

## PLATAFORMA MÓVEL PARA UTILIZAÇÃO EM CENTROS DE LAZER COMO SIMULADOR DE VÔO

**Tarcisio A. Hess Coelho**

**André M. Oura**

**Ricardo S. Yamamoto**

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecânica

Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508-900 - São Paulo, SP, Brasil

endereço eletrônico: [tarchess@usp.br](mailto:tarchess@usp.br)

**Resumo.** Na área de entretenimento, os simuladores que agregam movimentos vem aumentando a sua participação e se mordenizando nos principais parques e centros de lazer. Diferentemente dos simuladores profissionais que, na sua maioria, necessitam de seis graus de mobilidade para caracterizar o comportamento de um corpo no espaço, os simuladores para centros de lazer podem possuir um número menor de graus dependendo da sua aplicação. Este artigo apresenta uma plataforma móvel, que nada mais é do que um mecanismo de cadeia cinemática fechada, formando um estrutura paralela com colunas de comprimento variável. A variação controlada dos comprimentos destas colunas permite impor ao usuário acomodado no assento da plataforma, sensações de vôo devidas ao movimento de uma aeronave. O trabalho aborda o desenvolvimento de um modelo computacional do simulador - empregando MATLAB como ambiente de trabalho - que realize a sua análise cinemática inversa, ou seja, definido o movimento da aeronave, o programa calcula, em cada instante, os deslocamentos a serem impostos a cada um dos atuadores. Além disto, o modelo fornece também as forças presentes nos atuadores, necessárias para suportar a massa suspensa durante a sua movimentação.

**Palavras-chave:** Mecanismos, Robótica, Modelagem, Simulação.

### 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os simuladores desempenham uma função importante no treinamento de pilotos de aeronaves e espaçonaves. Estes equipamentos, devido à sua aplicação, devem caracterizar o movimento de um corpo no espaço e, portanto devem permitir seis movimentos independentes da cabine do piloto. Por outro lado, na área de entretenimento, os simuladores para centros de lazer podem possuir um número menor de graus de mobilidade. Simuladores para esta finalidade podem ser construídos para permitir dois, três ou, eventualmente, quatro movimentos independentes. Além de permitir um determinado número de movimentos

independentes, os simuladores pertencem à classe dos mecanismos de cadeia cinemática fechada.

As vantagens dos mecanismos de cadeia cinemática fechada (fig.1) sobre os de cadeia aberta (fig.2) são menor inércia, maior rigidez, melhor desempenho dinâmico (possibilidade de funcionamento em altas velocidades), maior repetibilidade, maior precisão de posicionamento e orientação, sendo que os erros nos seus pares cinemáticos não são aditivos. As desvantagens são menor volume de trabalho, maior complexidade da análise cinemática direta (Souza, 1997).

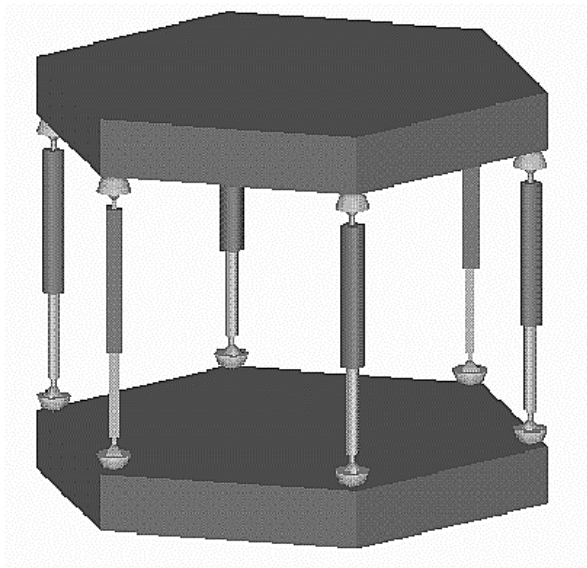


Figura 1 - Cadeia cinemática fechada.

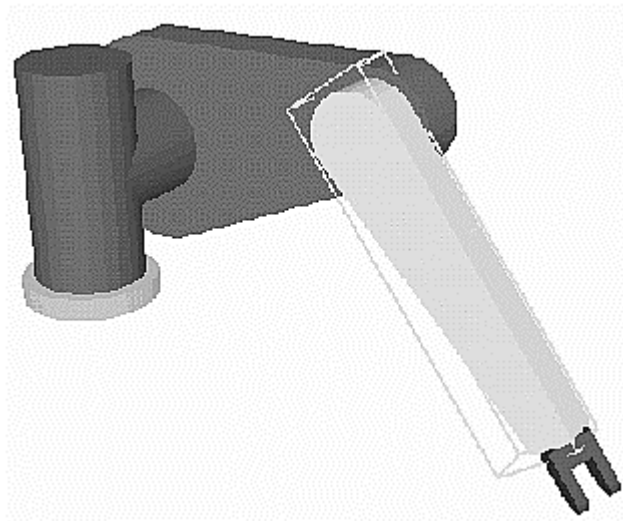


Figura 2 - Cadeia cinemática aberta.

As aplicações dos mecanismos de cadeia cinemática fechada, além da sua utilização em simuladores de vôo, são inúmeras: treinamento de operadores de retro-escavadeiras (Salcudean et alii, 1994), centros de usinagem (Kohl, 1994), aparelhos médicos e cirúrgicos (Lazarevic, 1997).

Este artigo apresenta um tipo de plataforma móvel, que nada mais é do que um mecanismo de cadeia cinemática fechada, formando um estrutura paralela com colunas de comprimento variável. A variação controlada dos comprimentos destas colunas permite impor ao(s) usuário(s) acomodado(s) no assento da plataforma, sensações de vôo devidas ao movimento de uma aeronave prevendo sua utilização num centro de lazer.

## 2. TIPO DE PLATAFORMA MÓVEL

A estrutura selecionada para o simulador é um tipo particular de mecanismo de cadeia cinemática fechada com quatro graus de mobilidade (fig.3). Consiste de uma base fixa, uma plataforma móvel, quatro colunas de comprimento variável, além dos pares cinemáticos que unem estas peças. A plataforma é sustentada pelas colunas, que são formadas por atuadores prismáticos (P). Construtivamente, os atuadores prismáticos podem ser pneumáticos, hidráulicos ou ainda, constituídos por motores elétricos de corrente contínua e fusos de esferas recirculantes. Além dos pares prismáticos (P) presentes nas colunas, encontram-se também no mecanismo os pares esféricos (S), de revolução (R), e de dupla-revolução (R').

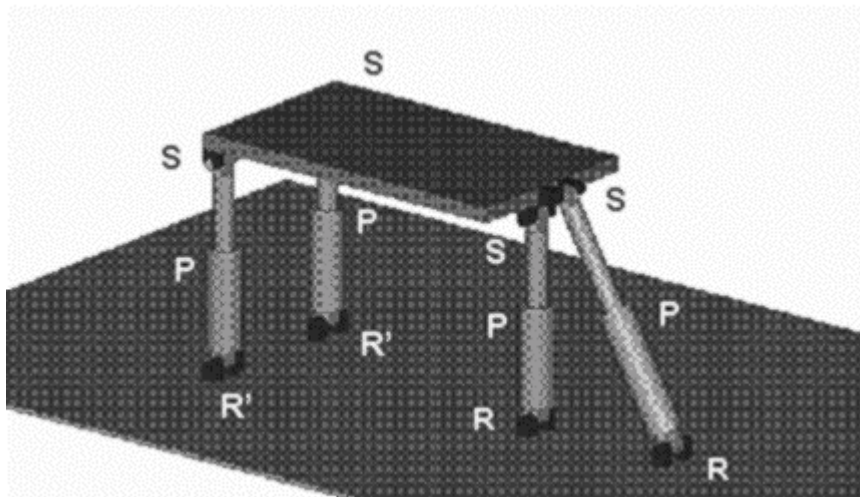


Figura 3 - Esquema cinemático do simulador.

## 3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Os tópicos tratados na modelagem matemática são verificação do número de graus de mobilidade da plataforma, equações da análise cinemática inversa e da análise cineto-estática.

Com relação ao número de graus de mobilidade, eles podem ser determinados pela aplicação do critério de Grübler (Shigley & Uicker, 1981) que define que

$$G.M. = 6.(n - 1) - \sum_{j=1}^5 (n - j).n_{pj} \quad (1)$$

onde  $n$  é o número de peças e  $n_{pj}$ , o número de pares de cinemáticos que permitem  $j$  graus de liberdade. No caso deste mecanismo,  $n$  vale 10,  $n_{p1}$  é igual a 6 (2R e 2P),  $n_{p2}$  vale 2 (2R'),  $n_{p3}$  é igual a 4 (4S), o que resulta em 4 graus de mobilidade. Os movimentos independentes são translação em "x" e "z" (fig.4), e rotação em "x" e "y" (fig.5).

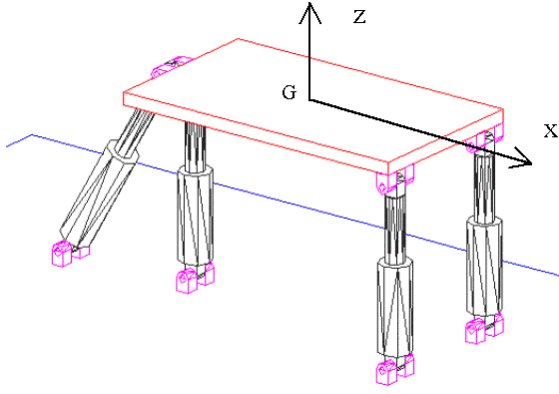


Figura 4 - Eixos de translação



Fig. 5 - Eixos de rotação

A análise cinemática inversa é necessária para a determinação dos deslocamentos nos quatro atuadores em função dos movimentos impostos à plataforma, sejam estes de translação e/ou rotação, obedecendo a uma sequência especificada. Admitem-se conhecidas as coordenadas iniciais dos pontos A, C, D e G, pertencentes à plataforma (fig.6), a sua largura e comprimento, as velocidades e acelerações máximas de translação e rotação. Uma vez especificados os movimentos e a sua sequência, as coordenadas finais dos pontos A, C, D e G devem ser determinadas.

Considere-se, por exemplo, a seguinte sequência de movimentos e correspondentes deslocamentos:

- (I) Movimento de translação em “z”, deslocamento linear “h”;
- (II) Movimento de rotação em torno de “x”, deslocamento angular “ $\theta_x$ ”;
- (III) Movimento de rotação em torno de “y”, deslocamento angular “ $\theta_y$ ”.

As coordenadas finais de G, A, C e D são dadas pelas equações

$$(G - O) = (G_{inicial} - O) + h\vec{k} \quad (2)$$

$$(A - O) = (G - O) - \frac{L}{2} \cos(\theta_y)\vec{i} + \frac{L}{2} \sin(\theta_y)\vec{k} \quad (3)$$

$$(C - O) = (G - O) + \frac{L}{2} \cos(\theta_y)\vec{i} + \frac{L}{2} \cos(\theta_x)\vec{j} + \left[ \frac{L}{2} \sin(\theta_x) - \frac{L}{2} \sin(\theta_y) \right] \vec{k} \quad (4)$$

$$(D - O) = (G - O) + \frac{L}{2} \cos(\theta_y)\vec{i} - \frac{L}{2} \cos(\theta_x)\vec{j} + \left[ -\frac{L}{2} \sin(\theta_x) - \frac{L}{2} \sin(\theta_y) \right] \vec{k} \quad (5)$$

Os deslocamentos dos atuadores “a”, “b”, “c” e “d” são obtidos a partir das equações

$$d_a = \|A - A_o\| - \|A_{inicial} - A_o\| \quad (6)$$

$$d_b = \|B - B_o\| - \|B_{inicial} - B_o\| \quad (7)$$

$$d_c = \|C - C_o\| - \|C_{inicial} - C_o\| \quad (8)$$

$$d_d = \|D - D_o\| - \|D_{inicial} - D_o\| \quad (9)$$

onde  $A_o$ ,  $B_o$ ,  $C_o$  e  $D_o$  são os centros dos pares cinemáticos que conectam as extremidades inferiores das colunas à base,  $L$  é o valor tanto da largura quanto do comprimento da plataforma e  $O$  é a origem do sistema de referência  $Oxyz$  fixo à base. Nas equações anteriores, admitiu-se que a coordenada inicial “z” de todos os pontos da plataforma fosse a mesma, que os pontos C e D estejam inicialmente sobre um eixo paralelo a “y” e que A e G estejam sobre um eixo paralelo a “x”.

Quanto à análise cineto-estática, o seu objetivo é a determinação das forças atuantes nos quatro atuadores (fig.6), a partir do movimento completo calculado na análise anterior. As componentes destas forças são obtidas a partir da resolução de um sistema de equações lineares apresentado a seguir

$$F_{ax} + F_{bx} + F_{cx} + F_{dx} + f_x = m \cdot a_x \quad (10)$$

$$F_{az} + F_{bz} + F_{cz} + F_{dz} + f_z = m \cdot a_z + m \cdot g \quad (11)$$

$$\vec{M}_G \cdot \vec{I} = J_x \cdot \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \cdot \omega_y \cdot \omega_z \quad (12)$$

$$\vec{M}_G \cdot \vec{J} = J_y \cdot \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \cdot \omega_x \cdot \omega_z \quad (13)$$

onde

$$\vec{M}_G = (A - G) \wedge \vec{F}_a + (B - G) \wedge \vec{F}_b + (C - G) \wedge \vec{F}_c + (D - G) \wedge \vec{F}_d ,$$

$\vec{I}, \vec{J}, \vec{K}$  são versores de um sistema de coordenadas fixo à plataforma.

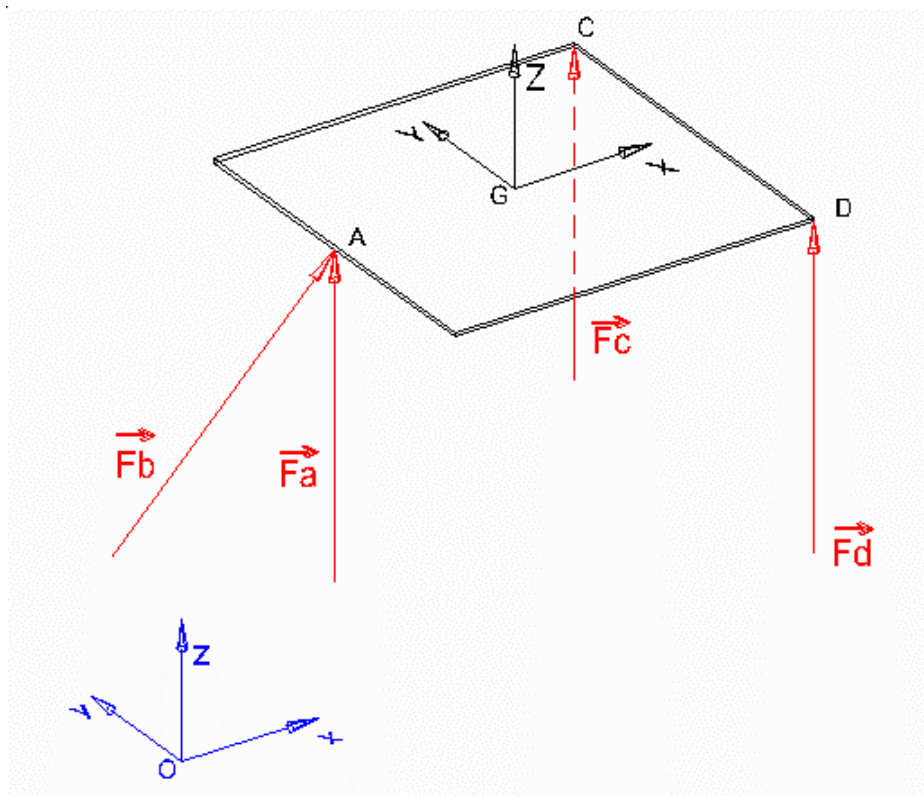


Figura 6 - Forças atuantes na plataforma

#### 4. MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional do simulador possui um módulo de entrada de dados, para definição dos parâmetros da plataforma e do tipo de movimento a que estará sujeita; uma rotina para análise cinemática inversa e outra para análise cineto-estática; um módulo de saída de dados, para apresentação do movimento gerado e das forças nos atuadores. O programa foi elaborado utilizando o MATLAB como ambiente de trabalho.

Um destaque deve ser feito quanto à rotina da análise cinemática inversa. Devido aos valores máximos permissíveis para velocidade e aceleração, tanto para translação quanto para rotação, é possível que a plataforma desenvolva até três tipos de movimentos: uniformemente acelerado, uniforme (velocidade constante) e uniformemente desacelerado. Uma vez definidos estes movimentos são feitas discretizações em cada uma das direções de movimentação, de modo a se obter os deslocamentos intermediários dos quatro atuadores.

#### 5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Apresenta-se a seguir um exemplo de aplicação, onde são fornecidos os resultados de uma simulação a partir dos parâmetros dinâmicos característicos do simulador. Neste caso, prevê-se a sequência de movimentação: (I) translação em “x” (tab.2); (II) translação em “z” (tab.2); (III) rotação em “x” (tab.3); (IV) rotação em “y” (tab.3).

Tabela 1 - Coordenadas dos centros dos pares cinemáticos que vinculam as colunas à base

	<i>Ao</i>	<i>Bo</i>	<i>Co</i>	<i>Do</i>
<i>x (m)</i>	0	-0,555	0,45	0,45
<i>y (m)</i>	0	0	0,225	-0,225
<i>z (m)</i>	0	0	0	0

Tabela 2 - Coordenadas iniciais e finais do baricentro da plataforma móvel

	<i>X<sub>G</sub></i>	<i>Y<sub>G</sub></i>	<i>Z<sub>G</sub></i>
inicial	0,225	0	0,8
final	0,245	0	0,9

Tabela 3 – Deslocamentos angulares da plataforma

<i>θ<sub>x</sub> (graus)</i>	<i>θ<sub>y</sub> (graus)</i>
30	20

Tabela 4 - Limites máximos de Velocidade e Aceleração

<i>Velocidade</i>	<i>Linear (m/s)</i>	<i>Angular x(rad/s)</i>	<i>Angular y(rad/s)</i>
	1	0,524	0,524
<i>Aceleração</i>	<i>Linear (m/s<sup>2</sup>)</i>	<i>Angular x(rad/s<sup>2</sup>)</i>	<i>Angular y(rad/s<sup>2</sup>)</i>
	10	6,981	6,981

Tabela 5 - Características da plataforma

<i>Dimensões (m)</i>	<i>comprimento - direção x</i>	0,45
	<i>largura - direção y</i>	0,45
<i>Massa (kg)</i>	250	
<i>Momento de inércia (kg.m<sup>2</sup>)</i>	<i>J<sub>x</sub></i>	4,23
	<i>J<sub>y</sub></i>	4,23
	<i>J<sub>z</sub></i>	8,46

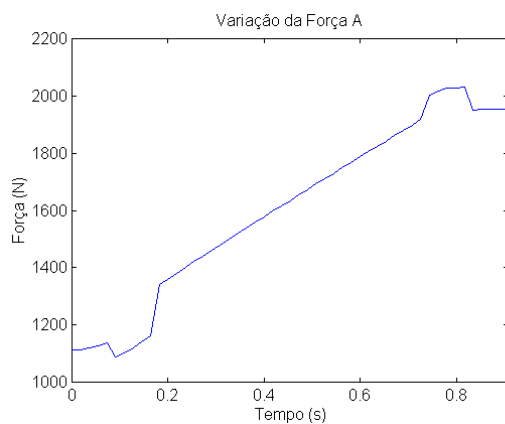


Figura 7 - Força no atuador “a”

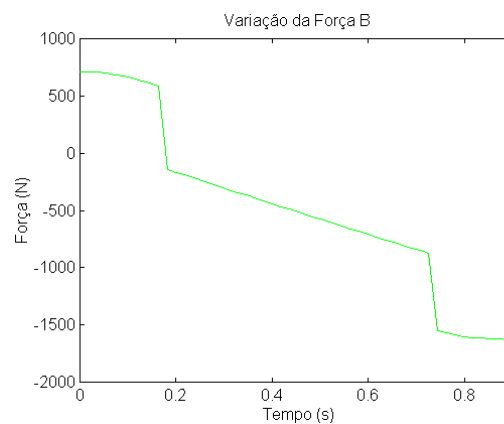


Figura 8 - Força no atuador “b”

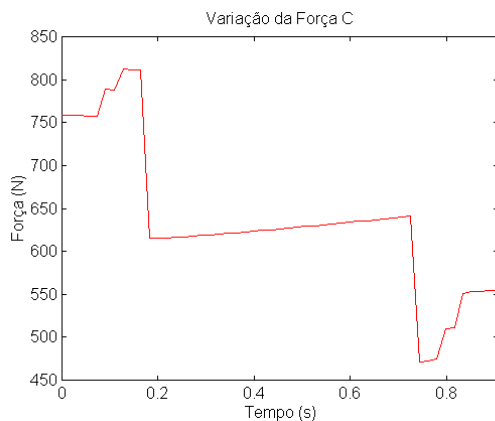


Figura 9 - Força no atuador “c”

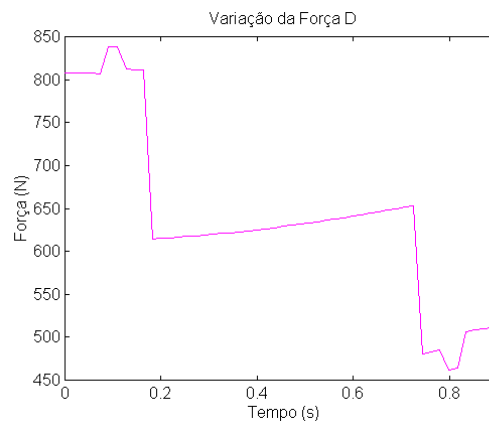


Figura 10 - Força no atuador “d”

## 6. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo um mecanismo de cadeia cinemática fechada, também conhecido como estrutura paralela para sua utilização como simulador em centros de lazer. A estrutura selecionada para o simulador é um tipo particular de plataforma de Stewart com quatro graus de mobilidade. Desenvolveu-se um modelo computacional do simulador - empregando MATLAB como ambiente de trabalho - que realiza a sua análise cinemática inversa, ou seja, definido o movimento da aeronave, o programa calcula, em cada instante, os



deslocamentos a serem impostos a cada um dos atuadores. Além disto, o modelo fornece também as forças presentes nos atuadores, necessárias para suportar a massa suspensa durante a sua movimentação. A partir das forças calculadas, é possível o correto dimensionamento dos atuadores compatíveis com o funcionamento da plataforma.

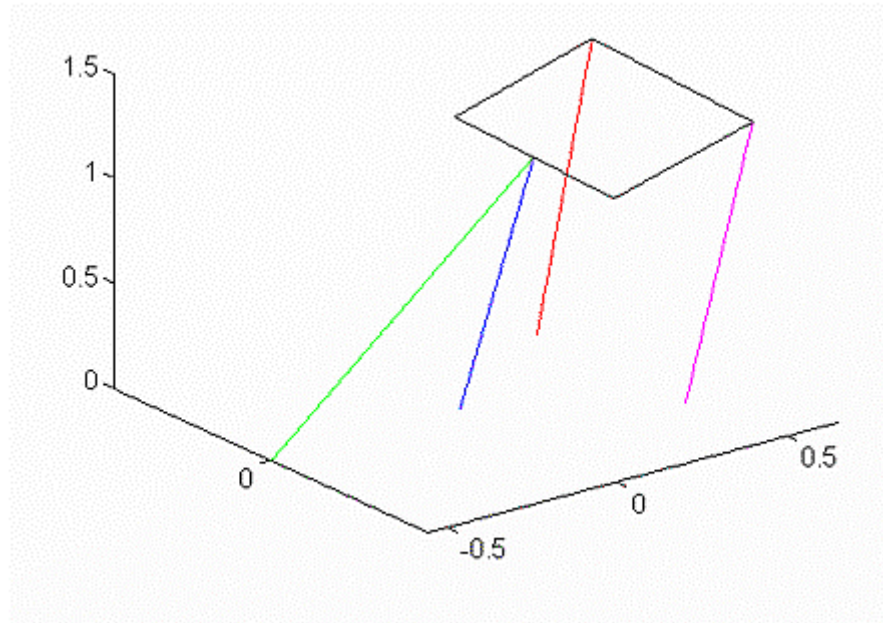


Figura 11 - Posição final do movimento

## REFERÊNCIAS

- Khol, R., 1994, A machine tool built from mathematics, American Machinist, October.
- Lazarevic, Z., 1997, Feasibility of a Stewart Platform with Fixed Actuators as a Platform for CABG Surgery Device, Master's Thesis, Columbia University.
- Salcudean S.E., Drexel P., Ben-Dov D.; Lawrence P.D. , 1994, A Six-Degrees-of-Freedom, One Person, Hydraulic Motion Simulator, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2437-2443, San Diego, USA, May 9-12.
- Shigley, J. E.; Uicker, J. J., 1981, Theory of Machines and Mechanisms, International Student Edition, Mc Graw Hill, Singapore.
- Souza, C. H. J., 1997, Análise da Posição e Orientação da Plataforma de Stewart tipo 3-3 em função de erros nos atuadores, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia.



## **MOVABLE PLATFORM TO BE EMPLOYED IN RECREATIONAL CENTERS AS A FLIGHT SIMULATOR**

***Abstract.** In entertainment area, simulators that aggregate movements are being improved and have increased their participation in main parks and recreational centers. Differently from professional simulators that, most of all, need six degrees of mobility to characterize the behavior of a body in space, simulators for recreational centers may have smaller number of degrees depending on their application. Simulators for this purpose can be built to allow two, three or, eventually, four independent movements. This article presents a movable platform that is just a closed kinematic chain linkage, forming a parallel structure with variable length columns. The controlled variation of these column lengths may provide to a user seated on the platform, flight feelings due to an airship motion. The selected structure for the simulator is a particular type of Stewart platform with four degrees of mobility. The work deals with the development of a computational model of the suggested simulator - using MATLAB as a work environment - which develops its inverse kinematics, i.e. once the airship motion is defined, the program computes, in each time, the displacements to be imposed to the actuators. Besides, the model furnishes the forces on the actuators needed to support suspended mass during its motion. An application example is also presented in this article, where can be found the results of some developed simulations from simulator characteristic dynamic parameters.*

***Keywords:** Mechanisms, Robotics, Modelling, Simulation.*