

Determinação das Características Dinâmicas do Sistema de Acionamento de um Simulador de Voo com 6 GDL^{*}

Mauricio Becerra-Vargas^{*} Eduardo M. Belo^{**}

^{*} UNESP-Univ Estadual Paulista, Campus Sorocaba, GASI - Grupo de Automação e Sistemas Integráveis, CEP 18087-180, Sorocaba - SP, Brazil (e-mail: mauricio@sorocaba.unesp.br).

^{**} Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, CEP 13566-590, São Carlos - SP, Brazil (e-mail: belo@sc.usp.br)

Resumo: Este artigo propõe uma metodologia para determinar as características dinâmicas de uma base de movimento de um simulador de voo baseado em um robô paralelo com seis graus de liberdade, considerando as características geométricas e de inércia do robô e as propriedades do atuador de acionamento. Também é apresentado o processo inverso, a determinação da potência necessária nos atuadores do robô a partir do conhecimento das características dinâmicas desejadas do simulador de voo. É usado o conceito do Jacobiano para estabelecer a relação entre as coordenadas cartesianas e as coordenadas das juntas e, junto com o comportamento do simulador na frequência, foi estabelecido um procedimento simplificado.

Palavras-Chave: Simulador de Voo, Robô Paralelo, Matriz Jacobiana, Plataforma de Gough-Stewart.

1. INTRODUÇÃO

Um simulador de voo é composto por um conjunto de subsistemas sincronizados entre si, com o objetivo de fornecer ao piloto estímulos visuais, inerciais e auditivos, de tal forma que o piloto tenha a sensação de pilotar uma aeronave real. Entre eles, o sistema de movimento e o sistema visual fornecem respectivamente os estímulos de movimento mais importantes no processo de treinamento.

A grande maioria dos atuais simuladores de alta fidelidade (*full flight simulator*), utilizados tanto para o treinamento como para uso na pesquisa, utilizam o movimento para aumentar a fidelidade da simulação. De fato, para atingir certos níveis de transferência de treinamento, a regulamentação exige a presença de movimento (FAA, 2012).

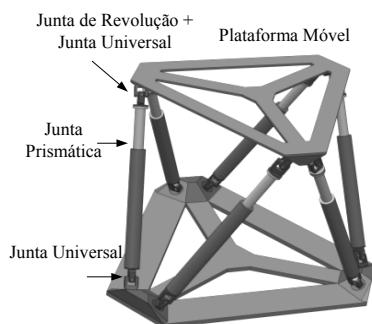


Fig. 1. Plataforma Gough-Stewart

^{*} Apoio Financeiro: Processo nº 2013/20888-6, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)

Geralmente, o mecanismo mais usado em simuladores de voo é baseado em um robô paralelo de seis graus de liberdade, chamado de plataforma de Gough-Stewart - RRPS (Stewart, 1965), embora existam outras variações de topologias com cadeias cinemáticas equivalentes, como por exemplo o robô Hexa - RRRS (Uchiyama, 1994) e o robô Hexaglide - PRRS (Narayanan et al., 2010). Este mecanismo consiste basicamente em duas plataformas conectadas por seis atuadores lineares atuando em paralelo como mostrado na Fig. 1. O extremo inferior do atuador é conectado à plataforma base por meio de uma junta universal, uma junta prismática entre a haste do atuador e o cilindro, e o extremo superior do atuador é conectado à plataforma móvel por meio de uma junta esférica. Desse modo, a plataforma móvel tem seis graus de liberdade (dentro de seu espaço de trabalho) relativa à plataforma base. O movimento relativo entre as duas plataformas é produzido variando os comprimentos dos atuadores lineares.

Usualmente a especificação do mecanismo de movimento é dado por meio das características dinâmicas para cada grau de liberdade, como mostrado na Tabela 1. Isto obviamente é devido aos seis graus de liberdade apresentados por uma aeronave real. A norma americana para qualificação de simuladores de voo de aeronaves (Appendix B to PART 60 - (FAA, 2012)) não especifica algum envelope de movimento recomendado, não obstante a norma fornece algumas recomendações no que diz à respeito simuladores de voos para helicópteros nível D (Appendix C to PART 60).

No caso de simuladores de voo, o projeto das características geométricas e físicas do mecanismo de movi-

Tabela 1. Características dinâmicas recomendadas para o mecanismo de movimento de um simulador de voo nível D (Allerton, 2009)

DOF	Deslocamento	Velocidade	Aceleração
x	± 860 mm	± 710 mm/s	$\pm 0.6g$ m/s ²
y	± 1140 mm	± 710 mm/s	$\pm 0.6g$ m/s ²
z	± 860 mm	± 610 mm/s	$\pm 0.8g$ m/s ²
ϕ	$\pm 25^\circ$	$\pm 20^\circ/s$	$\pm 100^\circ/s^2$
θ	$\pm 25^\circ$	$\pm 20^\circ/s$	$\pm 100^\circ/s^2$
ψ	$\pm 25^\circ$	$\pm 20^\circ/s$	$\pm 100^\circ/s^2$

mento deveria envolver um conjunto de trajetórias desejadas que devem ser incluídas no espaço de trabalho do mecanismo. Essas trajetórias correspondem às trajetórias da aeronave transformadas através de um filtro (*washout filter* (Grant and Reid, 1997; Telban and Cardullo, 2005)) devido às limitações físicas do mecanismo. Através de um processo de otimização e usando alguns índices de desempenho, os parâmetros geométricos são encontrados como mostrado em Advani (1998); Hosman et al. (2002, 2005). Não obstante, logo que concluído o dimensionamento do mecanismo é importante especificar as características dinâmicas do mecanismo, como mostrado na Tabela 1, dado como entrada as propriedades do atuador (curso, velocidade e aceleração) e as propriedades de inércia da plataforma móvel e da *payload* do simulador. Por outro lado, é importante também definir as características do atuador caso forem dadas as características geométricas e dinâmicas do mecanismo.

Apesar de existirem trabalhos relacionados com as propriedades e interpretação do Jacobiano (Koekebakker, 2001; Merlet, 2006) não existe uma metodologia para a determinação das propriedades dinâmicas do atuador e do mecanismo de movimento como explicado anteriormente.

Neste contexto, este artigo apresenta um procedimento aproximado para determinar as características dinâmicas do mecanismo de movimento de um simulador de voo dado como entrada, os parâmetros geométricos do mecanismo e as propriedades geométricas e dinâmicas do atuador de acionamento. Também será apresentado o procedimento para realizar o processo inverso: dado como entrada as características geométricas e dinâmicas do mecanismo de movimento, determinar as propriedades dinâmicas do atuador.

2. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DO MECANISMO DE MOVIMENTO

Para obter uma distribuição simétrica das juntas e garantir máxima destreza (eficiência e facilidade para realizar uma tarefa) perto ou na posição neutra da base de movimento, e uma configuração geométrica livre de singularidades, a distribuição das juntas na plataforma base e das juntas na plataforma móvel deve ser arranjada em hexágonos semi-regulares onde o ângulo entre as juntas \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_3 (\mathbf{B}_1 e \mathbf{B}_3), e entre as juntas \mathbf{P}_3 e \mathbf{P}_5 (\mathbf{B}_3 e \mathbf{B}_5) deve ser de 120° (Merlet, 2006). Se definirmos o ângulo entre o eixo \mathbf{X}_B e a linha $\overline{\mathbf{O}_B\mathbf{B}_i}$ por Λ_i , e o ângulo entre o eixo \mathbf{X}_P e a linha $\overline{\mathbf{O}_P\mathbf{P}_i}$ por λ_i para $i=1,2,\dots,6$, e segundo a Fig. 2, por inspeção obtêm-se:

$$\begin{aligned} \Lambda_i &= \frac{1}{3}\pi \cdot i - \frac{\theta_B}{2}, \quad i = 1, 3, 5, \\ \Lambda_i &= \Lambda_{i-1} + \theta_B, \quad i = 2, 4, 6, \\ \lambda_i &= \frac{1}{3}\pi \cdot i - \frac{\theta_P}{2}, \quad i = 1, 3, 5, \\ \lambda_i &= \lambda_{i-1} + \theta_P, \quad i = 2, 4, 6, \end{aligned} \quad (1)$$

Desse modo, as posições das juntas pode ser calculada como:

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_i &= [r_P \cos \lambda_i \quad r_P \sin \lambda_i \quad 0]^T, \quad i = 1, 2, \dots, 6, \\ \mathbf{b}_i &= [r_B \cos \Lambda_i \quad r_B \sin \Lambda_i \quad 0]^T, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \end{aligned} \quad (2)$$

É importante ressaltar que o raio da plataforma superior (r_P) deve ser menor que o raio da plataforma base (r_B) com o objetivo de evitar configurações da plataforma mal-condicionada (próximas a posições singulares). Merlet (2006) recomenda que a posição das juntas (universal e prismática) correspondente com posição angular zero ocorra quando a plataforma esteja na posição neutra, isto é, quando os atuadores estão na posição média do curso.

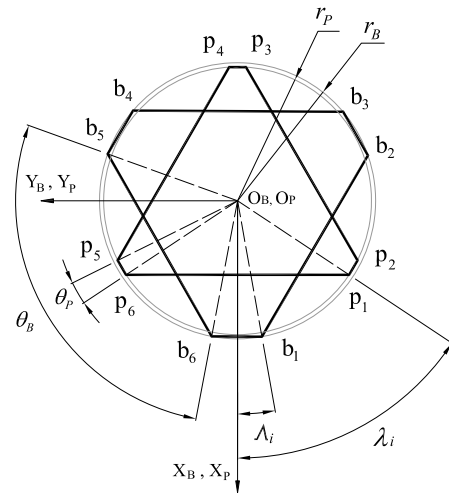


Fig. 2. Distribuição das juntas nas plataformas

3. CINEMÁTICA INVERSA

Para descrever o movimento da plataforma de Stewart, dois sistemas de coordenadas de referências são fixados nas duas plataformas. Um sistema de coordenadas $\{\mathbf{P}\}$ fixo à plataforma móvel e um sistema de coordenadas $\{\mathbf{B}\}$ fixo à base, como mostrado na Fig. 3. Desse modo, a orientação do sistema de coordenadas $\{\mathbf{P}\}$ em relação $\{\mathbf{B}\}$ é definida por uma sequência de três rotações sucessivas (ângulos de Euler), onde a matriz de rotação que mapeia o sistema de coordenadas de referência $\{\mathbf{P}\}$ ao sistema de coordenadas de referência $\{\mathbf{B}\}$ é dado por (Becerra-Vargas, 2009):

$$\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & C\psi S\theta S\phi - C\phi S\psi & C\psi C\phi S\theta + S\psi S\phi \\ C\theta S\psi & C\psi C\phi + S\psi S\theta S\phi & C\phi S\psi S\theta - C\psi S\phi \\ -S\theta & C\theta S\phi & C\theta C\phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

onde $S(\cdot) = \text{sen}(\cdot)$ e $C(\cdot) = \text{cos}(\cdot)$. Em relação à Fig. 3, o vetor comprimento de um atuador é dado por:

$$\mathbf{S} = \mathfrak{R}\mathbf{p} + \mathbf{t} - \mathbf{b}, \quad (4)$$

onde \mathbf{b} representa a posição da junta na plataforma base em relação ao sistema de coordenadas de referência $\{\mathbf{B}\}$,

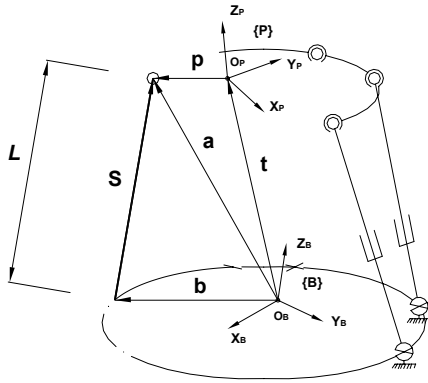


Fig. 3. Diagrama vetorial para um atuador

\mathbf{p} representa a posição da junta na plataforma móvel em relação ao sistema de coordenadas de referência $\{\mathbf{P}\}$, e \mathbf{t} representa a posição do centróide da plataforma móvel em relação ao sistema de coordenadas $\{\mathbf{B}\}$ tal que:

$$\mathbf{t} = [x \ y \ z]^T, \quad (5)$$

onde, x , y e z representam os deslocamentos de translação longitudinal, lateral e vertical respectivamente. Desta forma, a magnitude do comprimento do atuador é dado por:

$$L = \|\mathbf{S}\| \quad (6)$$

A Equação (6) representa a solução para o problema da cinemática inversa de modo que dada uma posição do centróide da plataforma móvel, \mathbf{t} , e orientação da plataforma móvel, ϕ (rolagem), θ (arfagem), ψ (guinada), definida pela matriz de orientação \mathcal{R} , o comprimento do atuador, L , pode ser calculado.

4. DETERMINAÇÃO DO ESPAÇO DE TRABALHO DO MECANISMO DE MOVIMENTO

O espaço de trabalho pode ser definido como o conjunto de configurações da plataforma móvel (posição e orientação) que podem ser alcançadas a partir de um determinado comprimento de cada atuador. O espaço de trabalho é dividido em espaço de trabalho de posição e espaço de trabalho de orientação. O espaço de trabalho de posição é gerado mantendo fixa a orientação da plataforma, enquanto o espaço de trabalho de orientação é gerado mantendo fixa a posição da plataforma. Usualmente têm-se três métodos para o cálculo do espaço de trabalho de manipuladores paralelos Merlet (2006): discretos, geométricos e numéricos (envolvendo o Jacobiano). O método discreto será usado neste artigo pela sua simplicidade e é determinado através de incrementos na posição ou orientação da plataforma e posteriormente calculam-se os deslocamentos dos atuadores através da cinemática inversa. Logo, são verificados os limites dos comprimentos dos atuadores, os limites dos deslocamentos angulares da junta universal e esférica de cada atuador, e a interferência entre os atuadores. Para cada incremento da posição ou orientação deve ser verificado:

- (1) Por meio da cinemática inversa (Seção 3) determinar os comprimentos dos atuadores de tal forma que $L_{min} \leq L_i \leq L_{max}$, onde L_{min} e L_{max} representam

os comprimentos mínimo e máximo atuador respectivamente.

- (2) Verificar se os ângulos da junta universal e esférica estejam dentro dos limites permitidos.
- (3) Verificar a interferência entre os atuadores. Isto pode ser verificado, considerando que cada atuador é representado por um cilindro de raio r_i e o eixo longitudinal corresponde ao vetor comprimento do atuador, \mathbf{S}_i . Assim, não haverá interferência se a distância entre os eixos longitudinais de um par de cilindros é maior que a soma dos correspondentes raios, isto é, distância $(\mathbf{S}_i, \mathbf{S}_j) \geq r_i + r_j$.

Devido ao fato que o simulador realiza a maioria dos movimentos em torno da posição neutra, os limites de posição e orientação mostrados na Fig. 1, correspondem ao valor máximo permitido a partir de incrementos de um grau de liberdade enquanto os outros permanecem constantes, partindo da posição neutra. Por exemplo, para saber o valor máximo da coordenada x na direção positiva, deve-se incrementar positivamente a coordenada (mantendo as outras direções constantes) a partir da posição neutra, calcular os comprimentos dos atuadores através da cinemática inversa e verificar as restrições do comprimento do atuador.

5. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO ATUADOR DE ACIONAMENTO

5.1 Envelope de aceleração em função da frequência

Se considerarmos movimentos senoidais para cada grau de liberdade da plataforma móvel em torno da posição neutra, pode-se observar que dependendo da frequência do movimento, valores máximos de aceleração são estabelecidos. Considerando o movimento em um determinado grau de liberdade como:

$$\begin{aligned} a_{dof} &= -A \sin(\omega t); \\ v_{dof} &= (A/\omega) \cos(\omega t); \\ p_{dof} &= (A/\omega^2) \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (7)$$

pode-se determinar o gráfico mostrado na Fig. 4, onde, para frequências menores que ω_v , o valor máximo da aceleração alcançada é limitada pelo valor máximo de posição do grau de liberdade. No intervalo (ω_v, ω_a) a velocidade máxima limita a aceleração, e para frequências maiores que ω_a , a aceleração é limitada pela potência dos atuadores. Os valores de frequência e aceleração são calculados como

$$\omega_v = V_{lim}/d_{lim}; \quad \omega_a = a_a/V_{lim}; \quad a_v = \omega_v V_{lim}, \quad (8)$$

onde os valores a_a , V_{lim} e d_{lim} representam os valores limites de aceleração, velocidade e posição, respectivamente, para cada grau de liberdade (Fig. 1).

5.2 A matriz Jacobiana

A relação entre a taxa de variação das coordenadas cartesianas, $\dot{\xi}$, e a velocidade linear do atuadores, $\dot{\mathbf{L}}$, pode ser escrita como (Becerra-Vargas, 2009):

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{l,\xi} \dot{\xi}, \quad (9)$$

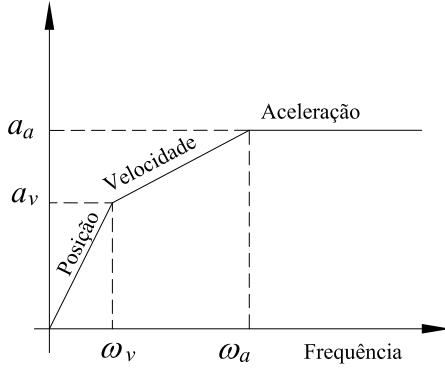


Fig. 4. Limites de aceleração vs frequência

onde

$$\mathbf{L} = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4 \ L_5 \ L_6]^T, \\ \boldsymbol{\xi} = [x \ y \ z \ \psi \ \theta \ \phi]^T, \\ \mathbf{J}_{l,\xi} = \mathbf{J}_{l,\omega} \mathbf{J}_{\omega,\xi},$$

e onde

$$\mathbf{J}_{l,\omega} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \mathbf{s}_2 & \mathbf{s}_3 & \mathbf{s}_4 & \mathbf{s}_5 & \mathbf{s}_6 \\ \mathbf{q}_1 \times \mathbf{s}_1 & \mathbf{q}_2 \times \mathbf{s}_2 & \mathbf{q}_3 \times \mathbf{s}_3 & \mathbf{q}_4 \times \mathbf{s}_4 & \mathbf{q}_5 \times \mathbf{s}_5 & \mathbf{q}_6 \times \mathbf{s}_6 \end{bmatrix}^T, \\ \mathbf{J}_{\omega,\xi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathfrak{R}_\omega \end{bmatrix}, \quad \mathfrak{R}_\omega = \begin{bmatrix} C\psi C\theta & -S\psi & 0 \\ C\theta S\psi & C\psi & 0 \\ -S\psi & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

e onde $\mathbf{q}_i = \mathfrak{R}\mathbf{p}_i$ e $\mathbf{s}_i = \mathbf{S}_i/L_i$

Nesta seção determinar-se-ão as propriedades dos atuadores relacionadas com velocidade, aceleração e força. Essas propriedades serão determinadas baseado nos requisitos do envelope de movimento e propriedades de inércia e geométricas do mecanismo de movimento. Devido ao fato que o simulador realiza a maioria dos movimentos em torno da posição neutra, os limites de posição e orientação mostrados na Fig. 1 correspondem ao valor máximo permitido a partir de entradas senoidais em torno da posição neutra. Se considerarmos os sinais de entrada definidos em (7) podemos inferir que:

- (1) A velocidade máxima é atingida na posição neutra.
- (2) Máximas acelerações ocorrem em altas frequências em torno da posição neutra do simulador.
- (3) Portanto, forças máximas dos atuadores são requeridas em altas frequências e grandes acelerações.
- (4) Movimentos de alta frequência e grandes acelerações significam deslocamentos e velocidades muito pequenas.

Nesse contexto, pode-se considerar que as acelerações e forças máximas coincidem com a posição neutra a velocidades nulas. Desse modo, o procedimento é descrito a seguir:

- (1) Encontrar a velocidade máxima do atuador a partir dos requisitos do envelope de movimento. Cada coluna do Jacobiano específica com que velocidade que deveria ser aplicada nos atuadores para conseguir mover a plataforma móvel apenas em um grau de liberdade a uma unidade de velocidade. Portanto, a máxima velocidade do atuador pode ser calculada a partir da velocidade máxima em cada grau de liberdade como

$$\dot{L}_{i,max} = \dot{\xi}_{i,max} \|\mathbf{J}_{l,\xi(*,i)}\|_\infty. \quad (10)$$

Visto que os ângulos de Euler são nulos na posição neutra ($\mathfrak{R}_\omega = \mathbf{I}_{3 \times 3}$), a equação anterior pode ser escrita como:

$$\dot{L}_{i,max} = \dot{\xi}_{i,max} \|\mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}\|_\infty, \quad (11)$$

onde $\dot{L}_{i,max}$ representa a velocidade máxima do atuador em relação ao grau de liberdade i , e $\mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}$ representa a i -ésima coluna do Jacobiano. Um conjunto de seis valores de velocidades máximas do atuador são obtidos. Deve ser escolhido o valor máximo dentro desse conjunto de valores.

- (2) Encontrar as forças dos atuadores a partir das acelerações desejadas. O modelo dinâmico da plataforma, sem considerar os termos de Coriolis e a dinâmica dos atuadores (nesta fase do projeto se desconhece as propriedades do atuador) pode ser escrito, na posição neutra, como Becerra-Vargas (2009):

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\xi})\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\xi}) = \mathbf{J}_{l,\omega}^T \mathbf{F}, \quad (12)$$

onde

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\xi}) = \begin{bmatrix} m\mathbf{I}_3 & -m\tilde{\mathbf{r}} \\ m\tilde{\mathbf{r}} & (\mathbf{I} - m\tilde{\mathbf{r}}\tilde{\mathbf{r}}) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}(\boldsymbol{\xi}) = - \begin{bmatrix} m\mathbf{g} \\ m\mathbf{r} \times \mathbf{g} \end{bmatrix},$$

e onde \mathbf{I}_3 é a matriz identidade de dimensão 3x3, $\mathbf{r} = [0 \ 0 \ r_z]^T$ é o vetor posição do centro de gravidade e $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ representa o vetor gravidade, e

$$\tilde{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & 0 \\ r_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix},$$

onde \mathbf{I} representa a matriz de inércia do mecanismo de movimento incluindo a carga. A Equação (12) pode ser escrita como

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_{l,\omega}^{-T} \{ \mathbf{M}(\boldsymbol{\xi})\ddot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{G}(\boldsymbol{\xi}) \}, \quad (13)$$

onde \mathbf{F} representa o vetor de forças dos atuadores. Se considerarmos o vetor de aceleração das coordenadas cartesianas, $\ddot{\boldsymbol{\xi}}$, formado apenas pela máxima aceleração de apenas uma coordenada enquanto as outras permanecem igual a zero, a máxima força para gerar a aceleração nesse grau de liberdade é dado como:

$$F_{max} = \|\mathbf{F}\|_\infty. \quad (14)$$

Assim, para cada aceleração máxima de cada grau de liberdade obter-se-á um valor de força máxima. Deve ser escolhido o valor máximo dentro desse conjunto de valores.

- (3) Determinar a aceleração máxima do atuador. Derivando (9), tem-se:

$$\ddot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{l,\xi} \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \dot{\mathbf{J}}_{l,\xi} \dot{\boldsymbol{\xi}} \quad (15)$$

e considerando, ($\mathfrak{R}_\omega = \mathbf{I}_{3 \times 3}$), na posição neutra, a equação anterior pode ser escrita como

$$\ddot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{l,\omega} \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \dot{\mathbf{J}}_{l,\omega} \dot{\boldsymbol{\xi}} \quad (16)$$

Considerando de novo que, as acelerações e forças máximas coincidem com a posição neutra a velocidades nulas ($\dot{\boldsymbol{\xi}} = 0$), a equação anterior pode ser escrita como:

$$\ddot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{l,\omega} \ddot{\boldsymbol{\xi}} \quad (17)$$

Portanto, a máxima aceleração do atuador pode ser calculada a partir da aceleração máxima em cada grau de liberdade como

$$\ddot{L}_{i,max} = \ddot{\xi}_{i,max} \|\mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}\|_\infty. \quad (18)$$

onde $\ddot{L}_{i,max}$ representa a aceleração máxima do atuador em relação ao grau de liberdade i , e $\mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}$ representa a i -ésima coluna do Jacobiano. Um conjunto de seis valores de acelerações máximas do atuador são obtidas. Deve ser escolhido o valor máximo dentro desse conjunto de valores.

6. DETERMINAÇÃO DO ENVELOPE DE MOVIMENTO A PARTIR DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO ATUADOR

A partir da seleção da velocidade, aceleração e força máxima do atuador segundo o procedimento anterior, deve-se determinar os limites de velocidade e aceleração de cada grau de liberdade. Ou seja realizar o procedimento inverso. O procedimento é descrito a seguir:

- (1) Calcular as máximas velocidades a partir da velocidade máxima do atuador: Isto pode ser dado, considerando (11), portanto

$$\dot{\xi}_{i,max} = \frac{\dot{L}_{max}}{\|\mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}\|_{\infty}}, \quad (19)$$

onde \dot{L}_{max} representa a velocidade máxima do atuador.

- (2) Calcular as acelerações máximas a partir da força máxima do atuador definida no procedimento anterior. Considerando (13), e manipulando matematicamente a equação, o vector de acelerações máximas em cada grau de liberdade pode ser determinado como:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_x &= (1/m) \frac{\mathbf{F}_{max} + g\mathbf{J}_{(*,3)}}{\mathbf{J}_{(*,1)} + r_z\mathbf{J}_{(*,5)}} \\ \mathbf{Y}_y &= (1/m) \frac{\mathbf{F}_{max} + g\mathbf{J}_{(*,3)}}{\mathbf{J}_{(*,2)} + r_z\mathbf{J}_{(*,4)}} \\ \mathbf{Z}_z &= (1/m) \frac{\mathbf{F}_{max} + g\mathbf{J}_{(*,3)}}{\mathbf{J}_{(*,3)}} \\ \phi &= \frac{\mathbf{F}_{max} + gm\mathbf{J}_{(*,3)}}{-\mathbf{J}_{(*,2)} + \mathbf{J}_{(*,4)}(I_x + mr_z^2)} \\ \theta &= \frac{\mathbf{F}_{max} + gm\mathbf{J}_{(*,3)}}{\mathbf{J}_{(*,1)} + \mathbf{J}_{(*,5)}(I_y + mr_z^2)} \\ \psi &= \frac{\mathbf{F}_{max} + gm\mathbf{J}_{(*,3)}}{I_z\mathbf{J}_{(*,6)}}; \end{aligned} \quad (20)$$

onde $\mathbf{F}_{max} = [F_{max} \ F_{max} \ F_{max} \ F_{max} \ F_{max} \ F_{max}]^T$, $\mathbf{J}_{(*,i)} = \mathbf{J}_{l,\omega(*,i)}^{-T}$ e F_{max} é a força máxima do atuador. Assim, as acelerações máximas podem ser calculadas como:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{max} &= \min(|\mathbf{X}_x|) \quad \ddot{y}_{max} = \min(|\mathbf{Y}_y|) \\ \ddot{z}_{max} &= \min(|\mathbf{Z}_z|) \quad \ddot{\phi}_{max} = \min(|\phi|) \\ \ddot{\theta}_{max} &= \min(|\theta|) \quad \ddot{\psi}_{max} = \min(|\psi|) \end{aligned} \quad (21)$$

- (3) Calcular as acelerações máximas a partir da máxima aceleração do atuador. Este passo é necessário para verificar se as acelerações máximas encontradas no item anterior não excedem a aceleração limite do atuador. Assim, considerando (18), as acelerações são calculadas como

$$\ddot{\xi}_{i,max} = \frac{\ddot{L}_{max}}{\|\mathbf{J}_{l,\xi(*,i)}\|_{\infty}}, \quad (22)$$

onde \ddot{L}_{max} representa a aceleração máxima do atuador calculado no procedimento anterior.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de aplicar a metodologia proposta serão consideradas as características dinâmicas de uma plataforma de movimento indicadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características dinâmicas recomendadas para o mecanismo de movimento

DOF	Deslocamento	Velocidade	Aceleração
x	± 460 mm	± 700 mm/s	$\pm 0.6g$ m/s ²
y	± 460 mm	± 700 mm/s	$\pm 0.6g$ m/s ²
z	± 390 mm	± 500 mm/s	$\pm 0.8g$ m/s ²
ϕ	± 23 °	± 20 °/s	± 100 °/s ²
θ	± 23 °	± 20 °/s	± 100 °/s ²
ψ	± 20 °	± 20 °/s	± 100 °/s ²

Desse modo, aplicando o procedimento da Seção 5 obtemos as características dinâmicas do atuador como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Valores máximos do atuador obtidos a partir das propriedades dinâmicas da plataforma de movimento

Velocidade	Aceleração	Força
433 mm/s	6 m/s ²	6430 N

Para validar a metodologia foi considerado o modelo dinâmico completo da plataforma de movimento e simulações foram realizadas em pontos críticos de frequência de movimento para cada grau de liberdade, ou seja, para valores de frequência ω_v e ω_a como indicado na Seção 5.1. Os valores máximos encontrados estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4. Características dinâmicas do atuador - valores máximos - considerando a dinâmica da plataforma

Velocidade	Aceleração	Força
448 mm/s	6.13 m/s ²	6575 N

Portanto, a partir do procedimento proposto determinou-se valores próximos aos valores incluindo a dinâmica da plataforma de movimento.

Por outro lado, considerando as características do atuador indicadas na Tabela 3 e, aplicando o procedimento da Seção 6, obtemos as características da plataforma de movimento como mostrado na Tabela 5. Foram também realizadas simulações numéricas incluindo a dinâmica da plataforma a fim de validar a metodologia proposta e foram encontrados valores máximos de velocidade, aceleração e força próximos aos indicados na Tabela 3.

Tabela 5. Características dinâmicas para o mecanismo de movimento obtidas a partir das propriedades do atuador

DOF	Deslocamento	Velocidade	Aceleração
x	± 460 mm	± 700 mm/s	$\pm 0.6g$ m/s ²
y	± 460 mm	± 713 mm/s	$\pm 0.67g$ m/s ²
z	± 390 mm	± 560 mm/s	$\pm 0.8g$ m/s ²
ϕ	$\pm 23^\circ$	$\pm 33^\circ/s$	$\pm 200^\circ/s^2$
θ	$\pm 23^\circ$	$\pm 30^\circ/s$	$\pm 200^\circ/s^2$
ψ	$\pm 20^\circ$	$\pm 37^\circ/s$	$\pm 450^\circ/s^2$

8. CONCLUSÕES

Neste trabalho de pesquisa foram apresentadas duas metodologias usando o conceito do Jacobiano, a primeira, para obter as características dinâmicas do atuador de acionamento dadas as características dinâmicas do mecanismo de movimento, e a segunda, a partir do conhecimento das características dinâmicas do atuador de acionamento determinou-se as características dinâmicas do mecanismo de movimento. As metodologias foram validadas usando o modelo dinâmico completo do mecanismo de movimento e os resultados apresentados foram aproximados aos das metodologias propostas. Trabalhos futuros devem tratar do acoplamento entre os graus de liberdade.

REFERÊNCIAS

- (2012). *14 CFR FAR Part 60*. FAA-Federal Aviation Administration, Washington D.C, US.
- Advani, S. (1998). *The kinematic design of flight simulator motion-bases*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Allerton, D. (2009). *Principles of flight simulation*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, United Kingdom, 1 edition.
- Becerra-Vargas, M. (2009). *Controle de uma plataforma de movimento de um simulador de voo*. Doutorado em Engenharia Mecânica, EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Grant, P. and Reid, L. (1997). Motion washout filter tuning: Rules and requirements. *Journal of Aircraft*, 34(2), 356–362.
- Hosman, R., Advani, S., and Haeck, N. (2005). Integrated design of the motion cueing system for a wright flyer simulator. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 28(1), 43–52.
- Hosman, R., Advani, S., and Haeck, N. (2002). Integrated design of flight simulator motion cueing systems. In *Royal Aeronautical Society Conference on Flight Simulation*. London.
- Koekebakker, S. (2001). *Model based control of a flight simulator motion system*. Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- Merlet, J.P. (2006). *Parallel Robots*. Springer, França, 2 edition.
- Narayanan, M., Chakravarty, S., Shah, H., and Krovi, N. (2010). Kinematic, static and workspace analysis of a 6-PUS parallel manipulator. In *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 1–8. ASME, Montreal, Canada.

- Stewart, D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. *Proceedings of the institution of mechanical engineers 1965-66*, 180(15), 371–386.
- Telban, R. and Cardullo, F. (2005). Motion cueing algorithm development human-centered linear and nonlinear approaches. Technical report, NASA Langley Research Center. Technical Report CR-2005-213747.
- Uchiyama, M. (1994). A 6 dof parallel robot HEXA. *Advanced Robotics*, 8(6), 601.