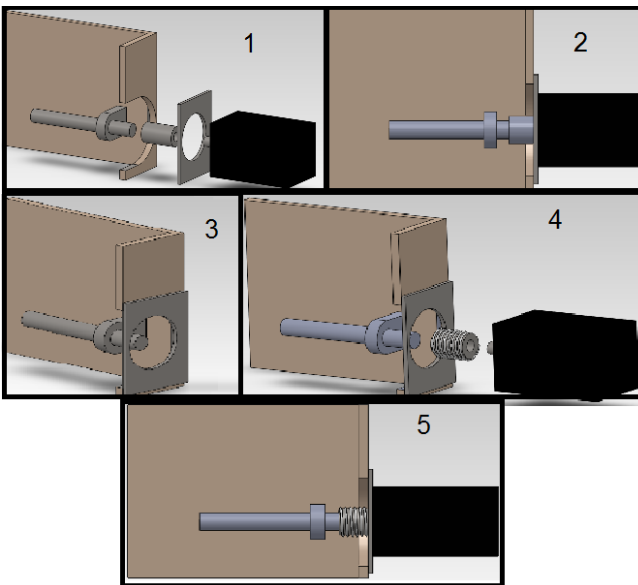


Figura 3.4 – Sequência para alinhamento e acoplamento dos dispositivos.

Após a montagem final dos dispositivos na estrutura mecânica, utilizou-se um relógio comparador para se verificar os desalinhamentos em ambos os acoplamentos montados.

3.1.2 Acionamento

O sistema de acionamento é composto do servoconversor WEG SCA06 e servomotor WEG SWA40.

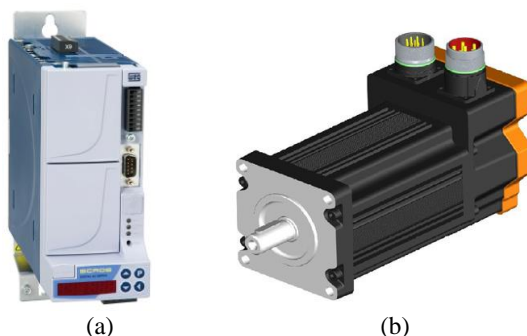


Figura 3.5 – (a) Servoconversor WEG SCA06, (b) Servomotor WEG SWA40

O servoconversor WEG SCA06 (Figura 3.5) é um servoconversor de alto desempenho que permite controle em malha fechada por meio de realimentação de *resolver*. Para a operação deste servoconversor, pode-se separar a etapa de *set up* em duas: a parametrização e a programação, ou controle. A parametrização tem como função a definição de parâmetros, configurações, análise de histórico de acontecimentos dentre outras funções. Por meio da parametrização pode-se definir, por exemplo, modo de operação, ganhos PID de corrente e velocidade entre outros, e além de se visualizar o acontecimento de falhas (WEG, 2011).

Nesta pesquisa o controle de movimento do servomotor WEG SWA40 é feito via *software Ladder* integrado ao servoconversor WEG SCA06, e comandado por botões conectados às portas de entrada digital contidas no servoconversor. A programação em Ladder foi desenvolvida utilizando um software proprietário do fabricante, o WLP, que permite programação por meio de linguagem gráfica, com textos, baseada em blocos (WEG, 2011).

Com o software WLP pode-se programar variáveis como posição, velocidade, aceleração, *jerk*, definindo até mesmo padrões e curvas para tais variáveis. Além disso, por meio de comandos de CLP, pode-se controlar variáveis como temporização, contador incremental, PID e filtros. Tais variáveis estão inclusas na malha de controle do servoacionamento, ou seja, os comandos configurados no programa Ladder serão controlados em malha fechada. A Figura 3.6 ilustra uma imagem do software desenvolvido em *Ladder* no programa WLP.

Utilizando-se o método para o controle, observou-se que o sistema apresentava vibrações e ruídos durante sua movimentação. Assim fez-se necessário o ajuste dos ganhos de controle PID, para que

os deslocamentos, durante o experimento, apresentassem baixo ruído e movimentação suave.

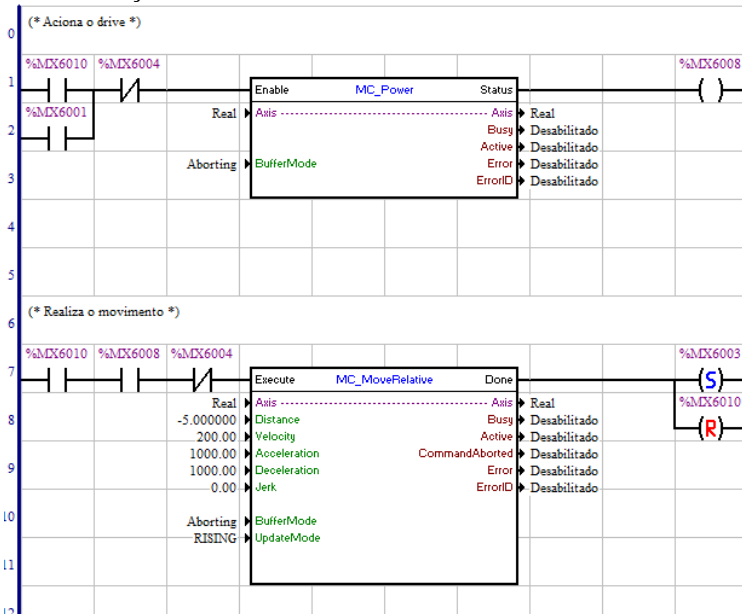


Figura 3.6 – Exemplo de código em diagrama de blocos Ladder desenvolvido no ambiente WLP.

No servoacionamento há opções para o ajuste dos ganhos: *autotuning*, modelagem por método de Ziegler-Nichols e método de tentativa e erro. No caso desta pesquisa, aplicou-se o *autotuning* do próprio acionamento WEG, contudo o resultado não foi satisfatório. Para a utilização do método de Ziegler-Nichols fazia-se necessária a modelagem da planta de controle do sistema, devido à inviabilidade deste procedimento, e tendo-se que é um método que não garante um resultado satisfatório, utilizou-se o método de tentativa e erro seguindo as referências e sugestões para cada parâmetro. Este procedimento teve um resultado satisfatório, eliminando ruídos e vibrações no sistema, que anteriormente haviam sido verificadas.

3.1.3 Hardware de Aquisição e Condicionamento de Sinais

O sistema de aquisição de dados está dividido em *hardware* e *software*.

A parte relacionada ao *hardware* é constituída principalmente por dois dispositivos: transdutor angular e o sistema de condicionamento de sinais e comunicação com computador.

Para a função de transdutor angular utilizou-se o *Encoder* Incremental Angular Heidenhain ROD 800 (Figura 3.7). O *encoder* tem a resolução básica de 25920 pulsos por rotação. A rotação do eixo gera um sinal elétrico alternado, que se aproxima da forma de senóide, na saída do *encoder*, na forma de uma fonte de corrente de $11\mu\text{App}$. Este sinal é transmitido para o sistema de condicionamento de sinais, onde é subdividido em n parcelas, sendo n um número seleccionável pela interpolação do sinal de saída do *encoder*, como exemplificado na Figura 3.9. Esta operação de subdivisão do sinal permite um aumento na resolução percebida na saída do sistema. Tendo-se o sinal subdividido e em forma de tensão, o mesmo é transformado em onda quadrada pela utilização de comparadores Schmitt-triggers, e por fim, o sinal é ajustado à faixa TTL de tensão digital com a utilização de um inversor TTL, Figura 3.8.



Figura 3.7 – *Encoder* incremental da série ROD 800
Fonte: HEIDENHAIN (1990).



Figura 3.8 – Condicionamento de sinal do ROD 800

A saída de sinais do *encoder* é conectada ao sistema de condicionamento de sinais (Indicador Digital Universal Diadur ID1400), que é um dispositivo de aplicação universal. Pode ser utilizado em máquinas operatrizes tanto em sistemas de medição. Nesta

pesquisa, sua função foi a de receber o sinal do *encoder*, efetuar a subdivisão dos sinais senoidais para aumento da resolução do sistema, digitalizar o sinal e comunicá-lo ao computador para processamento posterior.

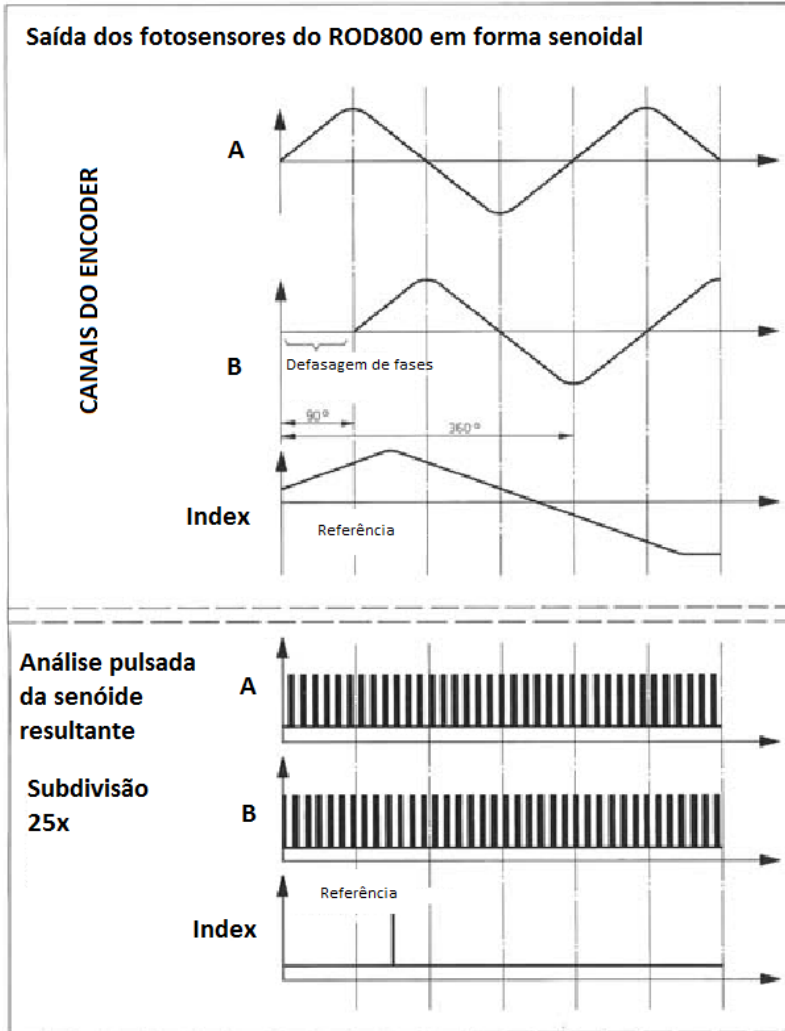


Figura 3.9 – Subdivisão do sinal senoidal por modulação pulsada na saída do *encoder*.

Fonte: HEIDENHAIN (1990).

A comunicação com o computador é feita de forma serial através de uma conexão RS-232, onde são transmitidas as informações de posição do ROD 800 a cada 50ms ou seja a uma frequência de 20Hz. Esta frequência de amostragem é aplicada apenas para a análise de variação estáticas de posição, ou seja, não há dependência entre o resultado da aquisição e o tempo. A taxa de frequência de amostragem na comunicação descrita pelo ID1400 não é crítica, contudo para aplicações de análise de dados dinâmica, como por exemplo em análises de velocidade e aceleração, esta taxa seria crítica. A Figura 3.10 é uma imagem do ID1400.



Figura 3.10 – Imagem do identificador universal digital Diadur ID1400.

3.1.4 Programa de Aquisição e Processamento de Dados

Foi desenvolvido um programa de aquisição de dados em linguagem C# que se comunica com o indicador universal ID1400 da seguinte forma: após estabilizada determinada posição, o programa envia um comando ASCII “STX” para o dispositivo ID1400 e recebe de volta a informação de posição do eixo do ROD800. O programa gera uma tabela sequencial de valores ordenados da posição do eixo. Esta tabela é transferida ao programa *Origin*, onde os dados são processados e plotados em gráficos. Estes gráficos permitem analisar as variações de posições do eixo do sistema de posicionamento. O código do programa C# desenvolvido para a pesquisa encontra-se no Anexo A.

3.2 SOLUÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DA BANCADA

Com o intuito de desenvolver uma bancada para a avaliação do sistema de servoacionamento WEG, foram levados em consideração requisitos para que sua construção fosse adequada e funcional.

Para melhor entendimento, tais requisitos serão divididos em: transdutor, condicionamento de sinais, *software* de aquisição, sistema mecânico, controle do servoacionamento.

3.2.1 Transdutor

A avaliação do *resolver* integrado ao servoacionamento ocorre pela comparação de seus resultados com os de outro transdutor com resolução melhor, (tipicamente dez vezes) alinhado no mesmo eixo de rotação do servomotor. Cada transdutor apresenta características inerentes a seu funcionamento. A Tabela 3.2 apresenta uma pontuação para as diferentes características de diferentes sensores, permitindo selecionar o mais adequado (STOETERAU 1999).

Tabela 3.2 – Matriz de comparação dos transdutores de posição rotativos (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)

Deslocamentos	Rotativos			
	Fotoelétrico	Indutivos	Magnéticos	Interferométrico
Resolução	4	3	3	5
Faixa de Operação	5	5	5	5
Repetibilidade	5	4	4	5
Velocidade de Leitura	4	3	3	3
Estabilidade	5	4	4	4
Montagem e Ajustagem	5	5	5	4
Custo	3	5	4	1
Total	31	29	28	27

Fonte: STOETERAU (1999).

3.2.2 Sistema de Condicionamento de sinais

O sistema de condicionamento de sinais é reponsável por receber o sinal adquirido pelo transdutor e prepará-lo para que possa comunicar-

se com o programa de aquisição de dados e assim se tornar adequado para leitura.

A escolha deste sistema implica na avaliação dentre as características inerentes a cada possibilidade de solução. A Tabela 3.3 estabelece comparações entre as componentes de cada dispositivo, assim é possível graduar-se os dispositivos relativamente.

A Tabela 3.3 estabelece um paralelo dentre as diferentes opções disponíveis para esta composição.

Tabela 3.3 – Matriz de comparação de sistemas de condicionamento de sinais (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)

	Diadur Id 1400	DS PIC 30F4013	Agilent hctl 2016 + Microcontrolador	Osciloscópio Tektronix DTS 1002
Taxa de aquisição	5	3	4	5
Amostragem	3	4	4	3
Tratamento de ruídos	4	4	4	1
Confiabilidade	5	3	4	5
Disponibilidade	5	4	3	3

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.3 Software de Aquisição de Dados

Na etapa de aquisição de dados, o programa que desempenha a leitura dos dados provenientes do sistema de condicionamento de sinais os transforma em informações armazenadas em um computador pessoal.

Algumas características e propriedades dos *softwares* devem ser levadas em consideração diante da necessidade de aplicação de um método. A Tabela 3.4 compara alguns pontos relacionados aos programas a serem escolhidos. Deve-se levar em consideração que os valores atribuídos são relativos, ou seja, têm validade apenas entre as opções comparadas neste âmbito, não podendo-se fazer uma relação direta com outras opções.

Tabela 3.4 – Matriz de comparação dos *softwares* de aquisição de dados (Onde: 5 – melhor, 1 – pior)

	Algoritmo C#	Labview	Hyperterminal Windows	Rogercom
Taxa de aquisição	4	3	5	5
Processamento de dados	5	5	1	1
Implementação	4	4	3	4
Confiabilidade	4	4	4	4
Disponibilidade	5	4	5	5

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A bancada experimental é constituída de um servoacionamento WEG, e o sistema de aquisição Heidenhain, utilizado como base para as avaliações. O servomotor está alinhado no mesmo eixo de rotação do transdutor Heidenhain, e afixado através de acoplamentos elásticos e um fuso de esferas recirculantes. Esta bancada permite girar o servomotor de um ângulo preestabelecido e verificar esta rotação no transdutor Heidenhain. Para definir o roteiro dos ensaios, tomou-se como base a norma ISO 230-2.

A ISO 230 (*test code for machine tools – part 2: determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes*), norma internacional, é aceita e utilizada mundialmente para determinar a precisão e repetibilidade de posicionamento de máquinas-ferramenta CNC. A norma pode ser usada para *type testing*, teste de aceitabilidade, teste de comparação, verificação de periodicidade e compensação de máquina (LIRA E CARGILL, 2003). O propósito da ISO 230 é a padronização de métodos para testes de precisão de máquina-ferramenta (ISO, 2008). Tomando-se com base a ISO 230-2, pode-se avaliar a precisão e repetibilidade de medição de posicionamento do *resolver* que compõe o servoacionamento WEG.

4.1 NORMA ISO 230-2

A avaliação do sistema segue as indicações dadas na ISO 230-2 (2008). Contudo, pode-se estender sua aplicação a ensaios onde é variada a velocidade do sistema, conseguindo-se assim o aumento da amplitude de parâmetros abordados.

4.1.1 Condições Ambientais

Com relação as condições ambientais a norma estabelece que:

- As condições de temperatura têm que estar dentro da faixa especificada pelo fabricante.

- Tanto o sensor quanto o dispositivo medido devem estar durante um tempo suficiente para garantir que ambos alcancem a mesma temperatura no ambiente de ensaio, ou seja, a temperatura de equilíbrio. A norma sugere que se coloque os dispositivos no ambiente de ensaio já no dia anterior. (ISO, 2008).

Considerando que para o SCA 06 a temperatura ambiente: 0° a 50°C – condições nominais (medida ao redor do servoconversor) (WEG, 2011), o motor apresenta maior variação de temperatura. Porém o transdutor de posição e a unidade de tratamento de sinal também operam na faixa de 0° a 50°C, assim, deve-se garantir esta faixa de temperatura.

4.1.2 Máquina a ser testada

Alguns pontos devem ser considerados na preparação da bancada para os ensaios, seguindo assim a norma ISO 230-2 (2008):

- A máquina tem que estar completamente montada e totalmente operacional. Se necessário, acompanhada de testes de alinhamento.

- Qualquer alteração feita durante os ensaios deve constar no relatório.

- Todos os testes devem ser feitos sem carga na máquina.

São realizados pré-testes que objetivam verificar perfeito funcionamento do equipamento, ou seja, que este funcione suavemente (vibração e ruído baixos) e com seu movimento atingindo toda a extensão dos ensaios. Com estes parâmetros alcançados, podem-se realizar os testes.

4.1.3 Warm-up

Antes da realização dos ensaios dos quais serão obtidos os dados, a ISO 230-2 (2008) recomenda que se realize operações de aquecimento (*warm-up*) na máquina, para que se estabilizem as condições de temperatura, lubrificação, dentre outros parâmetros intrínsecos às máquinas-ferramenta.

A operação de aquecimento foi definida como a operação de movimentação de 5 rotações consecutivas, repetindo-as 10 vezes para cada sentido. A velocidade definida foi de 1000 rpm, acelerando-se e desacelerando-se a uma taxa de 500 rpm/s.

4.1.4 Ensaios

A ISO 230-2 (2008) indica que o eixo da máquina em teste deve ter rotação completa em torno de si mesmo, selecionando-se uma série de posições para avaliação.

A norma segrega posicionamentos até 360° e posicionamentos com mais de 360° e, neste trabalho, serão aplicados os dois modos de ensaios.

A norma ISO 230-2 (2008) indica os valores contidos na Tabela 4.1 para eixos com rotações até 360°:

Tabela 4.1: Número de posições para ensaios de eixos rotativos até 360°

Rotação Máxima do Eixo	Número Mínimo de Posições
$\leq 90^\circ$	3
$> 90^\circ$ e $\leq 180^\circ$	5
$> 180^\circ$	8

Fonte: ISO (2008)

Já para eixos que excedem 360° as medições têm que se dar até 1800° (5 rotações). Deve-se testar fazendo-se uma abordagem unidirecional em cada sentido com o mínimo de 8 pontos alvo em cada sentido.

LIRA e CARGILL (2003) apresentam, na Figura 4.1, um exemplo gráfico de como podem ser feitos os ensaios considerando, 8 posições e 5 ciclos, conforme a norma.

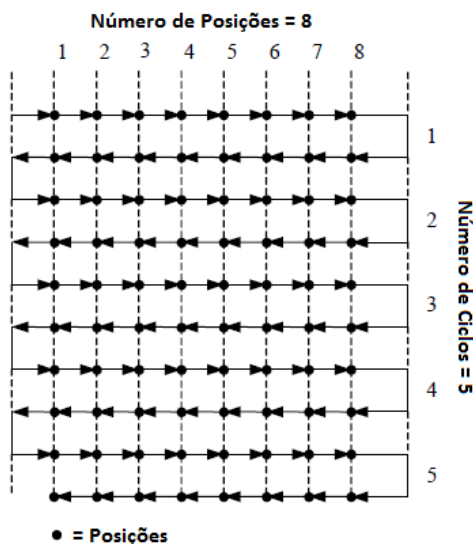


Figura 4.1 – Exemplo de ciclo de testes com 8 posições em 5 ciclos.

Fonte: LIRA e CARGILL (2003).

A fim de se reduzir ao máximo as fontes de erros de medição, todos os ensaios foram executados considerando-se uma movimentação

para eliminação de folgas, ou seja, em ensaios de variação de posição incremental faz-se um passo na mesma direção a qual serão realizados os ensaios. Assim, se o ensaio ocorrer no sentido horário, faz-se um pré-passo no sentido horário, zera-se o sistema de aquisição e realiza-se o ensaio. No caso de ensaios de histerese, se o ensaio ocorrer na sequência horário e anti-horário, o pré-passo deve ser dado no sentido anti-horário primeiramente, compensando as possíveis folgas do sistema.

4.2 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DE POSIÇÃO

Levando-se em conta as informações apresentadas na seção 4.1, são estabelecidos os parâmetros dos ensaios a serem realizados para o levantamento de dados e avaliação do servoacionamento WEG.

Os ensaios tiveram duas variáveis:

- Variação da posição angular;
- Variação da velocidade angular.

Os ensaios de variação de posição obedeceram a variação da posição e velocidade angular, com o objetivo de se avaliar a precisão, a repetibilidade de posicionamento, e a estabilidade do posicionamento do servoacionamento, diante da variação de velocidade.

A variação de posição angular foi dada entre 0° até 360° (deslocamentos intermediários) considerando 8 divisões, ou seja, o posicionamento será segregado de 45° em 45°. Outra faixa de variação é dentre 0° até 1800° (5 revoluções) considerando 8 divisões e assim movimentos de 225° a 225°. Por fim, 4 posições chaves (deslocamentos pontuais), 0° até 180° (meia rotação), 0° até 360° (1 rotação), 0° até 720° (2 rotações) e de 0° até 1800° (5 rotações). São feitas 5 coletas para cada posição.

A variação da velocidade angular foi dada em 3 velocidades: 50, 100 e 200 rpm. O limitante para a velocidade máxima de rotação está no sistema de condicionamento de sinais, relativo à aquisição de dados, que apresenta uma frequência de entrada de sinais máxima de 100kHz. Assim, é possível calcular a frequência de sinais levando em consideração a resolução do *encoder* angular:

$$V_{\text{máx}} = F_{\text{máx}} \cdot R_{\text{encoder}}$$

$$V_{\text{máx}} = 100\text{kHz} \div 25920\text{pulsos/revolução}$$

$$V_{\text{máx}} \approx 3,86\text{rps}$$

ou

$$V_{a,m\acute{a}x} \approx 231,48\text{rpm}$$

Sendo $V_{a,m\acute{a}x}$ a velocidade angular maxima permissivel para determinada frequencia de operação do sistema de condicionamento de sinais; $F_{m\acute{a}x}$ a frequencia maxima de operação do sistema de condicionamento de sinais; e $R_{encoder}$ a resolução do *encoder* angular utilizado.

4.3 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DE HISTERESE

A histerese de um sistema de medição e um erro de medição que ocorre quando ha diferença entre a indicação para um dado valor do mensurando, quando este foi atingido por valores crescentes, e a indicação quando o mensurando e atingido por valores decrescentes (GONÇALVES JR., 2004). Este parâmetro representa a não-linearidade de um sistema mecânico, e geralmente se dá devido à influencia de folga entre componentes e tolerâncias de fabricação.

Para a avaliação da histerese do sistema, foram definidos ensaios de movimentação com variação de 45, 180, 360 e 1800; sendo que essas variação ocorrem nas seguintes etapas:

- uma rotação no sentido horário seguida de uma no sentido anti-horário;
- uma rotação no sentido anti-horário seguida de uma rotação no sentido horário;
- duas rotação no sentido horário seguida de duas no sentido anti-horário;
- duas rotação no sentido anti-horário seguida de duas no sentido horário;
- trs rotação no sentido horário seguida de trs no sentido anti-horário;
- trs rotação no sentido anti-horário seguida de trs no sentido horário;

A cada sequência de movimentos descrita nos tpicos, é feita a medição para o levantamento do erro de histerese, e assim como nos ensaios para a avaliação da variação de posição, os ensaios de histerese também foram variados nas velocidades de 50rpm, 100rpm e 200rpm. São feitas cinco coletas por ensaio.

Os ensaios são determinados pela movimentação definida no programa, e avaliação da sida de posição do SCA06 e do *encoder* ROD 800. Os dados serão comparados, obtendo-se assim dados para avaliação do sistema.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Seguindo a metodologia descrita acima, os ensaios realizados foram avaliados em dois servomotores:

- Motor #1: SWA 40, com 1,6 N.m de torque;
- Motor #2: SWA 40, com 0,8 N.m de torque.

5.1 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM ROTAÇÃO ATÉ 360°

Os ensaios de posição com rotação até 360° permitem analisar o comportamento da realimentação de posição do servoacionamento para deslocamentos menores que uma rotação. Este ensaio se aplica principalmente em equipamentos que exigem pequenos deslocamentos, por exemplo, posicionadores angulares; ou ainda, em equipamentos onde um eixo apresenta movimento translativo no seguimento de uma peça, e outro, apenas posiciona a peça de forma rotativa em torno de um eixo.

Nestes ensaios foram efetuados 8 posicionamentos de forma incremental consecutiva, de 0° até 360°, e assim, levantou-se a característica de posicionamento do servoacionamento.

As Tabelas, 5.1 e 5.2, mostram os resultados angulares nos ensaios realizados para o sistema de posicionamento com a integração ao motor #1. São dispostos a média (\bar{x}) e o desvio padrão (σ).

Tabela 5.1 – Resultados angulares para ensaios de 0° até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ	\bar{x}	σ
45,000	-45,004	0,119	-44,990	0,117	-45,003	0,011
90,000	-90,103	0,118	-89,726	0,027	-89,708	0,010
135,000	-135,084	0,185	-134,748	0,123	-134,771	0,014
180,000	-179,945	0,191	-180,119	0,036	-180,131	0,024
225,000	-224,940	0,078	-225,235	0,114	-225,230	0,016
270,000	-270,173	0,137	-269,895	0,055	-269,898	0,014
315,000	-315,125	0,200	-314,787	0,120	-314,787	0,006
360,000	-360,023	0,112	-360,003	0,097	-360,005	0,009

Tabela 5.2 – Resultados angulares para ensaios na faixa de 0 a 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido anti-horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm anti-horário		100 rpm anti-horário		200 rpm anti-horário	
	X	σ	x	σ	x	Σ
45,000	45,162	0,097	45,167	0,117	45,107	0,008
90,000	90,466	0,109	90,090	0,068	90,468	0,007
135,000	135,142	0,108	134,738	0,103	135,520	0,004
180,000	180,070	0,111	179,874	0,046	180,227	0,010
225,000	225,156	0,117	225,192	0,115	225,236	0,012
270,000	270,343	0,112	270,290	0,035	270,444	0,008
315,000	314,965	0,107	314,961	0,112	315,327	0,008
360,000	359,951	0,074	359,983	0,110	359,998	0,003

Para deslocamentos até 360°, o sistema com motor #1 apresenta um comportamento de erro máximo que para ensaios no sentido horário tem o valor aproximado de 0,2°. Contudo, no sentido anti-horário o erro médio máximo apresenta um crescimento, alcançando valores aproximados de 0,45°, por outro lado, os desvios ficam em torno de 0,1°.

Em ambos os sentidos, horário e anti-horário, pode-se observar nas tabelas que há uma redução dos desvios com o aumento da velocidade até de 200rpm, em relação às mais lentas. Este comportamento pode acontecer devido ao sistema mecânico utilizado no experimento, como, por exemplo, efeitos relacionados a atrito no sistema e a dificuldade de se fazer a compensação de controle com baixas velocidades durante o movimento, ou seja, no aspecto dinâmico.

Tabela 5.3 - Erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios de até 360° com o motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm horário	100 rpm horário	200 rpm horário	50 rpm anti-horário	100 rpm anti-horário	200 rpm anti-horário
45,000	-0,004	0,010	-0,003	-0,162	-0,167	-0,107
90,000	-0,103	0,274	0,292	-0,466	-0,090	-0,468
135,000	-0,084	0,252	0,229	-0,142	0,262	-0,520
180,000	0,055	-0,119	-0,131	-0,070	0,126	-0,227
225,000	0,060	-0,235	-0,230	-0,156	-0,192	-0,236
270,000	-0,173	0,105	0,102	-0,343	-0,290	-0,444
315,000	-0,125	0,213	0,213	0,035	0,039	-0,327
360,000	-0,023	-0,003	-0,005	0,049	0,017	0,002

Outro comportamento relevante é a característica de que a precisão do movimento nos valores intermediários é menor do que em variações exatas, como, por exemplo, no último passo que define uma rotação completa é observada minimização no erro médio e até mesmo uma pequena queda no desvio-padrão. Não se pode associar este comportamento com fatores relacionados ao sistema mecânico da bancada, pois foi verificado na prática que este comportamento é repetitivo mesmo quando o ensaio é iniciado em diferentes posições iniciais, como, por exemplo, começar em posições diferentes do eixo.

Já para o sistema com motor #2 é possível observar um comportamento diferente do anterior, como demonstrado nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.4 – Resultados de erros angulares para ensaios até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	x	σ	x	σ	x	Σ
45,000	45,025	0,161	45,017	0,082	45,013	0,059
90,000	90,010	0,107	89,938	0,057	89,959	0,069
135,000	135,083	0,091	134,914	0,076	134,931	0,082
180,000	180,058	0,082	179,922	0,051	179,983	0,050
225,000	225,036	0,106	224,968	0,052	225,003	0,084
270,000	269,990	0,096	269,965	0,085	270,014	0,078
315,000	315,103	0,124	314,956	0,085	314,969	0,078
360,000	359,983	0,101	360,002	0,010	360,004	0,006

Tabela 5.5 – Resultados angulares para ensaios até 360° de movimentação e incremento de 45°, sentido anti-horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm anti-horário		100 rpm anti-horário		200 rpm anti-horário	
	x	σ	x	σ	x	Σ
45,000	45,120	0,030	45,106	0,007	45,017	0,060
90,000	90,130	0,087	90,213	0,010	90,139	0,027
135,000	135,089	0,064	135,133	0,013	135,049	0,080
180,000	180,090	0,046	180,096	0,015	180,057	0,083
225,000	225,218	0,062	225,224	0,009	225,329	0,045
270,000	270,087	0,155	270,199	0,010	270,084	0,070
315,000	315,014	0,096	315,103	0,014	314,986	0,052
360,000	360,008	0,013	360,004	0,011	360,004	0,011

Nos ensaios realizados com o motor #2, atingiu-se resultados com erros menores, em sua maioria, do que obtidos com o motor #1. Observa-se na Tabela 5.6, que os erros médios calculados em relação aos valores esperados, têm seus valores mais altos ficando em torno de $0,22^\circ$, ocorrendo apenas em 3 casos. Além disso, pode-se afirmar que a relação geral de desvios-padrão fica numa faixa de valores relativamente menor do que no caso do motor #1.

Tabela 5.6 - Cálculo de erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios de até 360° com o motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm			100 rpm			200 rpm		
	50 rpm horário	100 rpm horário	200 rpm horário	50 rpm anti-horário	100 rpm anti-horário	200 rpm anti-horário	50 rpm anti-horário	100 rpm anti-horário	200 rpm anti-horário
45,000	-0,025	-0,017	-0,013	-0,120	-0,106	-0,017	-0,120	-0,106	-0,017
90,000	-0,010	0,063	0,041	-0,130	-0,213	-0,139	-0,130	-0,213	-0,139
135,000	-0,083	0,086	0,069	-0,089	-0,133	-0,049	-0,089	-0,133	-0,049
180,000	-0,058	0,078	0,017	-0,090	-0,096	-0,057	-0,090	-0,096	-0,057
225,000	-0,036	0,032	-0,003	-0,218	-0,224	-0,329	-0,218	-0,224	-0,329
270,000	0,010	0,035	-0,014	-0,087	-0,199	-0,084	-0,087	-0,199	-0,084
315,000	-0,103	0,044	0,031	-0,014	-0,103	0,014	-0,014	-0,103	0,014
360,000	0,017	-0,002	-0,004	-0,008	-0,004	-0,004	-0,008	-0,004	-0,004

5.2 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM DESLOCAMENTO MAIOR QUE 360°

Os ensaios de posição angular que excedem uma rotação completa do eixo do motor são indicados para a avaliação do comportamento do transdutor de posição angular para aplicações do sistema em posicionadores translativos, nos quais há transformação de movimentos angulares em translativos.

O ensaio se dá pela avaliação da posição do eixo do *resolver* do sistema WEG em 8 deslocamentos angulares idênticos de 225° , ao longo de 5 rotações do motor servocontrolado.

As Tabelas 5.7 e 5.8 mostram os resultados dos ensaios para a avaliação do comportamento da rotação do motor servocontrolado #1, ao longo dos 5 rotações completas.

Tabela 5.7 – Resultados dos movimentos angulares para ensaios com 5 rotações completas, avaliados em incremento de 225° para o sentido horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	x	σ	x	σ	x	σ
225,000	-225,197	0,065	-225,270	0,100	-225,106	0,034
450,000	-449,713	0,072	-449,712	0,031	-450,419	0,029
675,000	-674,756	0,077	-674,841	0,049	-675,293	0,029
900,000	-900,083	0,059	-900,097	0,068	-900,186	0,035
1125,000	-1124,983	0,083	-1125,011	0,038	-1125,090	0,030
1350,000	-1349,866	0,077	-1349,865	0,048	-1350,318	0,047
1575,000	-1574,737	0,059	-1574,767	0,081	-1575,531	0,027
1800,000	-1799,970	0,086	-1799,996	0,057	-1800,018	0,024

Tabela 5.8 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, sentido anti-horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm anti-horário		100 rpm anti-horário		200 rpm anti-horário	
	x	σ	x	σ	x	σ
225,000	225,191	0,153	225,243	0,066	225,145	0,070
450,000	450,077	0,159	450,124	0,058	450,484	0,053
675,000	674,936	0,173	674,974	0,092	675,253	0,033
900,000	899,847	0,156	899,891	0,069	900,167	0,084
1125,000	1125,152	0,169	1125,182	0,077	1125,113	0,070
1350,000	1350,244	0,165	1350,284	0,080	1350,335	0,040
1575,000	1574,769	0,156	1574,752	0,052	1575,491	0,077
1800,000	1799,938	0,184	1799,976	0,097	1799,963	0,049

O comportamento do sistema de posicionamento para cursos de até 5 rotações, no sentido horário, apresenta uma redução quanto aos desvios-padrão observados para deslocamentos de até uma rotação, tendo como desvio máximo 0,2°. Contudo, o erro médio apresentou um crescimento em alguns pontos, chegando a aproximadamente 0,5°.

Para os ensaios com a rotação no sentido anti-horário, os erros dos valores médios se aproximam aos valores atingidos no sentido horário, mas, há uma diferença nos valores do desvio-padrão para ensaios a 50 rpm.

Outro aspecto percebido nos ensaios é que com o aumento da velocidade há uma redução no desvio-padrão, desta forma, os ensaios seguiram os padrões observados nos ensaios de até uma rotação.

Assim como no ensaio de até 360°, no ensaio com 5 revoluções percebeu-se que para o último valor, portanto o oitavo deslocamento, o erro médio é bastante pequeno em relação aos valores anteriores, não chegando nem a 0,1° de erro.

Já para o sistema integrado ao motor #2, os valores observados apresentaram diferenças para o sistema com motor #1. As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os resultados para o sistema integrado ao motor #2.

Tabela 5.9 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, sentido horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	X	Σ	x	σ	x	σ
225,000	224,860	0,107	225,048	0,029	224,940	0,037
450,000	449,919	0,093	449,876	0,059	449,925	0,018
675,000	674,908	0,104	674,914	0,008	675,087	0,032
900,000	900,029	0,118	899,912	0,016	900,049	0,024
1125,000	1124,955	0,011	1125,031	0,014	1124,920	0,057
1350,000	1349,860	0,039	1349,987	0,011	1349,997	0,060
1575,000	1574,972	0,109	1574,866	0,024	1575,118	0,034
1800,000	1800,014	0,162	1800,004	0,009	1800,015	0,041

Nos ensaios com o sistema integrado ao motor #2, o erro médio de posicionamento não ultrapassa 0,2°, e apresenta uma distribuição irregular em diferentes velocidades. No entanto, pode-se observar-se uma dispersão maior dos valores, ou uma sequência de valores de desvio padrão mais elevada para resultados a velocidades de 50 rpm.

Tabela 5.10 – Resultados angulares para ensaios com mais 360° de movimentação e incremento de 225°, anti-horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm anti- horário		100 rpm anti- horário		200 rpm anti- horário	
	X	σ	x	σ	x	Σ
225,000	225,049	0,125	224,903	0,045	225,101	0,046
450,000	450,178	0,153	449,813	0,020	449,983	0,036
675,000	675,028	0,125	674,962	0,041	675,056	0,057
900,000	899,912	0,112	899,964	0,073	900,068	0,052
1125,000	1125,167	0,111	1124,942	0,018	1125,029	0,096
1350,000	1350,139	0,087	1349,832	0,038	1350,108	0,051
1575,000	1575,007	0,113	1574,858	0,072	1575,023	0,078
1800,000	1799,990	0,143	1800,009	0,009	1800,051	0,040

Assim como nos ensaios realizados para o motor #1, verificou-se um valor de erro médio, em geral, mais baixo para os ensaios completando 1800°. Isso pode ser ocasionado devido ao fato de que a última posição em que o sistema se encontra, a de 1800°, é a mesma que a posição inicial, sendo no ensaio o último ponto em que se repete o ponto de posicionamento. Tal fato ocasiona que qualquer erro de construção do *resolver*, que se repita dentro de um intervalo de uma rotação, seja eliminado quando se repete um ponto já percorrido anteriormente.

A Tabela 5.11 esclarece a relação dos erros para os valores médios calculados nos ensaios, isto é, nela ocorre a diferença entre o *target point*, ou o ponto selecionado para a movimentação do sistema e que está referenciado no demonstrador do *resolver*, e os pontos analisados com o sistema utilizado para a coleta e avaliação do sistema WEG.

Tabela 5.11 - Cálculo de erros médios dentre os valores esperados e valores coletados nos ensaios a mais de 360° com o motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm	100 rpm	200 rpm	50 rpm	100 rpm	200 rpm
	anti- horário erro	anti- horário erro	anti- horário erro	anti- horário erro	anti- horário erro	anti- horário Erro
45,000	0,140	-0,048	0,060	-0,049	0,097	-0,101
90,000	0,081	0,124	0,075	-0,178	0,188	0,017
135,000	0,092	0,086	-0,087	-0,028	0,038	-0,056
180,000	-0,029	0,088	-0,049	0,088	0,036	-0,068
225,000	0,045	-0,031	0,080	-0,167	0,058	-0,029
270,000	0,140	0,013	0,003	-0,139	0,168	-0,108
315,000	0,028	0,134	-0,118	-0,007	0,142	-0,023
360,000	-0,014	-0,004	-0,015	0,010	-0,009	-0,051

5.3 ENSAIOS DE POSIÇÃO COM VALORES PUNTUAIS

As Tabelas 5.12 e 5.13 retratam valores coletados para ensaios com valores pontuais do sistema integrado ao motor #1. A seleção destes valores se deu para a avaliação do comportamento do *resolver* em relação a certos valores, que compreendem pontos chaves durante a movimentação de um eixo, como meia rotação, uma rotação, duas rotações e cinco rotações.

Com estes ensaios torna-se possível uma melhor visualização do comportamento do sistema em relação a cursos de movimentação sem interrupções intermediárias, como nos casos dos ensaios realizados nos capítulos 5.1 e 5.2.

Tabela 5.12 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	x	σ	x	σ	x	Σ
180,000	-179,958	0,214	-180,058	0,243	-179,946	0,186
360,000	-359,998	0,009	-360,003	0,100	-359,982	0,053
720,000	-719,993	0,015	-719,982	0,051	-719,994	0,041
1800,000	-1800,002	0,014	-1800,007	0,082	-1800,005	0,024

Tabela 5.13 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido anti-horário, motor #1.

Rotação (graus)	50 rpm anti-horário		100 rpm anti-horário		200 rpm anti-horário	
	x	Σ	x	σ	x	σ
180,000	180,030	0,173	179,939	0,290	179,951	0,302
360,000	360,000	0,005	360,006	0,022	360,014	0,043
720,000	720,005	0,010	720,002	0,036	719,990	0,016
1800,000	1800,013	0,021	1799,998	0,012	1799,998	0,014

Por meio da análise das Tabelas 5.12 e 5.13 pode-se observar que para valores pontuais o erro médio de posicionamento não alcança em nenhum momento $0,1^\circ$. Todavia, pode-se também verificar que para os ensaios com deslocamento de 180° , os valores de desvio padrão são em geral mais elevados do que nos outros casos.

Tal comportamento relacionado aos elevados valores de desvio padrão para o ensaio de 180° em comparações com os outros, reflete o mesmo comportamento visualizado nos ensaios dos capítulos 5.1 e 5.2, onde foram observadas características de que em pontos que representam rotação completa a exatidão de posicionamento é maior do que em pontos intermediários a uma rotação. Porém, nos ensaios com valores pontuais, não foi observado o comportamento de que com o aumento da velocidade há uma diminuição no desvio padrão, mantendo a faixa de valores oscilando dentro de $0,1^\circ$ de forma irregular.

A seguir, as Tabelas 5.14 e 5.15 retratam os ensaios com valores pontuais para o sistema integrado ao motor #2.

Tabela 5.14 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm horário		100 rpm horário		200 rpm horário	
	X	Σ	x	σ	x	Σ
180,000	180,004	0,112	180,000	0,147	180,013	0,079
360,000	360,001	0,155	359,999	0,006	360,010	0,030
720,000	720,027	0,075	720,002	0,009	719,993	0,048
1800,000	1799,996	0,098	1800,006	0,013	1799,994	0,090

Tabela 5.15 – Resultados angulares para ensaios com valores selecionados com ensaios no sentido anti-horário, motor #2.

Rotação (graus)	50 rpm anti-horário		100 rpm anti-horário		200 rpm anti-horário	
	X	σ	x	σ	X	σ
180,000	179,989	0,203	180,019	0,078	180,011	0,053
360,000	359,996	0,021	360,002	0,012	359,998	0,019
720,000	719,990	0,084	720,003	0,006	720,006	0,073
1800,000	1799,948	0,121	1800,013	0,006	1800,010	0,104

Nas Tabelas 5.14 e 5.15 os valores coletados apresentam a mesma tendência dos ensaios representados nas Tabelas 5.12 e 5.13.

5.4 ENSAIOS DE HISTERESE

Os ensaios de histerese têm como objetivo verificar a não linearidade do sistema. Assim, os ensaios são determinados pela rotação do eixo para um sentido com um determinado deslocamento, seguido pelo movimento para o sentido inverso com o mesmo deslocamento. A verificação da diferença entre o resultado deste ensaio com a posição inicial é a histerese analisada.

A sequência dos ensaios é dada no capítulo 5.3, e os resultados estão descritos nesta seção.

A análise dos resultados dos ensaios retrata que os erros correspondentes a este ensaio permanecem numa faixa de $0,01^\circ$, inferior aos que nos ensaios analisados nos capítulos 5.1, 5.2 e 5.3.

Por meio da visualização dos gráficos retratados nas Figuras 5.1 e 5.2, cuja configuração de ensaio é dada para velocidades de 50 rpm e sistema integrado ao motor #1, pode-se inferir que as médias dos ensaios se mantiveram dentro de $0,005^\circ$ de erro. Apesar de que graficamente

parece haver uma pequena diferença de resultados, a escala de valores do gráfico é muito baixa em comparação com valores dos ensaios anteriores, o que comprova o comportamento satisfatório para ensaios de linearidade.

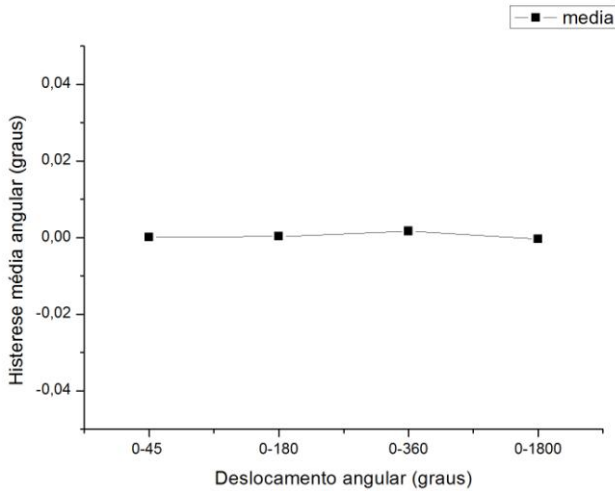


Figura 5.1 – Média dos valores médios de histerese para 50 rpm, motor #1.

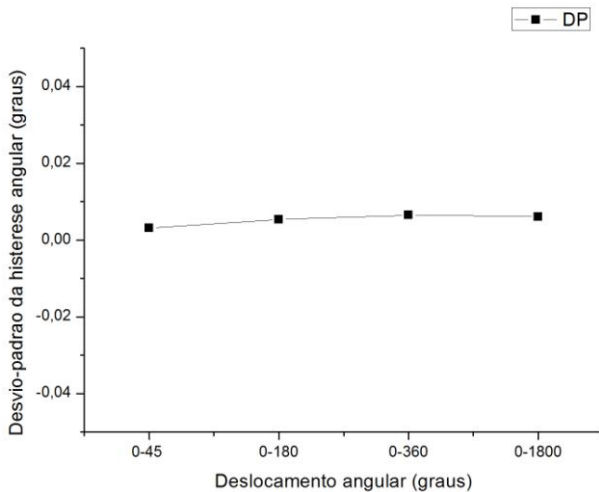


Figura 5.2 – Média dos valores de desvio padrão da histerese para 50 rpm, motor #1.

Nas Figura 5.3 e Figura 5.4 são retratados os ensaios para velocidades de 100 rpm. Nestes pode-se observar, assim como para os ensaios de histerese a 50 rpm, uma aparente pequena variação de valores no gráfico. Entretanto, ao observar os níveis dos valores retratados nos gráficos, novamente pode-se constatar o bom comportamento do sistema para este ensaio, visto que as variações médias dos valores não ultrapassam $0,0025^\circ$, bem como o desvio padrão sempre abaixo de $0,007^\circ$.

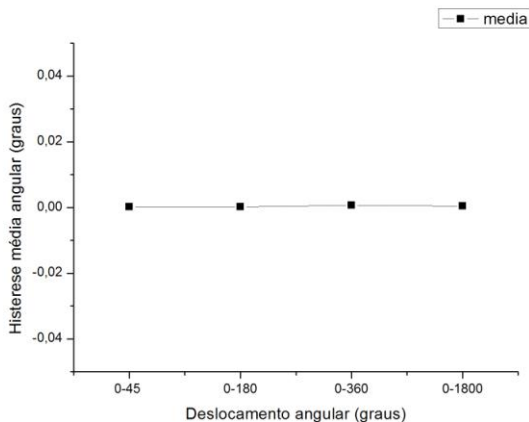


Figura 5.3 – Média dos valores médios de histerese para ensaios a 100 rpm, motor #1.

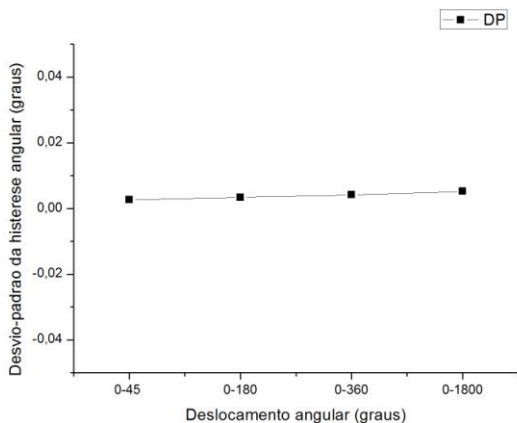


Figura 5.4 – Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 100 rpm, motor #1.

Nos ensaios a 200 rpm, o comportamento do sistema quanto à histerese apresenta resultados diferentes dos ensaios de histerese a 50 e 100 rpm. Entretanto a diferença observada não possibilita o estabelecimento de uma relação concreta, ainda que observada, pois a faixa de valores observadas é bastante baixa em relação a resolução do transdutor.

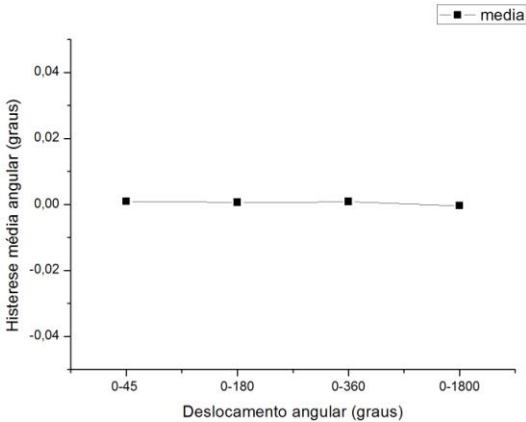


Figura 5.5 - Média dos valores de médios para ensaios a 200 rpm, motor #1.

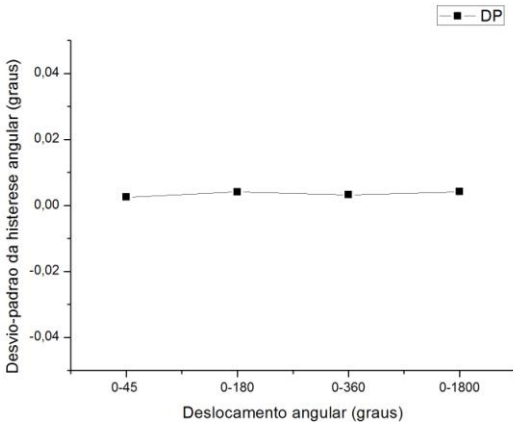


Figura 5.6 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 200 rpm, motor #1.

Assim como para os ensaios realizados com sistema integrado ao motor #1, os ensaios aplicados ao motor #2 apresentaram resultados

dentro de uma faixa satisfatória, assim sendo, respeitando-se a resolução dada pelo fabricante, os resultados apresentaram-se dentro da faixa esperada.

No ensaio realizado a 50 rpm, percebeu-se uma variação máxima da histerese média de 0,0015 para um sentido e -0,0025 para outro sentido, tendo-se a faixa máxima de desvio padrão atingido em torno de 0,0026°. Tais dados são visualizados nas Figuras 5.7 e 5.8.

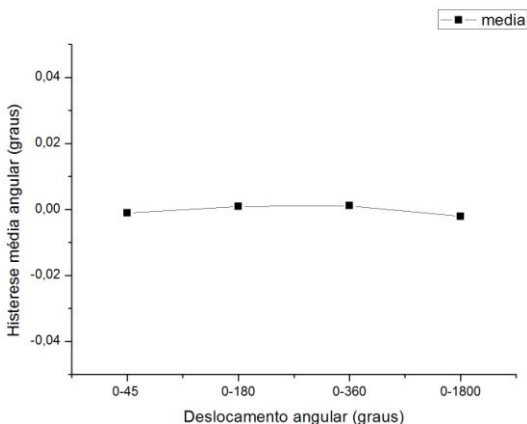


Figura 5.7 - Média dos valores médios para ensaios a 50 rpm, motor #2.

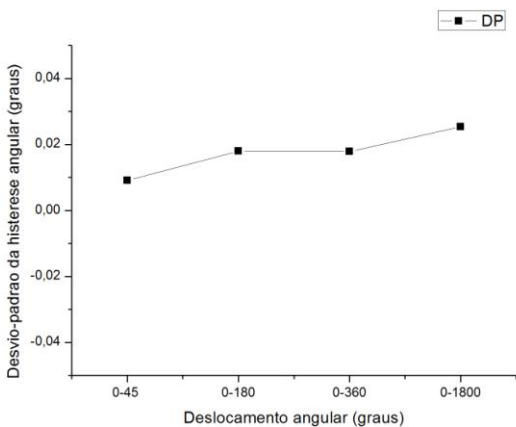


Figura 5.8 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 50 rpm, motor #2.

Nos ensaios realizados a 100 rpm de velocidade, Figuras 5.9 e 5.10, os valores médios de histerese ficam numa faixa ainda mais baixa do que nos ensaios a 50 rpm. Os valores do ensaio a 100 rpm têm o valor máximo de $0,0006^\circ$ para um sentido e $-0,0008^\circ$ para outro sentido, tendo-se ainda um desvio-padrão máximo de $0,014^\circ$.

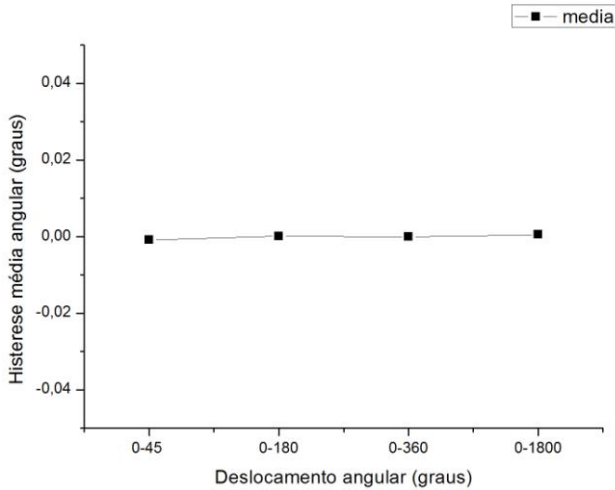


Figura 5.9 - Média dos valores médios para ensaios a 100 rpm, motor #2.

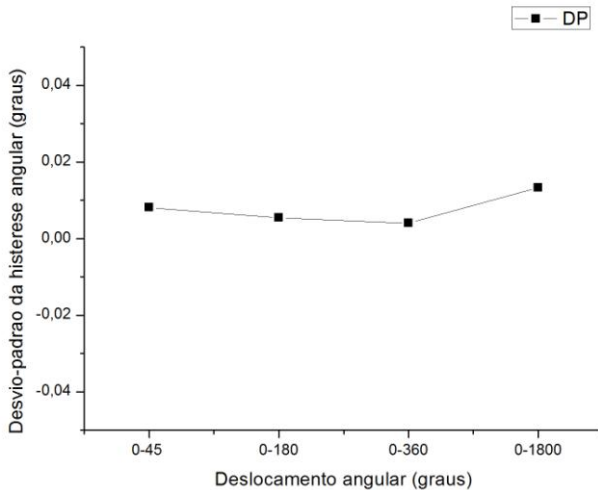


Figura 5.10 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 100 rpm, motor #2.

Por fim, nos ensaios com velocidade de 200 rpm apresentam novamente valores abaixo do esperado, considerando que a média dos valores para histerese tem $0,0002^\circ$ de erro para um dos sentidos e $-0,010^\circ$ para outro sentido. O desvio-padrão observado não atinge o valor de $0,009^\circ$. Tais informações são ilustradas nas Figuras 5.11 e 5.12

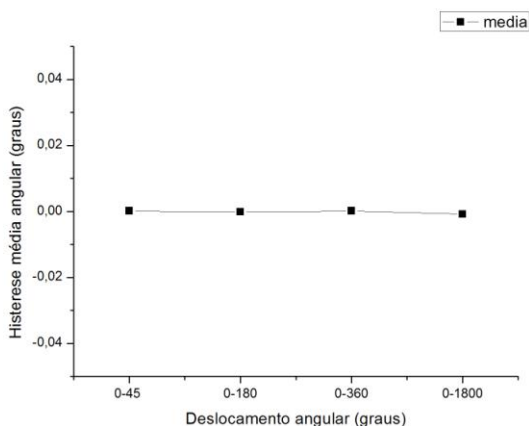


Figura 5.11 - Média dos valores médios para ensaios a 200 rpm, motor #2.

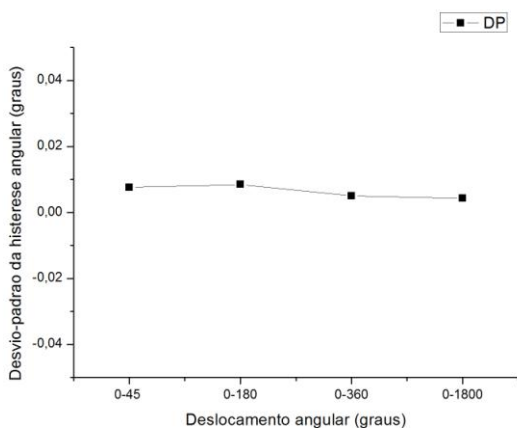


Figura 5.12 - Média dos valores de desvio padrão para ensaios a 200 rpm, motor #2.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

A avaliação, dos resultados obtidos no contexto dos ensaios desta pesquisa, permite uma qualificação do sistema de posicionamento WEG constituído pelo servoconversor SCA 06 e servomotores SWA 40 1,6 N/m e SWA 40 0,8 N.m, objetivando uma utilização em sistemas de processamento de material com LASER.

Dentre os ensaios realizados, alguns fatores principais devem ser levados em consideração:

- O erro de histerese abaixo do valor esperado em relação à resolução do sistema de posicionamento;
- Os valores de desvio padrão para os ensaios de histerese;
- O erro de posicionamento para intervalos de deslocamento intermediários, aqueles que não completam uma rotação;
- A diferença entre o erro para deslocamentos intermediários e deslocamentos pontuais;
- As características e influência da velocidade sobre os ensaios de posicionamento e histerese;
- Diferenças entre os valores coletados para o motor #1 e motor #2.

6.1 HIPÓTESES PARA AS FONTES DE ERROS

Considerando o *resolver* como um sistema baseado nos princípios de indução magnética, a qualidade de sua construção, montagem e conservação são de extrema importância para seu satisfatório funcionamento. O erro de posicionamento para deslocamentos intermediários (que não completam rotação exata) pode ser explicado por características do *resolver*.

Tal erro foi considerado acima do previsto devido ao fato de que a resolução esperada para o sistema era de 4096 pulsos por revolução ou aproximadamente $0,088^\circ$ por pulso, e os valores observados, tanto nos ensaios realizados com o sistema integrado para o motor #1 e #2, não atingiram este valor (principalmente nos ensaios realizados como o motor #1).

Quanto ao motor #1, foram medidos erros que chegaram a $0,5^\circ$. Isto revela que para ensaios de posições intermediárias o *resolver* causa perturbações que impedem que se garanta este posicionamento, tendo-se assim um comportamento irregular do sistema de posicionamento. Já para o motor #2, foram medidos erros um pouco menores, com valores chegando até $0,22^\circ$.

Tal irregularidade no comportamento pode ser causada por interferência magnética externa. Entretanto, neste estudo, esta possibilidade é bastante remota devido ao fato de se trabalhar em uma bancada experimental com possibilidade muito pequena deste tipo de interferência.

Outro fator que poderia trazer alguma influência sobre o sistema de posicionamento seria o sistema de controle, ainda assim, durante os ensaios foram estabelecidos testes variando os parâmetros de controle do controlador PID. Para uma dada faixa de valores, em que o sistema desempenha movimentação suave (silenciosa e com baixos níveis de vibração) o sistema apresenta um comportamento regular quanto aos resultados de posicionamento.

Há que se ressaltar que durante o ajustes dos ganhos de controle, deve-se ter a preocupação de se utilizar o ganho k_i , visto que tal ganho permite com que a estabilização do sistema ocorra no *target point*, conforme explanado no capítulo 3.1.1.

Outra fonte de influência para os resultados seria o sistema mecânico, todavia, foram aplicados acoplamentos de alto desempenho que, segundo catálogo, permitem desvios na faixa de $0,1^\circ$, além disto poderiam haver a presença de problemas de torção da barra do fuso, mas, além desta variável ser de baixa influência, os ensaios foram feitos com o sistema estático, ou seja, sempre esperando a estabilização e assentamento do sistema para coleta de dados, o que diminuiria ainda mais estes erros.

Além disto, os testes de histerese mostram que a influência mecânica de folgas é baixa, pois no ensaio de histerese ocorre inversão no sentido do movimento, e esta inversão poderia causar um intervalo morto na reação do movimento ao outro sentido, se o sistema mecânico sofresse com grandes folgas.

O sistema de conversão A/D do servoconversor pode ser uma fonte de erros para o sistema de posicionamento se sofrer qualquer tipo de ruído de interferência magnética. Além disso, se não estiver adequado para trabalhar numa frequência que garanta a resolução esperada, já que, como visto no capítulo 3.5.1, a resolução de um *resolver* em um sistema de posicionamento é diretamente dependente da frequência limite de operação a qual o sistema de condicionamento de sinais é capaz de coletar, converter e calcular as posições provindas das análises dos sinais analógicos extraídos do transdutor (*resolver*). Não obstante, esta possibilidade é de difícil análise visto que o sistema de condicionamento de sinais é de código e circuito enclausurados.

Por fim, uma possibilidade de fonte de perturbações para o sistema de posicionamento seria a montagem eletromecânica do *resolver*. Considerando-se o *resolver* um transdutor com duas bobinas estatoras defasadas em 90° e uma rotores ao centro, e seu sinal baseado nas interações magnéticas, dentre tais, o correto alinhamento das bobinas (que devem estar minuciosamente posicionadas a 90°) e do rotor (que deve estar alinhado rigorosamente ao centro do eixo do *resolver*) são pontos críticos para os resultados de medição do sistema, pois quaisquer desvios fora do permitido podem gerar resultados não adequados ao sistema de posicionamento. Além disto, perturbações externas como umidade ou qualquer tipo de material que entrasse no campo de atuação do *resolver*, poderiam trazer erros à medição do sistema.

6.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O comportamento regular da histerese do sistema (em relação aos erros de posicionamento dados para os deslocamentos intermediários) é justificável pelo argumento de que em um deslocamento no ensaio de histerese, seja ele qual de qualquer amplitude, o sistema de posicionamento da bancada é exposto às mesmas anomalias que as dadas aos ensaios de deslocamento em sequência. No entanto, no ensaio de histerese o deslocamento feito em um sentido e seguido pelo de sentido contrário, submete o sistema de posicionamento às mesmas anomalias para ambos os sentidos, por percorrerem o mesmo segmento de ângulo da rotação do eixo do *resolver*, sendo diferente apenas o sentido de rotação.

No caso do posicionamento sequencial o incremento de posição, por mais que seja uniforme para os ensaios, submete o sistema de posicionamento a diferentes segmentos do eixo do *resolver*, e assim, pode sofrer influência da construção do *resolver*, tanto a posições das bobinas estatoras quanto a qualquer outra irregularidade na questão de montagem.

A distribuição dos valores nos ensaios de histerese manteve-se dentro de uma faixa de até $0,01^\circ$, o que em relação aos ensaios de deslocamentos intermediários é um valor bastante reduzido. Esta observação, junto às análises anteriores das médias registradas, depõe pela qualidade do sistema de condicionamento de sinais do *resolver*, ou seja, a resolução do sistema está garantida pelo sistema de condicionamento, segundo consta na documentação do sistema WEG. Contudo, não há regularidade no controle de posição em uma rotação

incompleta do eixo do *resolver*, provavelmente devido a fatores de construção.

É importante observar que a irregularidade nos ensaios de deslocamento intermediário se deu pelo fato de que, ao contrário dos ensaios de histerese, onde o ensaio começa e termina no mesmo ponto e é possível se garantir que o movimento do eixo será dado para um sentido e para o outro, seguindo a mesma extensão percorrida para cada sentido, nos ensaios incrementais as posições iniciais relativas de cada ensaio foram variadas de forma aleatória, justamente com o objetivo de se avaliar o comportamento do sistema de posicionamento em diferentes posições da circunferência do eixo avaliado.

Outro ensaio que aponta para a influência da construção do *resolver* na precisão de posicionamento é o que mostram as diferenças entre os resultados para ensaios de deslocamentos intermediários em rotações incompletas e rotações completas.

Nos ensaios de deslocamento intermediários, a precisão é menor que nos ensaios de rotações completas, devido à construção do *resolver*, o que traz irregularidades nos valores de posição intermediários. Entretanto, com uma rotação completa, o eixo volta a posição inicial, e considerando o fato de que o *resolver* é um transdutor de posição absoluto, o eixo do *resolver* estaria numa posição que já havia ocupado antes e isso explica a boa precisão nestes ensaios. Este comportamento se identifica com o baixo erro de histere apresentado pelo sistema, fortalecendo o argumento de que quanto a valores absolutos o *resolver* (para cada posição individual) apresenta alta repetibilidade, contudo para posições incrementais em torno de seu eixo o valor angular não atinge o apresentado em documentação.

Outro ponto a ser salientado está relacionado ao comportamento do sistema de posicionamento para diferentes velocidades. O fabricante garante a resolução do sistema de posicionamento de 4096 bits até uma velocidade de 3000 rpm. Contudo, como já foi descrito, o sistema nesta pesquisa foi submetido a velocidade máxima de 200 rpm devido a limitações no sistema de aquisição de dados empregado (conforme apresentado no capítulo 4.2) e, além disso, o exemplar de motor utilizado na bancada em questão tinha como velocidade máxima 3000 rpm, sendo assim, teria-se que utilizar outro sistema de aquisição que permitisse uma coleta de dados com maior frequência e a obtenção de um motor cuja a rotação excedesse 3000 rpm.

Outrossim, a variação dos parâmetros de velocidade na faixa de velocidades submetidas neste trabalho não é suficiente para avaliar o sistema de condicionamento de sinais em situações críticas, ou próximo

aos limites descritos pelo fabricante. Desta forma, a variação de velocidade aplicada nesta pesquisa teve como finalidade avaliar o comportamento do sistema de posicionamento em relação ao par de influências: sistema mecânico e sistema de controle de posição.

Como citado anteriormente, foram estabelecidos testes com diferentes ganhos para os parâmetros de controle e os resultados permaneceram constantes quando o sistema estava funcionando de forma suave (silenciosa e com baixos níveis de vibrações). Entretanto, diferentes ensaios com diferentes velocidades apresentaram resultados de ensaios passíveis de análise.

Para ensaios de histerese as alterações na velocidade não trouxeram alterações tão significativas quanto às visualizadas nos ensaios de posições incremental e de valores puntuais.

Nos ensaios incrementais até 360°, com incrementos de 45°, pode-se notar uma diferença considerável dos resultados de desvio padrão para velocidades de 200 rpm, para com os resultados a 50 rpm e 100 rpm. Apesar de, em geral, existir uma queda no desvio padrão dos ensaios de 50 rpm para 100 rpm, nos ensaios a 200 rpm o desvio padrão toma proporções até 10 vezes menor que nos outros ensaios.

Apesar de não se poder observar com clareza um padrão nos valores médios coletados, isto devido provavelmente aos mesmos argumentos dados anteriormente sobre a construção do *resolver*, pode-se afirmar que a 200 rpm o sistema tem melhor repetibilidade constatado pela menor distribuição dos desvios padrões.

A melhor repetibilidade do sistema para a velocidade de 200 rpm pode ser devido à influências mecânicas, por exemplo atritos. Em velocidades menores, as influências de atrito podem se dar com maior incidência, como por exemplo, efeitos de adere-desliza. Efeitos como este dificultam o sistema de posicionamento a controlar a posição final do eixo do motor, e assim causam uma variação mais ampla de resultados.

Nos ensaios incrementais de 5 rotações com incremento de 225°, os resultados coletados foram semelhantes aos encontrados para ensaios até 360°, contudo, com uma diferença menor de velocidade para velocidade.

As diferenças encontradas nos resultados dos ensaios com os motores #1 e #2, especificados anteriormente, são provavelmente dadas apenas pelo fato da montagem do *resolver* ter sido feita desigual ou por não ser o mesmo exemplar.

O fato de serem de séries diferentes não explica as diferenças entre os resultados pois, primeiramente, o sistema mecânico confere aos

motores exigências de torque muito baixas, assim sendo, a única diferença de um ensaio para o outro foi a configuração dos parâmetros de ganhos. Tal fator, já comentado, não influi nos resultados.

Além disto, foram realizados alguns testes para verificação do comportamento utilizando um motor da mesma série e lote do motor #2, e os resultados coletados mostraram um comportamento bastante diferente do comportamento dos resultados obtidos para o motor #2. Assim, é pouco provável que se tenha uma relação entre motores de torques diferentes e precisão de posicionamento para o sistema WEG em questão.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Levando-se em conta o objetivo geral do trabalho de avaliar as características de posicionamento do sistema de servoacionamento WEG, foi montada e validada uma bancada experimental para o desenvolvimento dos ensaios para avaliação do sistema

Para deslocamentos incrementais e com intervalo diferente de 360° e múltiplos, os resultados apresentam erros quanto aos valores indicados na folha de dados.

Contudo para ensaios iguais a 360° e múltiplos ou ainda ensaios de ida e volta, com o mesmo ângulo (em módulo), os resultados mostram que o sistema apresenta resultados que excedem os indicados na folha de dados. Esta alta precisão foi verificada até 200 rpm.

Levando-se em conta a relação entre a velocidade de deslocamento e o sistema mecânico, quanto à capacidade de posicionamento do sistema, conclui-se que na velocidade de 200 rpm, há uma tendência de se obter erros menores de posicionamento do que na velocidade de 50 rpm.

Considerando a resolução dada na folha de dados do sistema WEG de 12 bits, equivalente a 4096 incrementos, tem-se uma resolução angular correspondente de aproximadamente $0,088^\circ$.

A avaliação final dos resultados mostrou que o sistema WEG apresenta uma boa qualidade quanto ao sistema de condicionamento de sinais do transdutor, ou seja, apresenta os resultados conforme indicado em documentação. Esta conclusão é baseada na análise dos resultados coletados para ensaios de ida e volta, que mostram a regularidade do condicionamento de sinais nas velocidades verificadas.

Contudo, os resultados mostram que a precisão dos *resolvers* utilizados no sistema está abaixo da descrita em documentação.

Conforme avaliado neste trabalho, o sistema de servoacionamento WEG apresentou erro médio máximo de posicionamento próximo a $0,5^\circ$, resultando ainda num desvio-padrão máximo de aproximadamente $0,2^\circ$.

No caso de máquinas LASER, as quais se trabalhe com a dinâmica rotacional, como, por exemplo, máquinas de soldagem e corte de tubos, o sistema WEG avaliado nesta pesquisa é capaz de garantir, segundo os ensaios deste trabalho, precisão de $0,5^\circ$ e com desvio de valores máximo na faixa de $0,2^\circ$. Para sistemas translativos, deve-se

levar em conta o sistema mecânico quanto a sua precisão. Nesta pesquisa utilizou-se como mecanismo de transformação de movimento um fuso de esferas recirculantes de passo 10mm, assim com a precisão verificada no trabalho, a precisão em movimentos translativos encontrada é de aproximadamente 0,014mm, considerando um sistema mecânico ideal. Além disto, nesta pesquisa, realizaram-se ensaios com velocidade máxima de 200rpm. Aplicando a transformação, tem-se uma velocidade translativa de 2 metros por minuto.

Com o intuito de se relacionar o sistema de posicionamento angular de um acionamento WEG com os requisitos de um sistema de posicionamento para aplicações LASER, pode-se afirmar que o sistema WEG é adequado para operações em que o movimento de rotação do motor é transformado em um movimento linear por um fuso de esferas recirculantes ou no qual a rotação do motor é reduzida para outro movimento de rotação por uma caixa de engrenagens ou de polias. Os erros gerados permitem aplicações LASER de baixa resolução/precisão e baixa velocidade. No caso de uma aplicação com acionamento longitudinal por “belt drive” ou acionamento de rotação direta pelo eixo do motor, deve-se observar as limitações impostas pelas características dos acionamentos avaliados. Estas afirmações são baseadas nos resultados coletados e apresentados no trabalho. Por outro lado, o sistema não se mostra adequado para operações com requisitos mais severos.

7.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Efetuar a avaliação com sistemas de aquisições de frequências mais altas e em maiores velocidades angulares para se avaliar o comportamento do sistema de condicionamento de sinais em velocidades mais elevadas.

- Avaliar a repetibilidade em segmentos de ângulo ao longo do eixo do *resolver*.

- Desenvolver um algoritmo para correção de erro de posicionamento do *resolver*.

- Desenvolver uma bancada para ensaiar sistematicamente acionamentos posicionadores de médio porte. (Sugestão: Bancada de ensaios para acionamentos eletromecânicos fracionários rotativos)

REFERÊNCIAS

ANG, Kiam Heong; CHONG, Gregory; LI, Yun. **PID CONTROL SYSTEM ANALYSIS, DESIGN, AND TECHNOLOGY**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 13, No. 4, 2005.

BERTRÁN, Javier Andrés Reckmann. **SISTEMATIZAÇÃO DO PROCESSO DE PROJETO EM AUTOMAÇÃO DE MÁQUINAS CARTEZIANAS COM ACIONAMENTO ELETROMECCÂNICO - ÊNFASE NO POSICIONAMENTO**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2009. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

BURGOA, David Pimentel. **BANCADA DE ENSAIOS PARA ACIONAMENTOS ELETROMECCANICOS FRACIONARIOS ROTATIVOS**. Universidade Federal de Santa Catarina. 1996. Dissertação de Mestrado.

CASARIM, Joviano Janjar. **ROLETEAMENTO DE VIRABREQUINS**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Dissertação de Mestrado.

DAHOTRE, Narendra B.; HARIMKAR, Sandip P. **LASER FABRICATION AND MACHINING OF MATERIALS**. Tennessee, Springer, 2008.

GONÇALVES JR., Armando Albertazzi. **APOSTILA DE METROLOGIA – PARTE I**. LABMETRO – UFSC. Florianópolis, 2004.

HEIDENHAIN. **ROD 800 INCREMENTAL ANGLE ENCODER**. 1990.

HEIDENHAIN. **EXE 650 INTERPOLATION AND DIGITIZING ELECTRONICS**. 1984

HEIDENHAIN. **ROD 880 MOUNTING INSTRUCTIONS**. 2003

HUGHES, J.M. **REAL WORLD INSTRUMENTATION WITH PYTHON**. O'Reilly. Sebastopol. 2011.

ISO. ISO 230 TEST CODE FOR MACHINE TOOLS – PART 2: DETERMINATION OF ACCURACY AND REPEATABILITY OF POSITIONING NUMERICALLY CONTROLLED AXES. 3ª Edição, 2008.

KIONG, Tan Kok; HENG, Lee Tong; SUNAN, Huang. **PRECISION MOTION CONTROL: DESIGN AND IMPLEMENTATION 2ND EDITION.** Singapura. Springer 2008.

LIRA, Ignacio; CARGILL, George. **UNCERTAINTY ANALYSIS OF POSITIONAL DEVIATIONS OF CNC MACHINE TOOLS.** Precision Engineering, v. 28, n.2, p. 232-239, 2003.

MOTION & CONTROL NSK. NSK BALL SCREWS FOR HIGH-LOAD DRIVE: TAC SERIES OF BALL SCREW SUPPORT BEARINGS FOR HIGH LOAD APPLICATIONS, NSK ROLLER GUIDE RA SERIES. 2009.

NIREI, M; YAMAMAMOTO, Y; KITAZAWA, K; KIKUCHI, Y; KAMIYA, A; WAKIWAKA, H. **ANGULAR ERROR ANALYSIS OF AN 8X-VR RESOLVER WITH AN ECCENTRIC ROTOR.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials. P. 242–245. 2002

O'DWYER, Aidan. **HANDBOOK OF PI AND PID CONTROLLER TUNING RULES.** 2ª Edição. Imperial College Press. Londres, 2006.

OGATA, Katsuhiko. **ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO.** 5ª Edição. Pearson. São Paulo, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO.** Prentice-Hall. Rio de Janeiro, 1982.

OPTORESOLVER.COM. **RESOLVER VS ENCODER.** 2011.

Disponível em:

www.optoresolver.com/help/tutorials/resolver_v_encoder.htm Acesso em: 18/07/2012

PARK, John; MACKAY, Steve. **PRATICAL DATA ACQUISITION FOR INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS.** Elsevier. 2003. Oxford.

PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÕES MECÂNICAS ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP).**

Universidade Federal de Minas Gerais. 2010. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica.

READY, John F.; FARSON, Dave F. **LIA HANDBOOK OF LASER MATERIALS PROCESSING.** Orlando, LASER Institute of America Magnolia Publishing, Inc., 2001.

STEEN, William M.; MAZUMDER, Jyotirmoy. **LASER MATERIAL PROCESSING, 4TH EDITION.** Michigan. Springer. 2010.

STOETERAU, Rodrigo Lima. **DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE UMA MÁQUINA – FERRAMENTA COMANDADA NUMERICAMENTE PARA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO COM FERRAMENTA DE GEOMETRIA DEFINIDA.** Universidade Federal de Santa Catarina, 1999. Tese de Doutorado.

SUNADA, Marcelo Massayuki. **ACIONAMENTO DE UM POSICIONADOR LINEAR DE ULTRAPRECISÃO EMPREGANDO UMA REDUÇÃO *HARMONIC DRIVE* COM CONTROLE DE VELOCIDADE.** Universidade Federal de Santa Catarina. 2007. Dissertação de Mestrado.

VIM 2012. **VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS E GERAIS E TERMOS ASSOCIADOS.** 2012. Brasil

VOSS, Wilfried. **A COMPREHENSIBLE GUIDE TO SERVO MOTOR SIZING.** Massachusetts. Copperhill Technologies Corporation. 2007.

WEBB, Colin E.; JONES, Julian D C. **HANDBOOK OF LASER TECHNOLOGY AND APPLICATIONS – VOLUME II: LASER DESIGN AND LASER SYSTEMS.** Institute of Physics Publishing. Bristol e Philadelphia. 2004.

WEBSTER, John G. **MEASUREMENT, INSTRUMENTATION AND SENSORS HANDBOOK**. CRC Press LCC, 1999.

WILSON, S. Jon. **SENSOR TECHNOLOGY HANDBOOK**. Oxford. Elsevier, 2005.

WEG. **SERVOCONVERSOR SCA06: MANUAL DE PROGRAMAÇÃO**. Santa Catarina, 2010. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-sca06-manual-de-programacao-10000662686-1.1x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 28/06/2012

WEG. **SERVOCONVERSOR SCA06: MANUAL DO USUÁRIO**. Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-sca06-manual-do-usuario-10000629636-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 28/06/2012

WEG. **SERVOCONVERSOR SCA06: REFERÊNCIA RÁPIDA DOS PARÂMETROS, FALHAS E ALARMES**. Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-sca06-referencia-rapida-dos-parametros-10000656225-1.1x-guia-rapido-portugues-br.pdf>. Acesso em: 29/11/2012

WEG. **WLP SOFTWARE: MANUAL DO USUÁRIO**. Santa Catarina, 2011. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-wlp-software-de-programacao-ladder-weg-10000051020-9.1x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 28/06/2012

YU, Cheng-Ching. **AUTOTUNING OF PID CONTROLLERS - A RELAY FEEDBACK APPROACH**. 2ª Edição. Springer. Taiwan, 2006.

ANEXO A**PROGRAMA PRINCIPAL DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS DESENVOLVIDO EM C#**

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace Serial_Bernardo
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        Int64 temp = 0;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void Botaoliga_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            Botaoliga.Enabled = false;
            Botaodesliga.Enabled = true;
            serialPort1.Open();
            timer1.Enabled = true;
            Tempo.Clear();
            Serial.Clear();
            temp = 0;
        }

        private void Botaodesliga_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            Botaoliga.Enabled = true;
            Botaodesliga.Enabled = false;
            serialPort1.Close();
            timer1.Enabled = false;
        }
    }
}
```

```
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    Tempo.AppendText(Convert.ToString(temp) + "\r\n");
    label3.Text = (Convert.ToString(temp));
    temp++;
    Serial.AppendText(serialPort1.ReadExisting());
    label4.Text = (serialPort1.ReadExisting());
}
```