

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM CABEÇOTE INDEXADOR MECATRÔNICO

MsC. Eng^o. Jorge Ueno

Dr. Eng^o. Luiz Carlos Sandoval Góes - Email: goes@mec.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, Depto. de Engenharia Aeronáutica e Mecânica
Cx. P. 12228-900 – São José dos Campos, SP, Brasil

Tecn. José Francisco dos Santos

Dr. Eng^o. Carlos Chien Ching Tu – Email: carlcctu@usp.br

Escola Politécnica – USP, Depto. de Engenharia Mecânica
Cx. P. 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil

Resumo. Neste trabalho, um novo cabeçote indexador mecatrônico* foi projetado, construído e testado. Dois motores de passo girando dois sem-fins acionam a mesma engrenagem de indexação. Um dos motores é usado para a indexação propriamente dita, enquanto que o outro é usado só para eliminar a folga e travamento. Durante a movimentação, o sem-fim de travamento é liberado e gira sem tocar nos dentes da coroa. Desta forma a indexação pode ser feita com um mínimo de atrito. Alta repetibilidade, portanto, foi alcançada em consequência direta da eliminação dos efeitos da folga e do atrito não-linear.

A indexação foi calibrada com o Cabeçote Divisor da “Zeiss” (1987) de alta precisão (exatidão de 1 segundo de arco). Foi verificado que os erros experimentais são periódicos. Portanto, esses erros foram decompostos em suas componentes de Fourier usando FFT. Um algoritmo de correção usando esse modelo matemático foi desenvolvido e incorporado ao programa de indexação controlado por microcomputador. A repetibilidade (ou precisão) foi melhorada em 6 vezes; o desvio padrão dos erros, baseado em 250 medições, foi reduzido para somente 14.8 segundos.

Palavras-chaves: Divisor mecatrônico, Indexador CNC, Projeto, Construção, Verificação

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, uma verdadeira revolução está acontecendo nas máquinas modernas de todos os tipos. Essa revolução é denominada de “Revolução Mecatrônica” que consiste na incorporação da eletrônica e informática às máquinas modernas para torna-las mais baratas e/ou mais versáteis, seguras e flexíveis (Bradley et al., 1991) e (Bolton, 1995). Essa revolução tem atingido em cheio a área de máquinas operatrizes com o uso maciço das técnicas de CNC nas modernas fresadoras, tornos, retíficas, etc.. Com isto, houve um salto grande na precisão e versatilidade dessas máquinas operatrizes.

Os conceitos da mecatrônica têm mudado muito a maneira que os movimentos lineares das mesas das máquinas operatrizes são feitas. Porém, os movimentos angulares

ainda são geralmente feitos na maneira tradicional usando e controlando manualmente um mecanismo que consiste de uma coroa e um sem-fim. Um exemplo disto é o uso, ainda em

* Patente requerido

larga escala, do divisor mecânico que vem anexado às fresadoras universais. Será que este dispositivo não poderá ser melhorado usando as técnicas mecatrônicas?

A resposta à pergunta acima é afirmativo e este trabalho será um exemplo dos melhoramentos possíveis usando as técnicas de mecatrônica. Portanto, o objetivo deste trabalho é a elaboração de um indexador (ou divisor) mecatrônico que possui desempenho superior ao tradicional mecânico no sentido de melhor precisão, menor folga e menor atrito.

2. DESCRIÇÃO DO NOVO INDEXADOR MECATRÔNICO

Nas fresadoras de engrenagens, dois sem-fins, agindo um contra o outro (geralmente por molas) são usados para eliminar a folga. Devido ao alto esforço necessário exercido pelas molas, o atrito e, portanto, o desgaste são também altos. Esse mesmo objetivo pode ser conseguido usando dois sem-fins acionados por dois motores independentes controlados eletronicamente. Com isto, o atrito e a necessidade de alta precisão na coroa e nos sem-fins são minimizados. A explicação de como isto é conseguido é dada a seguir e está ilustrada na figura 1.

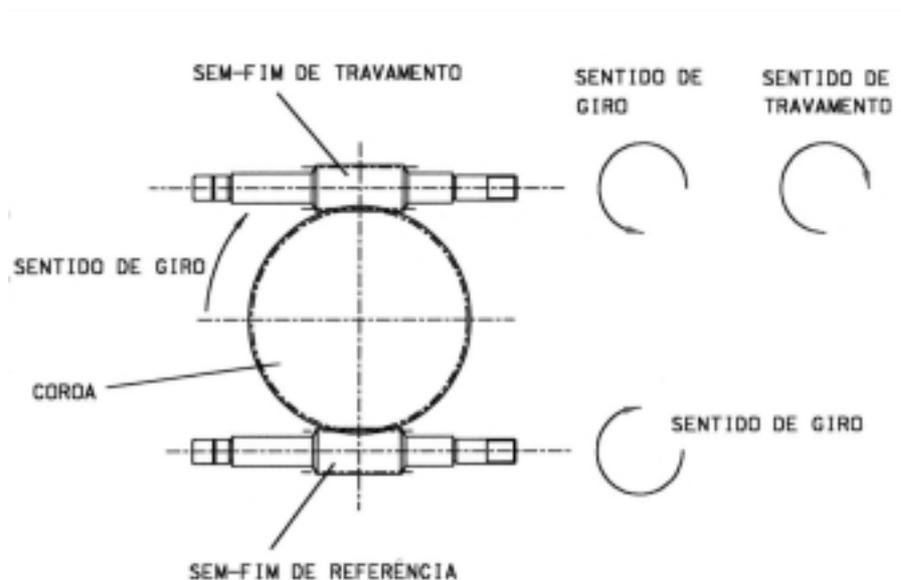


Figura 1- Montagem inovadora da coroa e dois sem-fins.

As funções dos dois sem-fins são as seguintes.:

A- Sem-fim de referência

Recebe essa denominação, por ser o elemento mecânico de engrenamento responsável pela indexação dos ângulos. Tem como finalidade movimentar a coroa, na direção indicada (figura 1), até a posição desejada. O sentido de giro deste sem-fim é horário nesta ilustração.

B- Sem-fim de Travamento

Este elemento mecânico de engrenamento tem a função de travar a coroa na posição desejada, eliminando completamente a folga. Ela é destravada primeiramente quando se deseja movimentar a coroa novamente. Este sem-fim possui dois sentidos de giro que tem as seguintes finalidades:

a) Movimento no sentido anti-horário: É quando se deseja o movimento da coroa. Nesta situação, como é mostrado na figura 1, o sentido de giro deve ser oposto ao do sem-fim de referência.

b) Movimento no sentido horário: É quando se deseja destravar ou movimentar a coroa. Nesta situação o sem-fim de referência se encontra parado na posição desejada e o sentido de giro do sem-fim de travamento é invertido (figura 1).

As regiões de engrenamento da coroa em movimento (figura 2.a e figura 2.b) ou travamento (figura 2.c), é ilustrado abaixo, representando assim o funcionamento do mecanismo coroa sem-fins.

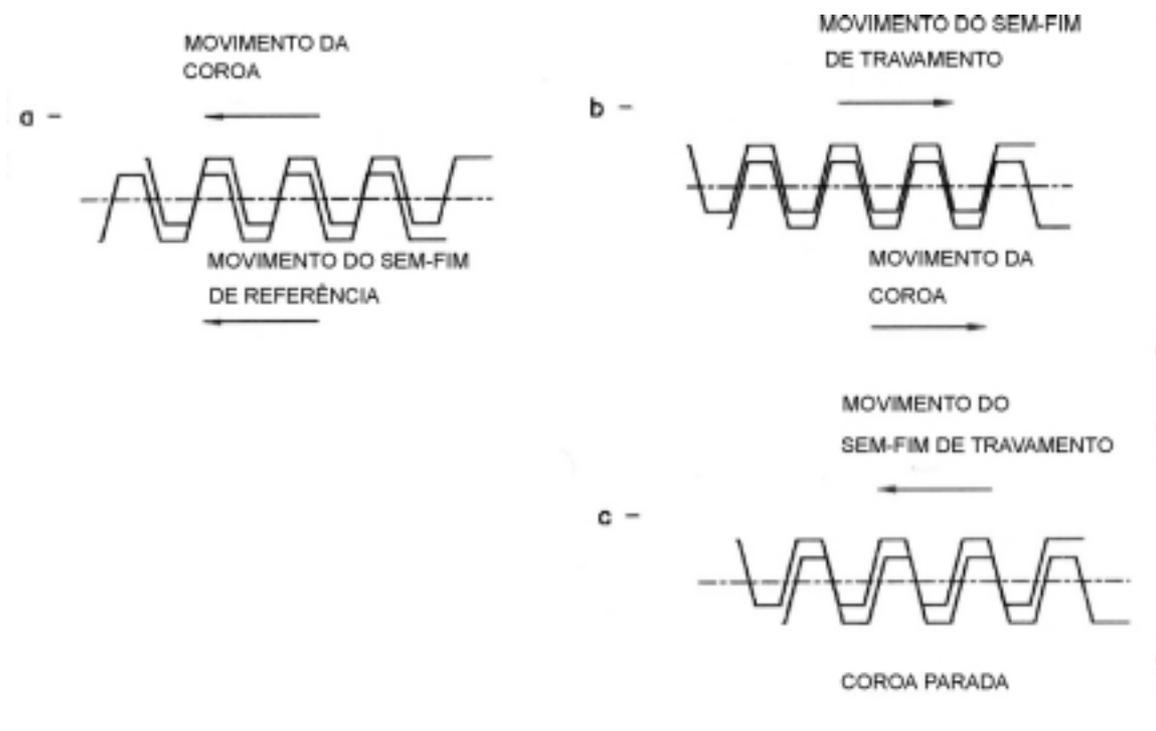


Figura 2- Ação dos sem-fins sobre a coroa

Para o movimento da coroa no sentido horário, é necessário que os dentes do sem-fim de referência atuem sobre a coroa (figura 2.a). Para que isto ocorra, o sem-fim de referência deve girar no sentido horário, e o sem-fim de travamento no sentido anti-horário (figura 1). Além disso, o dente do sem-fim de travamento deve manter uma folga mínima em

relação ao dente da coroa, para que não ocorra nenhum tipo de travamento indesejável (figura 2.b).

No início de um travamento, a coroa pára mas haverá folga entre ela e o sem-fim de travamento. Girando-se então o sem-fim de travamento no mesmo sentido do sem-fim de referência (figura 1) até onde for possível, o problema da folga é eliminado (figura 2.c).

A idéia de movimentos utilizando uma coroa e dois sem-fins controlados eletronicamente só foi possível devido a propriedade deste mecanismo ser auto-travante no sentido coroa sem-fim pois o ângulo de hélice é suficientemente pequeno. Isto permite que os movimentos de giro ocorram somente no sentido sem-fim coroa e nunca ao contrário, garantindo um posicionamento real do sem-fim de referência.

O funcionamento do novo mecanismo, como apresentado, seria extremamente complexo em construção unicamente mecânica. Porém, com a utilização de uma construção mecatrônica - como será descrito a seguir - torna-se, bastante simples, compacto, veloz e preciso.

É importante notar que, neste novo indexador, o atrito é quase completamente eliminado durante o posicionamento quando o sem-fim de travamento fica totalmente livre. Isto é completamente diferente das técnicas puramente mecânicas onde o alto atrito não-linear dificulta o correto posicionamento do cabeçote indexador (Slotine, 1991). Com isto, o desgaste do indexador será também minimizado, mantendo por muito mais tempo, a precisão do dispositivo.

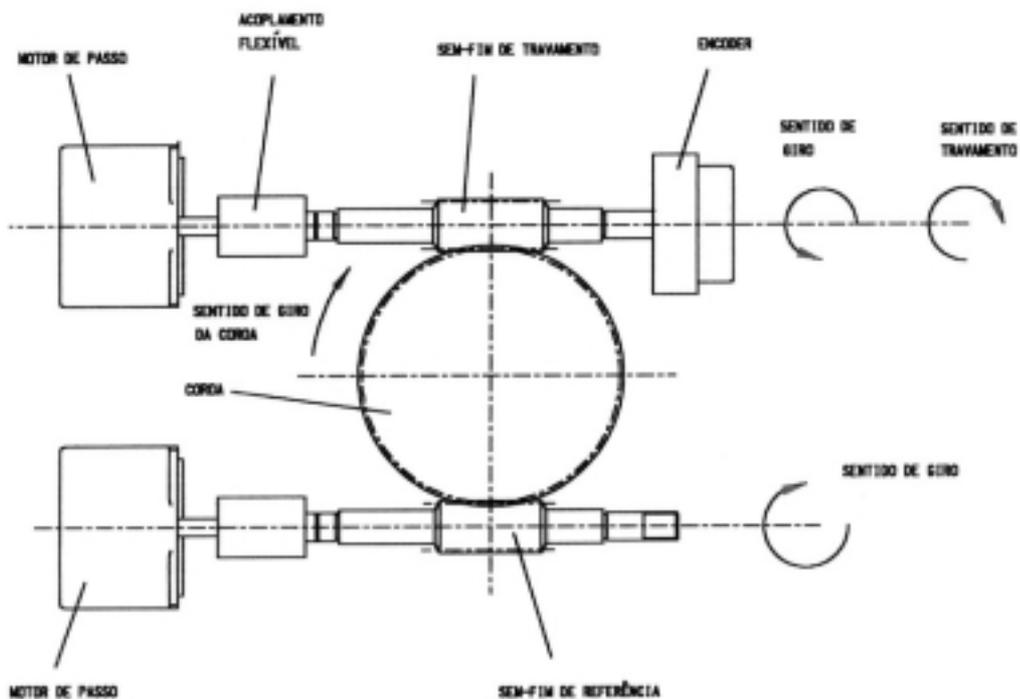


Figura 3- Posicionamento dos motores de passo, acoplamento flexível e do encoder.

A figura 3 acima mostra os seguintes elementos adicionados ao mecanismo coroa sem-fins:

A- Motor de passo de referência: Fixado na extremidade do sem-fim de referência, sendo responsável pela indexação angular e pelo torque na coroa.

B- Motor de passo de travamento: Fixado na extremidade do sem-fim de travamento, onde é o responsável pelo movimento de rotação horário e anti-horário para o travamento e destravamento com folga, respectivamente.

C- Acoplamento flexível: Responsável pela fixação do motor de passo com o sem-fim, compensando qualquer desalinhamento na montagem.

D- Encoder: Fixado na extremidade do sem-fim de travamento, permitindo o monitoramento dos passos do motor, parando-o antes da perda de sincronismo na operação de travamento.

Nesta etapa, uma característica importante do motor de passo é aproveitada no motor de passo; o torque residual quando está parado (“holding torque”). Atua como um poderoso freio segurando a carga quando o motor está parado e com a alimentação ligada.

O travamento garante uma boa repetibilidade de posicionamento do sistema. Sem este travamento, seria muito difícil posicionar o indexador pois existem folgas entre os dentes de engrenagens, erros de usinagem dos dentes da coroa e sem-fim, etc. A repetibilidade de posicionamento é de vital importância para uma correção via software.

(Embora neste projeto, o indexador só se movimenta num sentido (horário na figura 1) é muito fácil convertê-lo para movimentar e indexar em ambos os sentidos. Para isto basta acrescentar mais um encoder e modificar a programação do computador controlador).

3. MONTAGEM DO SISTEMA

A figura 4 mostra o esquema do Indexador Mecatrônico juntamente com o sistema de controle.

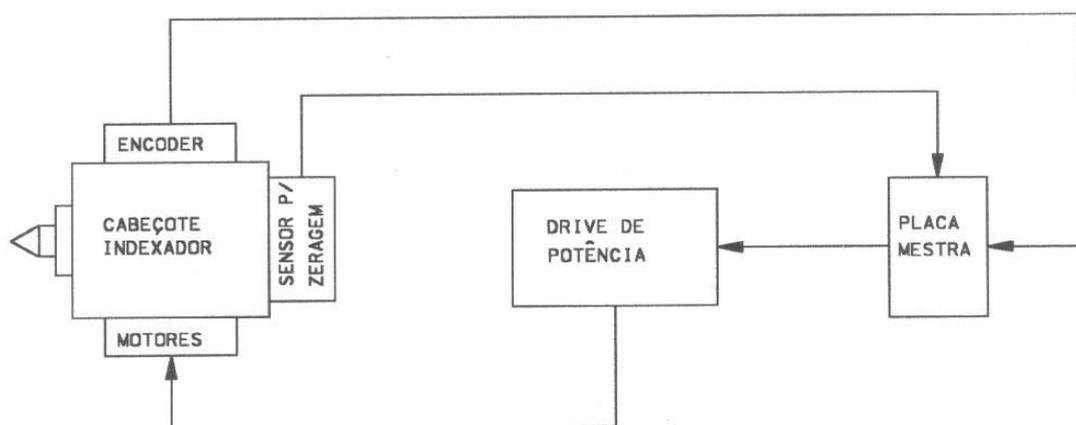


Figura 4- Esquema do Indexador e o seu controlador.

Na Placa Mestre de controle, a “CPU” usado foi o 8031 da Intel devido ao seu baixo custo. Porém qualquer outro microcontrolador de 8 bits poderá ser usado. Para facilitar a programação, um drive inteligente usando o L297 e L298N da National foi implementado.

4. MODELAGEM E VERIFICAÇÃO DOS ERROS

A precisão angular do cabeçote indexador está intimamente relacionado a erros no sistema como folgas, desalinhamentos, posição de montagem e ruídos entre outros, que inviabilizam seu correto funcionamento sem uma pré-correção.

Porém, uma boa correção só é possível se existir uma repetibilidade dos erros do sistema que permite uma montagem precisa do modelo matemático. Uma análise matemática para se chegar a um modelo seria bastante complexa, e menos precisa, uma vez que não há informações sobre todas as variáveis que afetam o posicionamento angular.

Uma solução para este problema seria a utilização da Transformada de Fourier, já que todos os movimentos do Indexador são periódicos. Desta maneira é possível desmembrar a curva de erros em somatória de senos e cossenos.

Através das funções FFT e IFFT encontrados no software MATLAB (1991), conseguiu-se um modelamento real dos erros numa forma bastante preciso, através dos dados obtidos diretamente do cabeçote indexador quando comparados ao divisor de precisão da “Zeiss” (exatidão de um segundo de arco).

O modelo obtido é o seguinte:

$$\text{Erro} = 0.0655 \cdot \sin(x - 0.3343) + 0.0038 \cdot \sin(108 \cdot x + 0.0574) - 0.0032 \cdot \sin(+34 \cdot x - 0.2483) - 0.0029 \cdot \sin(+2 \cdot x - 0.4367) + 0.0017 \cdot \sin(4 \cdot x - 1.070) + 0.0016 \cdot \sin(5 \cdot x - 0.0592) + 0.0248$$

A figura 5 mostra o gráfico desta equação com as seis componentes senoidais.

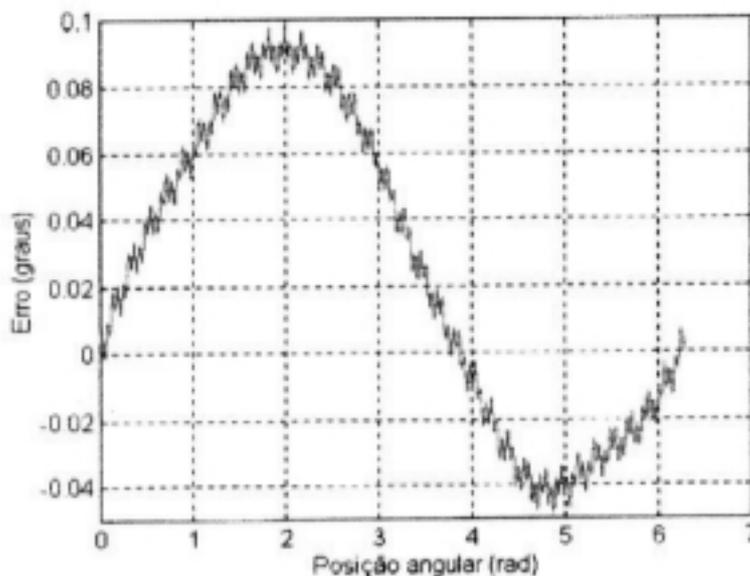


Figura 5- Gráfico do modelo.

A figura 6 mostra o gráfico do modelo sobreposto ao gráfico dos erros medidos experimentalmente através da coleta de 43200 posições angulares ou seja em incrementos de

30 segundos de arco para uma volta completa na saída do indexador. Nota-se claramente a validade do modelo.

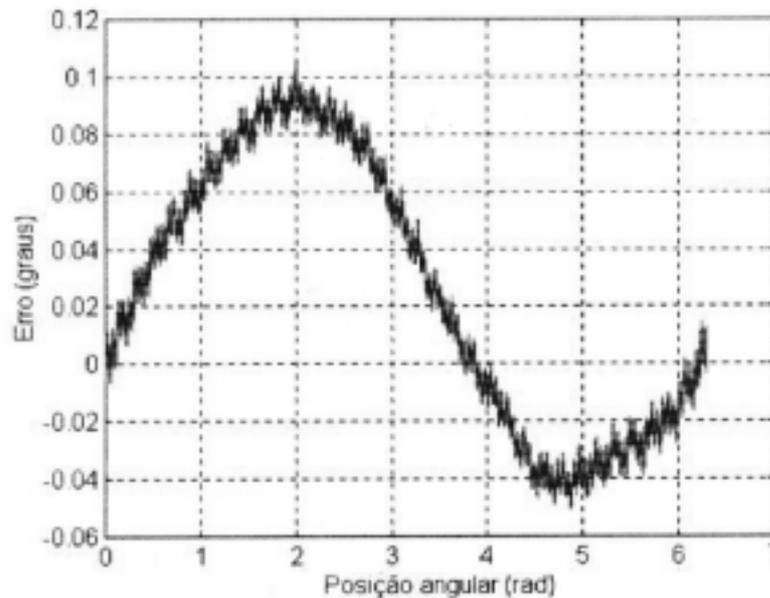


Figura 6- Gráfico, mostrando a validade do modelo.

5. VERIFICAÇÃO DA CORREÇÃO

Usando o modelo matemático dos erros, é possível corrigir as medições angulares. Essa correção é feita da seguinte forma:

1) Dado o ângulo desejado, θ_d (em graus), faz-se a primeira estimativa de número de passos, n_1 , do “stepping motor” necessários ($n_1 = \theta_d \cdot 120$).

2) Usando o modelo de erros, obtém-se o erro após dado n_1 passos.

$$\text{Erro} = 0.0655 * \sin(x - 0.3343) + 0.0038 * \sin(108 * x + 0.0574) - 0.0032 * \sin(+34 * x - 0.2483) - 0.0029 * \sin(+2 * x - 0.4367) + 0.0017 * \sin(4 * x - 1.070) + 0.0016 * \sin(5 * x - 0.0592) + 0.0248$$

Onde x é n_1 convertidos em radianos $\left(x = \frac{n_1 * \pi}{180 * 120} \right)$.

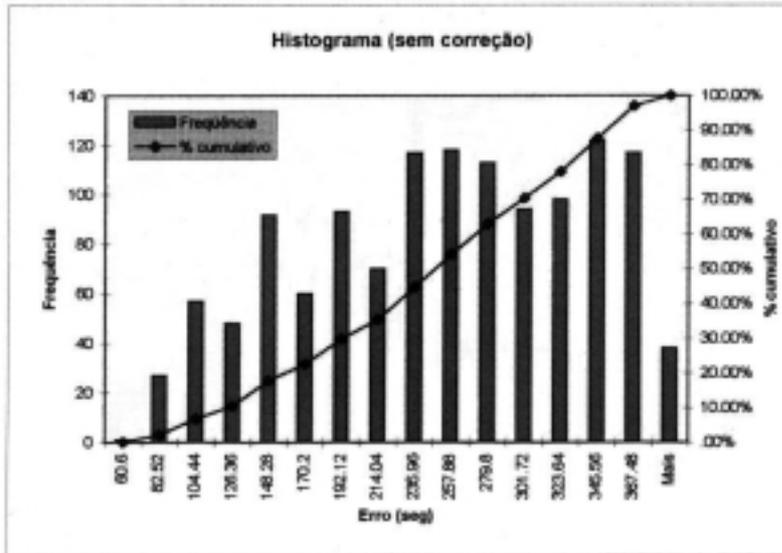
3) O ângulo rodado real, θ_r , é portanto, o seguinte:

$$\theta_r = \theta_d + \text{Erro}$$

Se $|\theta_r - \theta_d| \geq 15$ segundos, itera até atingir este objetivo. Porém, verifica-se que na prática, não há necessidade dessa iteração pois o objetivo é sempre conseguido na primeira iteração.

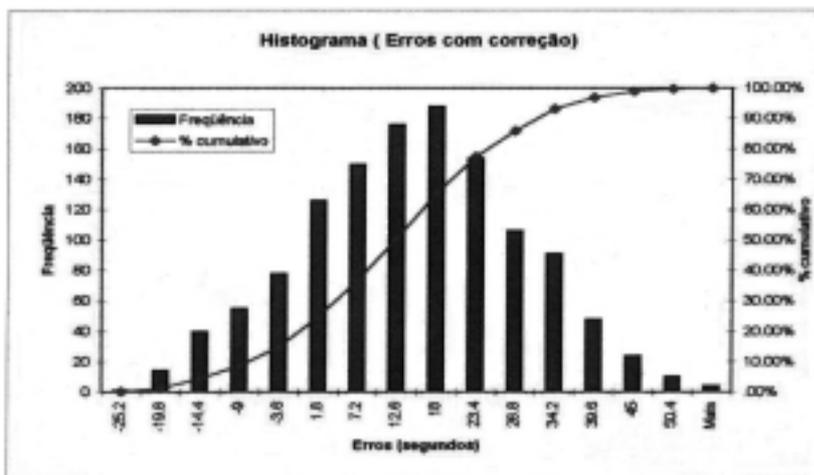
Uma idéia da exatidão de posicionamento do Indexador Mecatrônico pode ser obtida pelo seguinte exemplo: O Indexador foi zerado e incrementos de 0.36° foram feitos 250 vezes até atingir 90° cinco vezes seguidas. Os gráficos a seguir mostram os resultados destas 5 rodadas quando feitos sem a correção e com correção. A figura 7 mostra o histograma dos erros sem correção medidos no divisor “Zeiss”. A figura 8 mostra o histograma dos erros com correção medidos também no divisor “Zeiss”. O desvio padrão

médio (Spiegel, 1974) dos erros medidos foi reduzido de 83.3 segundos para 14.8 segundos, uma melhoria de 6 vezes. A figura 9 mostra graficamente essa redução.



Desvio padrão: 83.3 seg
 Média: 242.3 seg

Figura 7- Histograma dos erros sem correção.



desvio padrão: 14.8 seg
 média: 11.8 seg

Figura 8- Histograma dos erros com correção.

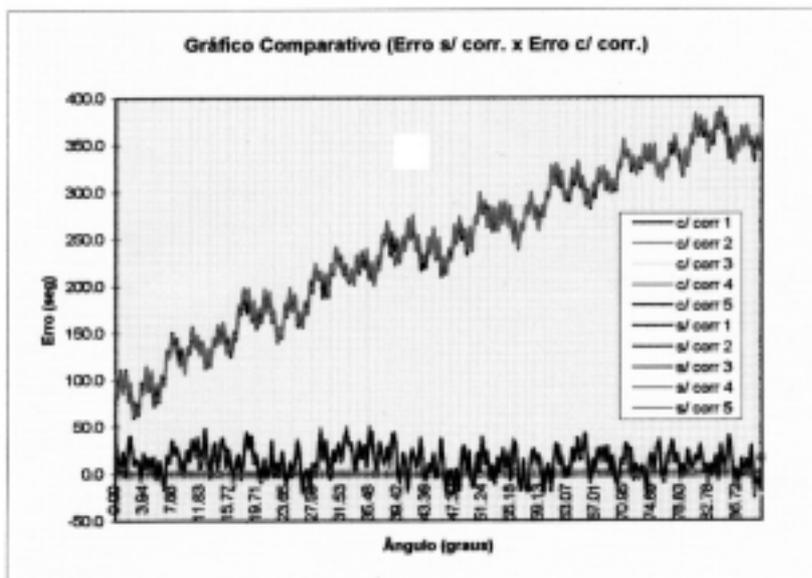


Figura 9- Gráfico comparativo entre os erros sem e com correção.

6- CONCLUSÕES E EXTENSÃO DO TRABALHO

A repetibilidade do novo mecanismo coroa e dois sem-fins em um cabeçote indexador mecatrônico mostra sua viabilidade como um futuro substituto dos divisores mecânicos tradicionalmente usados na mecânica. Isto só foi possível devido ao avanço da eletrônica e da informática, que possibilitaram ferramentas poderosas para o seu desenvolvimento. Várias dificuldades foram vencidas na programação e na construção mecânica e eletrônica do indexador. Agora, com a comprovação da repetibilidade e viabilidade de correção via software, será possível desenvolver um divisor muito mais preciso.

Uma extensão natural deste trabalho que irá melhorar muito a precisão, é substituir o drive atual de "half-step" por um drive de micro-steps. Isto irá diminuir a resolução em até 200 vezes com conseqüente aumento de exatidão para talvez 1 segundo de arco.

Atualmente, o novo posicionador angular só pode ser usado como um indexador. Usando servo-motores com realimentação será possível transformá-lo em um divisor angular contínuo de alta precisão. Isto será possível pois os efeitos de folga e variação não linear da força de atrito podem ser compensados usando sensores de torque. Com um encoder, a velocidade e posição do divisor poderá ser facilmente controlado.

No atual indexador, os rolamentos usados foram de precisão normal. Isto foi feito pois só se pretendia provar que o novo mecanismo de eliminar a folga e atrito mecatrônica realmente funciona. Agora, tendo certeza que o sistema é repetível e, portanto, suscetível a correção por software, pode-se aumentar a precisão usando rolamentos de precisão ISO-4 ou ISO-2. Isto irá melhorar, possivelmente, a precisão de giro, em uma ordem de grandeza.

Agradecimentos

A todos professores e colegas, do ITA, da Politécnica -USP e FATEC/SP os quais incentivaram e apoiaram no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bradley, D. A. & Dawson, D. & Burd, N. C. & Loader, A . J., 1991, Mechatronics Electronics in Products and Processes, Chapman and Hall, London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras, pp. 1.
- Bolton, W., 1995, Mechatronics Electronic Control Systems in Mechanical Engineering”, Longman, England, pp. 1.
- CARL ZEISS JENA GmbH, 1987, Manual do Usuário do Cabeçote Divisor TK1CS, Jena, R.F.A..
- Slotine, J. J. & Li, W., 1991, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., pp. 2, 4 e 158.
- Spiegel, M. R., 1974, Estatística, Editora McGraw-Hill, São Paulo, pp. 114.
- THE MATH WORKS Inc., 1991, MATLAB , Massachusetts, pp. 2-60.

DESIGN AND FABRICATION OF A MECHATRONIC INDEXING HEAD

***Abstract.** In this work, a novel mechatronic angular indexing drive has been designed, built and tested. Two stepping motors driving two worms engaged to the same gear are used for the indexing. One of the stepping motor is used for the actual indexing while the other is used to eliminate the backlash and to lock it in place. During indexing, the locking worm is released so that the drive can be turned with minimum friction. In this way, high repeatability was achieved by eliminating the effects of both backlash and the highly non-linear friction.*

The drive was calibrated on a high precision (1 arc-second accuracy) “Zeiss” Angular Dividing Head (1987). The periodic measured error was modeled by decomposing it into its Fourier components. A correcting algorithm using this mathematical model was incorporated into the drive software of the controlling microcomputer. A six-fold improvement in repeatability (or precision) was achieved; the standard deviation of the error, based on 250 test runs, was reduced to only 14.8 seconds.

***Key words:** Mechatronic dividing head, CNC indexer, Design, Fabrication, Verification*
