



TÉCNICAS DE PROJETO APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO DE UM MICROPOSICIONADOR ANGULAR

Luciana Montanari, Jaime Gilberto Duduch

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465 - 13560-254 São Carlos, SP, Brasil
e-mail: montanar@sc.usp.br

Juan Carlos Campos Rubio

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica
Av. Antônio Carlos 6627 - 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brasil

***Resumo.** Dentro da mecânica de precisão, a necessidade de se obterem sistemas posicionadores com resolução submicrométrica e alta repetibilidade é de extrema importância. Por outro lado, a utilização das modernas técnicas de metodologia de projeto auxiliam no desenvolvimento deste tipo de sistema. Através das técnicas de modelagem, pode-se verificar a funcionalidade de um sistema projetado, quanto ao seu comportamento estático e dinâmico. Neste trabalho, uma modelagem cinemática é apresentada com o objetivo de auxiliar na precisão do projeto de um posicionador angular para mecânica de precisão, através da qual pretende-se observar a influência de cada ponto de apoio no posicionamento final. São apresentados os resultados obtidos em simulações numéricas, as quais constatarem não só o próprio desempenho do posicionador, como também, a validade da técnica utilizada.*

***Palavras-chave:** Projeto, Ultraprecisão, Microposicionador, Cinemática, Atuadores*

1. INTRODUÇÃO

Indústrias de alta tecnologia como as de informática, microeletrônica, óptica e mecânica de precisão têm procurado constantemente desenvolver pesquisas em diversas áreas como as dos materiais, de instrumentação, de controle e fabricação, no intuito de produzir componentes e equipamentos cada vez mais precisos e de melhor qualidade.

À medida que as características metrológicas e de acabamento superficial tornam-se mais críticas, o desempenho da máquina-ferramenta cresce em importância. Desta forma, quando ingressamos no campo da mecânica de precisão, o desempenho desejado das máquinas-ferramenta destinadas à fabricação de componentes de elevada precisão de forma e rugosidade superficial (na faixa de 10 nm Ra; como por exemplo, moldes para lentes, discos de memória de computador, lentes e espelhos para sistemas ópticos), demandam a utilização de máquinas com melhor precisão de posicionamento, na ordem de nanômetros (Down et al., 1991; Hara et al., 1990 & Ikawa et al., 1991). Uma exigência muito comum para a

obtenção de espelhos para sistemas ópticos é a necessidade de movimentos com resolução de 0,01 µm livres de folga, num curso aproximado de 1-2 mm para cargas entre 20 e 2000 N (Langenbeck, 1992).

Os elementos mecânicos básicos que compõem uma máquina de ultraprecisão são os responsáveis diretos pela qualidade da usinagem. Devem apresentar elevada precisão, rigidez estática adequada e dinâmica e estabilidade dimensional, a fim de minimizar toda e qualquer fonte de erro. Essas características podem ser obtidas através da concepção correta do projeto e da definição dos materiais utilizados.

Este trabalho trata do desenvolvimento de um microposicionador angular, através da utilização de modernas técnicas de projeto, visando alcançar o máximo desempenho num arranjo o mais simplificado possível.

Propõe-se a utilização destes sistemas de microposicionamento modulares de alta resolução, capazes de posicionar elementos nas máquinas com um alto grau de exatidão e rapidez, auxiliando tanto no posicionamento relativo ferramenta/peça como na compensação de erros sistemáticos presentes. Para tanto, são abordados aspectos de metodologia de projeto e construção de um sistema de microposicionamento angular de alta rigidez e ampla largura de banda, capaz de posicionar uma superfície com uma resolução inferior a 4.10^{-5} graus.

2. METODOLOGIA DE PROJETO

A atividade de projeto de engenharia, embora representada por muitos séculos, praticamente não teve qualquer estrutura ou organização. Foi somente depois da metade deste século que houve uma tentativa para dar mais formalismo ao caminho para se chegar ao projeto, através dos métodos de projeto.

As metodologias de projeto foram sendo desenvolvidas ao longo dos anos, com a intenção de “...satisfazer as necessidades de ensino em projeto, organização de projeto, provisão de auxílio ao trabalho dos projetistas e automação das informações de projeto” (Finkelstein & Finkelstein, 1983). Todas elas sugerem um fluxo de atividades com base em etapas que devem ser seguidas pelo projetista para que se possa, a partir da definição da lista de requisitos de projeto, encontrar uma solução adequada para o problema em estudo. De uma forma geral, todas elas procuram levantar as demandas, estabelecer os requisitos de projeto, desenvolver o projeto conceitual, o projeto preliminar, o projeto detalhado e, assim, chegar à solução do problema (Maribondo et al., 1998).

Existem muitos caminhos para encontrar a solução do problema em estudo, ou seja, uma aproximação sistemática do projeto definitivo. Cada projetista tem um critério particular para esta fase, pois cada problema pode ter seu método específico de solução (Ruffino, 1991). Todas as técnicas desenvolvidas nesta área de metodologia de projeto são métodos sistemáticos para resolução de problemas, não somente para auxiliar na síntese de novos projetos, mas também para melhorar os projetos existentes (Mckeown, 1988). Pode-se destacar algumas destas técnicas desenvolvidas:

- *Árvores de decisão*
- *Método morfológico*
- *Sinergia*
- *PABLA (Problem Analysis by Logical Approach)*
- *Técnica de Inteligência Artificial*
- *Análise de valor*
- *Brainstorming*
- *Inversão*
- *Analogia*
- *Técnica da caixa preta*

- *Empatia*
- *Fantasia*

Sem dúvida, existem vantagens e desvantagens em cada uma das técnicas, mas pode-se dizer que, de uma forma geral, elas ajudam os projetistas a tomar as melhores decisões em todos os estágios do processo de projeto, envolvendo assim, todas as causas. Esses métodos exigem que muitos projetistas tomem parte simultânea no processo de projeto e asseguram a responsabilidade tanto na recuperação quanto na produção de projeto. Um possível perigo através do uso de metodologia de projeto é que, se não tratado cuidadosamente, pode sufocar a intuição e a criatividade.

A técnica de análise de valor é, provavelmente, o desenvolvimento mais importante nesta categoria, por ser uma análise extremamente técnica e lógica. Qualquer projeto que não for submetido a uma análise de valor apresenta baixo nível de qualidade (Mckeown, 1988). A principal função da aplicação da técnica de análise de valor é analisar um projeto detalhadamente e fazer as mudanças convenientes que resultam em grande eficiência. Essa análise pode ser realizada através da aplicação de conceitos matemáticos.

Neste trabalho, propõe-se a definição de uma metodologia de projeto para sistemas de microposicionamento de alta resolução.

Como forma de auxiliar na tomada de decisão, será utilizado o método de análise de valor, já que esta técnica oferece os recursos fundamentais para se obter com sucesso a resolução do problema. Aspectos como cinemática, acionamento, guias e apoios são estudados e confrontados.

3. ANÁLISE DE VALOR

Na Fig. 1 são exemplificados e descritos genericamente alguns dos princípios de funcionamento para posicionadores angulares.

Dentre os vários tipos construtivos em estudo, através das suas características (variantes), será feita uma análise de valor, visando obter o sistema com melhor funcionalidade e desempenho dinâmico. O método de análise de valor dos tipos construtivos em estudo é a avaliação multivalente que analisa as variantes técnicas (características) em relação à função necessária para a realização da tarefa, neste caso, um sistema de posicionamento. As variantes são comparadas a um conjunto de critérios relacionados à função, dando-se pesos a estes critérios. Neste caso, o valor global da variante é determinada pela Eq. 1 (Pahl & Beitz, 1996).

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot g_j}{p_{max} \cdot \sum_{j=1}^n g_j} \quad (1)$$

onde:

x_i - valor global da variante i ; p_{ij} - valor parcial da variante i em relação ao critério j ; g_j - peso do critério j ; p_{max} - valor máximo de todas as variantes.

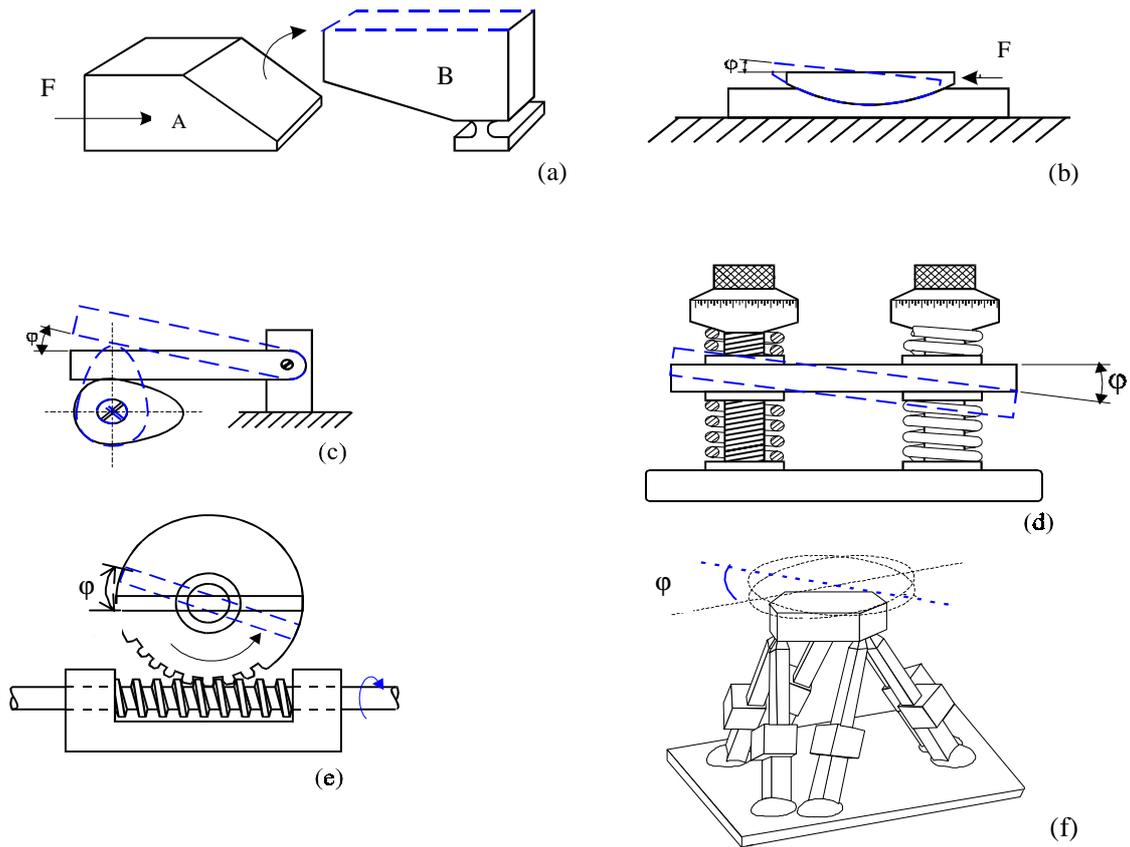


Figura 1 - Tipos construtivos de posicionadores angulares - (a) cunha de encosto angular, (b) cunha de apoio semi-esférico, (c) transmissão por came, (d) posicionador micrométrico diferencial, (e) transmissões rotativas, (f) plataforma de Stewart.

A Tabela 1 mostra os critérios de avaliação e os seus respectivos pesos. Os pesos são dados de acordo com a experiência do projetista e a necessidade do projeto.

Tabela 1: Fatores de importância

número	Critérios de avaliação	Pesos g_j
1	resolução	5
2	facilidade construtiva	4
3	eliminação de folgas	4
4	dinâmica	3
5	facilidade de controle (sensoreamento)	3
6	custos	2
7	capacidade de carga	2
8	curso/giro (máximo)	2
Somatório (Σ)		25

A Tabela 2 mostra o valor global dos tipos construtivos em estudo.

Tabela 2: Determinação do valor global do posicionador

número	Variantes											
	a (v ₁)		b (v ₂)		c (v ₃)		d (v ₄)		e (v ₅)		f (v ₆)	
	p _{1j}	g _j ·p _{1j}	p _{2j}	g _j ·p _{2j}	p _{3j}	g _j ·p _{3j}	p _{4j}	g _j ·p _{4j}	p _{5j}	g _j ·p _{5j}	p _{6j}	g _j ·p _{6j}
1	5	25	4	20	3	15	4	20	3	15	5	25
2	4	16	2	8	3	12	4	16	2	8	1	4
3	4	16	3	12	3	12	4	16	2	8	4	16
4	2	6	1	3	1	3	3	9	1	3	3	9
5	3	9	1	3	2	6	3	9	2	6	1	3
6	2	4	1	2	2	4	2	4	1	2	1	2
7	1	2	1	2	1	2	1	2	2	4	1	2
8	1	2	1	2	1	2	1	2	2	4	1	2
Σ		80		52		56		78		50		63
Valor global		0,640		0,416		0,448		0,624		0,400		0,504

As variantes de (a) a (f) da Tabela 2 correspondem aos tipos construtivos da Fig. 1(a) a (f).

Observando a Tabela 2, através do valor global, verifica-se que o sistema que mais se adequa ao projeto é o sistema (a). Porém, percebe-se que os valores globais dos sistemas (d) e (f) se aproximam deste sistema.

Uma opção híbrida, a qual se baseia no aproveitamento das características vantajosas das opções (a), (d) e (f), certamente terá resultados de melhor desempenho e características de maior flexibilidade. Este posicionador apresenta como características básicas a utilização de apoio cinemático, (três pontos, ver Fig.1(a) e (f)), um conjunto com mancais de flexão como a Fig. 1(a), acionados por meio de atuadores translativos como a Fig. 1(d) (movimento translativo na direção vertical).

Uma modelagem cinemática é apresentada com o objetivo de auxiliar na validade do projeto do posicionador angular, através da qual pretende-se observar a influência de cada ponto de apoio no posicionamento final.

4. MODELAGEM CINEMÁTICA

Assim como no estudo cinemático de robôs manipuladores, um sistema de posicionamento angular pode ser representado como um conjunto de articulações justapostas sujeitas às translações e rotações encontradas no instrumento de acordo com a sua configuração.

As rotações e translações presentes na cinemática do mecanismo podem ser expressas através de matrizes de transformação homogênea, de forma a descrever os deslocamentos angulares do posicionador em função dos deslocamentos dos atuadores.

4.1. Descrição dos movimentos para os atuadores

A modelagem do microposicionador angular deve ser realizado utilizando-se transformação homogênea a partir da descrição do mecanismo de acordo com a Fig. 2.

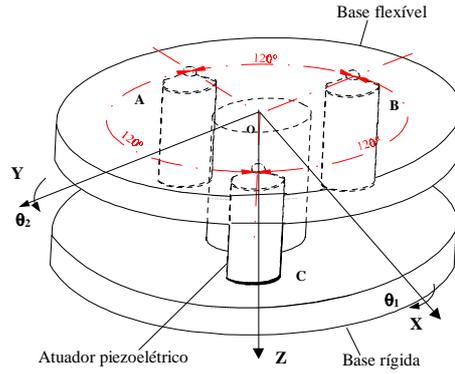


Figura 2 – Esquema do posicionador angular.

O posicionador angular consiste de uma base flexível sobre uma base rígida, onde também são fixados três atuadores piezoelétricos a uma distância l do centro e distantes 120 graus entre si.

4.2. Descrição dos movimentos para os atuadores

Considere inicialmente o atuador B colocado sobre o eixo Y, a uma distância $-l$ do centro do posicionador. A equação do movimento relativa a este atuador pode ser obtida através dos movimentos do sistema relativo, inicialmente coincidente com o sistema absoluto, de tal forma que o plano relativo xy fique paralelo ao plano XY do sistema absoluto. Do mesmo modo, aplica-se tal procedimento aos atuadores A e C, a fim de encontrar um conjunto de equações. Através da aplicação de matrizes de transformação homogênea pode-se descrever o movimento dos atuadores de uma posição inicial à posição desejada (Montanari, 1999). As equações obtidas através dos movimentos dos atuadores são:

Atuador A

$$X_A = -l \sin 60^\circ + l \cos \theta_2 \sin 60^\circ - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (01)$$

$$Y_A = 2l \cos 60^\circ \sin^2 \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \cos \theta_2 \quad (02)$$

$$Z_A = -dA - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 - l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (03)$$

Atuador B

$$X_B = l \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (04)$$

$$Y_B = -2l \sin^2 \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \cos \theta_2 \quad (05)$$

$$Z_B = -dB + l \sin \theta_1 \cos \theta_2 \quad (06)$$

Atuador C

$$X_C = l \sin 60^\circ - l \cos \theta_2 \sin 60^\circ - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (07)$$

$$Y_C = 2l \cos 60^\circ \sin^2 \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \cos \theta_2 \quad (08)$$

$$Z_C = -dC - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (09)$$

onde:

dA , dB e dC – deslocamento dos atuadores A, B e C

Assim como nos problemas cinemáticos que consideram múltiplos graus de liberdade, a análise cinemática do mecanismo proposto não está representada numa forma que possibilita diretamente a obtenção das coordenadas X_n , Y_n e Z_n a partir de θ_1 , θ_2 , dA , dB e dC . Ao contrário, é necessário um processo iterativo para determinar as coordenadas de posição do ponto de controle a partir das entradas dos atuadores. Felizmente, o problema conhecido como cinemática inversa pode ser aplicado. Neste caso, pode-se obter um conjunto de equações que relacionam as entradas dos atuadores A, B, C com as variáveis θ_1 , θ_2 , X_n , Y_n e Z_n .

Então, dadas as equações para os três atuadores, podem-se obter as equações de controle do mecanismo.

A componente Z_n representa a componente de deslocamento do centro do posicionador na direção Z, e portanto, é igual à variável d .

A fim de obter as equações de controle do mecanismo, a componente Z_n pode ser escrita na forma:

$$d = -dA - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 - l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (10)$$

$$d = -dB + l \sin \theta_1 \cos \theta_2 \quad (11)$$

$$d = -dC - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (12)$$

Reescrevendo as equações (10), (11) e (12), em função do deslocamento dos atuadores, tem-se que:

$$dA = -d - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 - l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (13)$$

$$dB = -d + l \sin \theta_1 \cos \theta_2 \quad (14)$$

$$dC = -d - l \cos 60^\circ \sin \theta_1 \cos \theta_2 + l \sin 60^\circ \sin \theta_2 \quad (15)$$

onde:

d – translação do ponto central do posicionador na direção Z;

θ_1 – giro com relação ao eixo X;

θ_2 – giro com relação ao eixo Y.

Portanto, estas equações podem ser usadas para determinar as entradas de controles necessárias dA , dB , dC para alcançar determinada posição do posicionador. Pode-se observar que para as equações anteriores existe uma correspondência única das saídas com relação às entradas, por exemplo, para qualquer dA , dB , dC existe somente uma posição do ponto de controle, ou seja, d , θ_1 , θ_2 e vice-versa.

Como forma de avaliar a funcionalidade do sistema mecânico, assim como a validade das equações cinemáticas do sistema são apresentados a seguir alguns resultados obtidos a partir de simulações numéricas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações correspondem às variações nos ângulos θ_1 e θ_2 (Fig. 2) dentro do volume de trabalho, de forma a observar os movimentos nos atuadores A, B e C permitindo, desta forma, a realização de uma trajetória pré-determinada.

De acordo com as suposições e equações apresentadas no item anterior, as simulações a seguir foram realizadas no referencial absoluto, considerando $d=constante=0$ (lembrando que d é a translação do ponto central do posicionador na direção Z). Outra consideração feita foi admitir inicialmente $l=40$ mm (distância dos atuadores até o centro do posicionador).

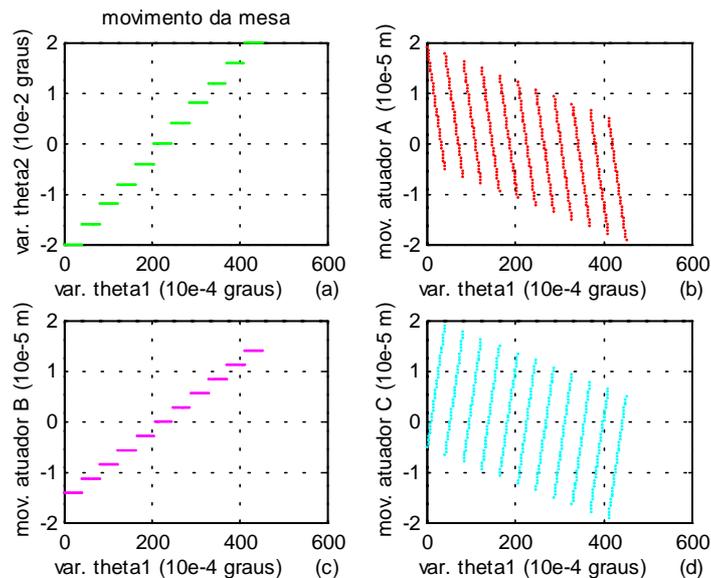


Figura 3 – Variação dos ângulos θ_1 e θ_2

Pode-se observar através da análise da Fig.3(a) que os ângulos θ_1 e θ_2 variam dentro da faixa de estudo (± 0.02 graus), onde para cada variação de θ_1 (0.004 graus) o ângulo θ_2 varia na faixa estabelecida. Observando as Fig. 3(b) e (d) percebe-se que os atuadores A e C têm a mesma amplitude de movimento de acordo com as variações dos ângulos θ_1 e θ_2 . E ainda, as trajetórias aparecem de forma contrária. Isso se deve ao fato de que os atuadores A e C terem o sentido de acionamento contrário.

Analisando a Fig. 3(c), verifica-se que o atuador B movimentam-se de acordo com a variação do ângulo θ_1 . Isto é explicado pela localização do atuador B em relação aos eixos de referência. Através da análise das Fig. 3(b), (c) e (d), pode-se observar que os atuadores movimentam-se na faixa de $\pm 2.10^{-5}$ m para as respectivas variações dos ângulos θ_1 e θ_2 , respeitando, desta forma, os limites estabelecidos para o curso máximo dos atuadores piezoelétricos.

Uma outra verificação extremamente esclarecedora, quanto à funcionalidade do sistema e da utilidade das equações cinemáticas, corresponde à variação do ângulo θ_1 mantendo fixo o ângulo θ_2 . E os resultados podem ser observados nos gráficos da Fig. 4.

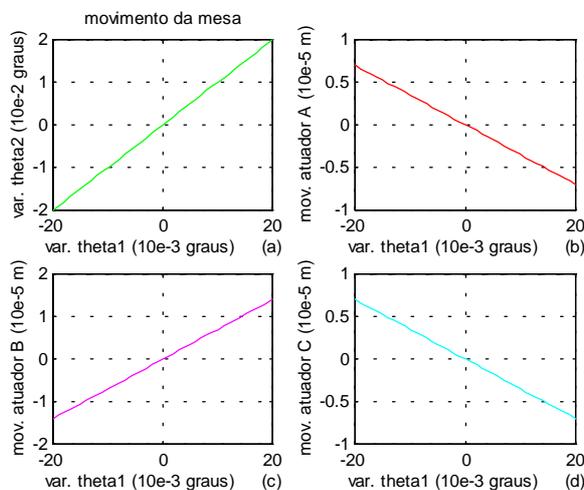


Figura 4 – Fixação do ângulo θ_2 e variação do ângulo θ_1

A Fig. 4(a) mostra a variação do ângulo θ_1 dentro da faixa estabelecida (± 0.02 graus).

Através da análise das Fig. 4(b) e (d), pode-se observar que o ângulo θ_2 permanece constante, isso é resultante da relação direta que os atuadores A e C têm com o este ângulo. Então o movimento relativo entre os atuadores permanece constante. Da mesma forma, nota-se que o atuador B movimentar-se de acordo com a variação do ângulo θ_1 , isso pode ser observado analisando a Fig. 4(c).

Um próximo passo neste estudo, corresponde à realização de movimentos angulares, onde o ângulo θ_1 permanece fixo e somente o ângulo θ_2 sofre variações dentro da faixa estabelecida (± 0.02 graus). Os resultados podem ser observados nos gráficos da Fig. 5.

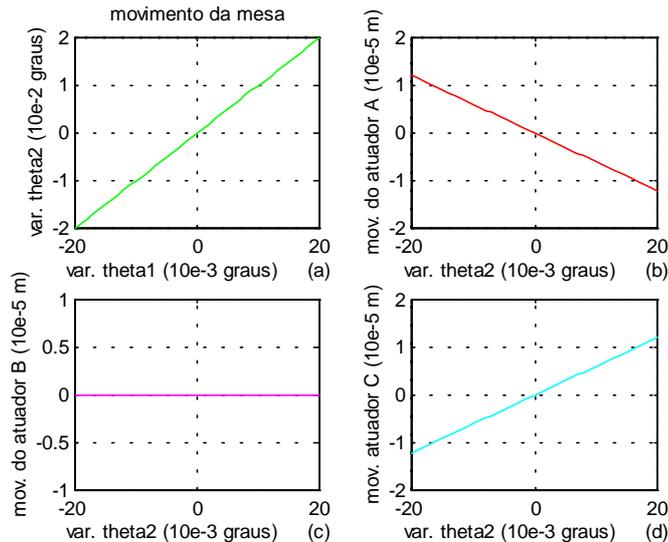


Figura 5 – Fixação do ângulo θ_1 e variação do ângulo θ_2

Através de uma rápida análise da Fig. 5, nota-se a variação do ângulo θ_2 dentro da faixa ± 0.02 graus.

Através das Fig. 5(b) e(d), pode-se verificar que os atuadores movimentam-se na faixa de $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ m de acordo com as variações do ângulo θ_2 . Pode-se destacar ainda, analisando essas mesmas figuras que enquanto o atuador A desloca-se no sentido de $\pm 20 \mu\text{m}$, o atuador C desloca-se em sentido contrário ao atuador A.

A Fig. 5(c) mostra que o atuador B está diretamente relacionado ao ângulo θ_1 . Como este permanece fixo, o atuador B permanece fixo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo das técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um microposicionador angular, visando sua utilização no posicionamento de peças/ferramentas na usinagem de ultraprecisão.

As principais características técnicas do arranjo obtido são as seguintes:

- permitir o posicionamento dos mais diversos sistemas em máquinas, instrumentos ou aparelhos de Mecânica de Precisão, através dos seus três graus de liberdade (um de translação e dois de rotação);
- o projeto agrupa as características vantajosas da utilização de acionamento direto, via atuadores piezoelétricos, com guias/mancais de mola, numa arquitetura que oferece facilidade de construção.

Dentre as conclusões gerais referentes ao desenvolvimento deste trabalho, pode-se ressaltar a utilização das técnicas de projeto na concepção do posicionador.

Como forma de avaliar a funcionalidade e desempenho geométrico do protótipo, um estudo cinemático do arranjo foi realizado através da modelagem das trajetórias a serem percorridas pelo sistema, obtendo-se equações que representam os deslocamentos necessários nos atuadores para correção angular do posicionador, permitindo melhor funcionalidade e sua utilização em algoritmos específicos.

REFERÊNCIAS

- Down, T., Miller, M. & Falter, P., 1991, Application of fast tool servo for diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces, *Precision Engineering*, vol. 13, n. 4, pp. 461-463.
- Finkelstein, L. & Finkelstein, A. C. W., 1983, Review of design methodology, *IEE Proceedings*, vol. 130, n. A4, jun., 1983.
- Hara, Y., Motonishi, S & Ioshida, K., 1990, A new micro-cutting device with high stiffness and resolution, *Annals of the CIRP*, vol. 39, n. 1, pp. 375 – 378.
- Ikawa, N., Donaldson, R. R., Komanduri, R., Koeng, W. & Aachen, T. H., 1991, Ultraprecision metal cutting - The past, the present and the future, *Annals of the CIRP*, vol. 40, n. 2, pp. 587 – 594.
- Langenbeck, P., 1992, Ultrafine infeed control, *Precision Engineering*, vol. 14, n. 1, pp. 43-46.
- Maribondo, J. F, Back, N. & Forcellini, F. A., 1998, A fundamentação e as perspectivas de projeto de produtos modulares. In: V Congresso de Engenharia Mecânica – Norte/Nordeste, Outubro, Fortaleza, vol. 1, pp. 86 – 93.
- Mckeown, P., 1988, The engineer the design function product innovation and quality aspects of design. Cranfield Institute of Technology, UK.
- Montanari, L., 1999, Técnicas de projeto aplicadas no desenvolvimento de um microposicionador angular, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Pahl, G. & Beitz, W., 1996, *Engineering design: A systematic Approach*, Springer-Verlag London Limited, Great Britain.
- Ruffino, R. T., 1991, Técnicas de Projeto, Apostila curso de pós-graduação em engenharia mecânica – USP – Escola de Engenharia de São Carlos.

Title. Design techniques applied to the development of an angular micro-positioner

Abstract. In order to achieve high performance in ultra-precision machine tools, appropriate capability is required from motion control and positioning systems which have to operate at resolutions and repeatability in the sub-micrometre range. Modern design techniques can greatly assist in the development and design of such systems. In this work, several design options for the elements of a positioning system are discussed and analysed. Through modelling techniques, it is possible to verify the static and dynamic behaviour of the system. A kinematics model of the micro-tilt stage is presented in order to establish a relationship between the displacement of the actuators and the final position of the stage. Simulations of the model are performed showing that the technique applied is valid and the system fulfils the requirements for ultra-precision design.

Keywords: *Design; Ultra-precision, Micro-positioning, Kinematics, Actuators*