

ANÁLISE MODAL DE ROBÔS PARALELOS HÍBRIDOS ACIONADOS POR CABOS

Palavras-Chave: MANIPULADORES ROBÓTICOS, ANÁLISE MODAL, CINEMÁTICA E DINÂMICA DE MECANISMOS

Autores:

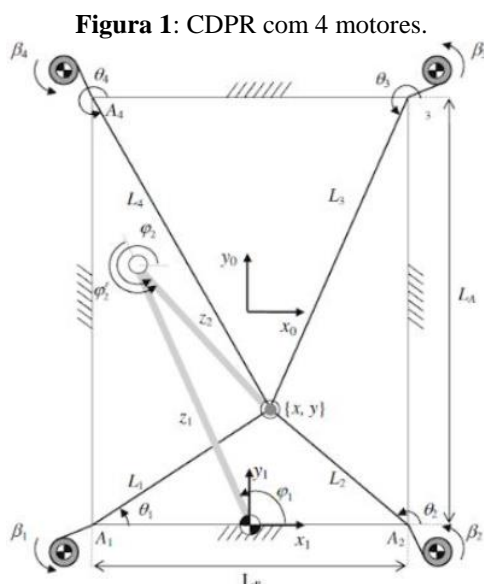
PEDRO BERNARDES SPAULONCI (autor) [FCA - UNICAMP]

IGOR SPEGIORIN VICENTE (coautor) [FCA – UNICAMP]

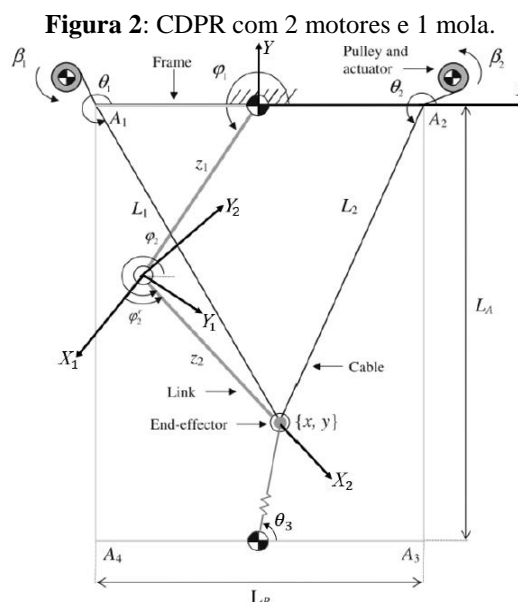
Prof. Dr. JAIME HIDEO IZUKA (orientador) [FCA - UNICAMP]

INTRODUÇÃO:

Durante o trabalho de Iniciação Científica (PIBIC-2021) do autor Spaulonci (2021), foi desenvolvida a cinemática inversa e cálculo de esforços necessários para a movimentação dos motores do modelo de robô paralelo híbrido acionado por cabos (CDPR) proposto por Trevisani, Gallina, Williams II (2006) (Figura 1). Houveram simplificações do sistema a fim de que fossem ainda obtidas tensões positivas nos cabos, substituindo dois motores e seus respectivos cabos, por uma mola posicionada entre as posições anteriormente ocupadas pelos motores (Figura 2).



Fonte: Trevisani, Gallina, Williams, 2006.



Fonte: Spaulonci, 2021.

O estudo inicial foi feito analisando uma trajetória linear do *end-effector*. Em seguida avaliou-se como interessante a realização de um complemento para análise modal deste mecanismo robótico antes mesmo da modelagem de seus motores elétricos. Para isso, foram utilizadas as teorias de: Análise Estrutural, Método dos

Elementos Finitos (FEM) e enfim a própria Análise Modal, com o objetivo de obtenção das frequências naturais em cada posição da trajetória do robô. Para a obtenção desses dados a trajetória, ou área de trabalho, foi redefinida para uma malha composta de pontos com objetivo de abranger uma maior área.

METODOLOGIA:

Para que fosse atingido o objetivo final de obtenção das frequências naturais em cada posição da trajetória do robô, foi necessária a elaboração de um modelo planar (2D) e outro espacial (3D), ambos programados na linguagem Python, para uma futura comparação. A princípio, a decisão foi motivada pelo fato dos modelos 2D e 3D terem um número distinto de graus de liberdade (GDL), o primeiro com 2 GDL de translação e 1 GDL de rotação no eixo normal ao plano de translação. Já o segundo com 3 GDL de translação e 3 GDL de rotação, ou seja, mobilidade total no espaço.

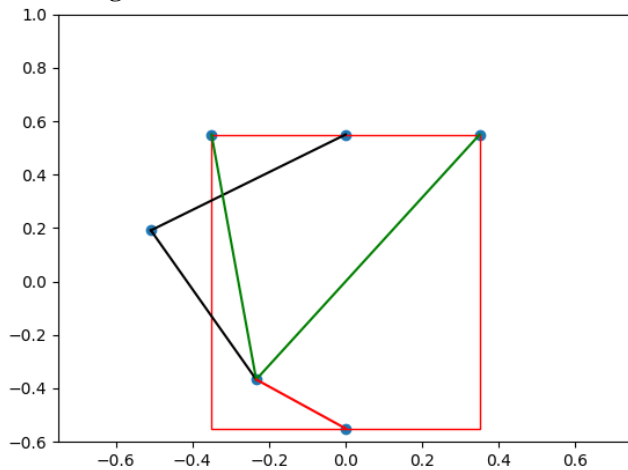
Vale ressaltar que para ambos os modelos seguiram o mesmo padrão de tipos de elementos para a FEM, descritos na Tabela 1 e ilustrados nas Figuras 3 e 4.

Tabela 1: Relação da respectiva parte do robô com sua descrição para a FEM.

Parte do CDPR	Quantidade de itens	Tipo de elemento para a FEM	Cor utilizada na representação gráfica
SCARA	2	Viga-barra	Preto
Cabos	2	Barra	Verde
Mola	1	Mola	Vermelho

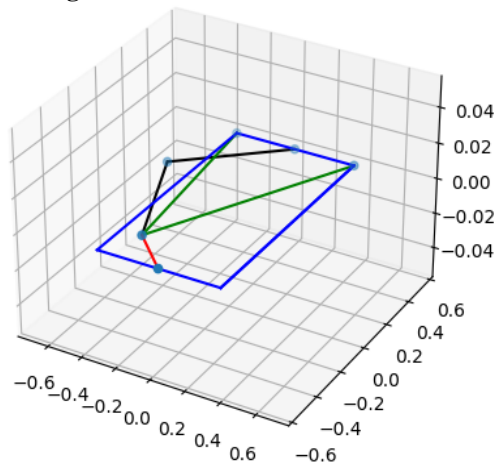
Fonte: Os Autores, 2021.

Figura 3: Modelo 2D do sistema SCARA.



Fonte: Os Autores, 2021.

Figura 4: Modelo 3D do sistema SCARA.



Fonte: Os Autores, 2021.

Inferiu-se que essa “adição” de GDL do modelo 2D para o 3D poderia ocasionar uma redução na rigidez do modelo tridimensional, assim suas frequências naturais também seriam inferiores se comparadas ao modelo bidimensional. Também foram realizados os respectivos modelos no software ANSYS APDL de cada um dos programas Python para fins de validação e comparação das frequências obtidas para o 2D e 3D. Contudo, somente foi realizada a análise comparativa com o primeiro ponto da área de trabalho e não com a posição inicial padrão e os demais pontos de análise.

Para realizar a análise computacional, foram inferidos algumas constantes e valores iniciais, tais como o tipo de material usado para os links do SCARA e cabos (liga de alumínio 6061-O) (MATWEB, 2021), áreas de seções circulares e especificamente os cabos foram considerados com uma seção transversal fina.

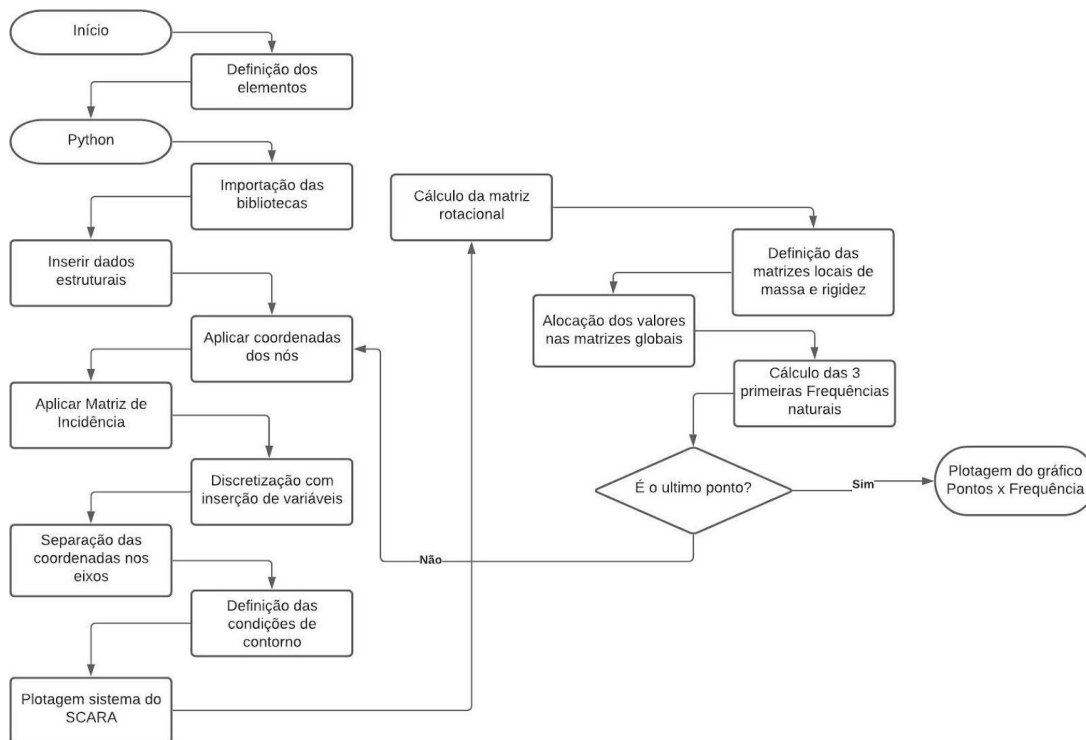
Acerca das posições analisadas, foi adotada uma malha contendo 25 pontos, correspondente à área de trabalho do robô, além de uma posição inicial padrão e posições nodais para dar início à análise. Esse processo

de análise a partir de uma posição inicial é vital para que se possa determinar a posição dos elementos sempre de forma coerente, uma vez que é possível obter duas posições diferentes do braço para ligar a origem com a posição final do *end-effector*.

Uma vez definidas as posições de análise dos braços, foram escolhidas as matrizes de rigidez e massa para cada sistema (2D e 3D) obtidas a partir de Craig, Kurdilla (2006).

Em suma, uma consolidação das etapas desta seção pode ser visualizada de uma forma melhor no fluxograma dos programas Python (Figura 5). Embora sejam dois programas, um 2D e outro 3D, as etapas de execução são as mesmas.

Figura 5: Fluxograma dos programas Python.

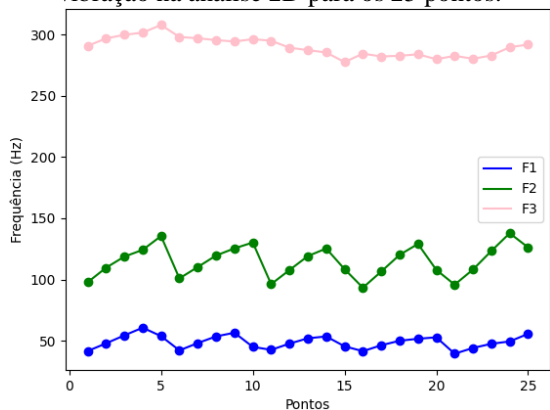


Fonte: Os Autores, 2021.

RESULTADOS:

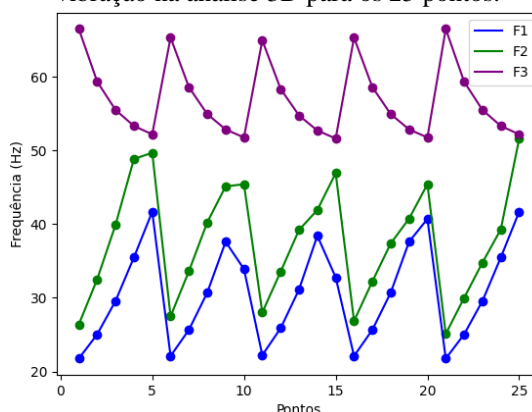
Após serem realizadas as análises computacionais em Python e no ANSYS APDL, foram levantados os dados representados nas Figuras 6 a 10.

Figura 6: 3 primeiras frequências naturais de vibração na análise 2D para os 25 pontos.



Fonte: Os Autores, 2021.

Figura 7: 3 primeiras frequências naturais de vibração na análise 3D para os 25 pontos.



Fonte: Os Autores, 2021.

Tabela 2: Frequências naturais, medidas em Hertz [Hz], da vibração na primeira posição das análises 2D obtidas no Python e no software ANSYS APDL.

<i>Frequência</i>	<i>Python [Hz]</i>	<i>ANSYS APDL [Hz]</i>
F1	41.6	27.6
F2	97.7	101.6
F3	---	236.9
F4	290.7	299.5
F5	---	412.1
F6	560.0	572.9
F7	---	985.4
F8	---	1043.3
F9	1247.2	1260.5
F10	---	1805.1
F11	1917.1	---

Fonte: Os Autores, 2021.

Tabela 3: Frequências naturais, medidas em Hertz [Hz], da vibração na primeira posição das análises 3D obtidas no Python e no software ANSYS APDL.

<i>Frequência</i>	<i>Python [Hz]</i>	<i>ANSYS APDL [Hz]</i>
F1	21.8	18.0
F2	26.4	27.6
F3	66.5	59.5
F4	101.3	101.6
F5	299.6	299.5
F6	397.1	389.1
F7	---	572.9
F8	---	588.1
F9	---	1033.0
F10	---	1260.5

Fonte: Os Autores, 2021.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES:

Com base nas frequências obtidas (Figuras 6 e 7) pode-se notar que as 3 primeiras frequências naturais do modelo 2D são maiores do que as 3 primeiras do modelo 3D. Dessa forma, pode-se concluir que o modelo 2D é mais rígido que o 3D. Isso se deve ao fato do modelo 2D ter 3 GDL a cada nó, ou seja, mais restrições

em comparação ao 3D, o qual possui 6 GDL em cada nó. Ao serem inferidos mais graus de liberdade em cada nó, o sistema acaba possuindo maior liberdade de movimentação no espaço, que por consequência gera uma menor rigidez global.

Não foram registrados resultados acerca deste ponto, mas para fins de registro, foi notado que a presença de uma massa no *end-effector* interfere nas frequências obtidas quando comparado ao caso sem a presença de uma massa.

Uma observação interessante analisada também diz respeito à diferença nas frequências em função do posicionamento do *end-effector*. Este, quando posicionado mais próximo à origem do SCARA, possui maior rigidez global, representada nos picos observados nas Figuras 6 e 7 em que se é necessária uma maior frequência para vibrar o sistema.

Quando o braço robótico é contraído, o sistema como um todo apresenta uma geometria mais compacta, o que faz com que haja uma maior dificuldade de ocorrer vibrações. Outro fato que explica esse aumento de rigidez foi com relação à existência dos cabos e da mola no sistema. Quando o *end-effector* se aproxima da origem do SCARA, a mola que torna o sistema rígido no plano exerce uma maior forma elástica. Para haver o equilíbrio do sistema, os cabos que seguram o braço robótico também exercem uma força resultante de mesma intensidade e de sentido oposto, o que torna o modelo mais rígido de forma global.

Para efeitos de validação do modelo implementado em Python, por sua vez, foram comparadas as frequências naturais para a primeira posição do braço robótico entre ambos os programas Python e ANSYS APDL nas condições 2D e 3D. Para o modelo 2D, inicialmente, pode-se notar uma grande diferença entre as primeiras frequências naturais entre os programas (Tabela 2). Isso pode ser explicado pelo fato de que o programa ANSYS ADPL verifica mais modos de vibração do que o Python, além de levar em conta em sua matriz de rigidez termos relacionados ao raio de giração do elemento de viga-barra, resultando assim em uma diferença significativa, uma vez que as ordens das frequências naturais não estão na mesma ordem dos modos de vibração. Isso pode ser explicado analisando, por exemplo, a segunda e terceira frequência natural do modelo 2D em Python com a segunda e a quarta do ANSYS APDL. Apesar de não serem valores idênticos (97,724 Hz e 101,63Hz na primeira comparação e 290,735Hz e 299,50Hz na segunda), eles são muito próximos uns dos outros. Esse fato ocorre, pois, os programas utilizam matrizes de massa e rigidez diferentes, gerando assim na divergência dos resultados.

Ao comparar os resultados obtidos para os modelos 3D (Tabela 3), por suas vezes, nota-se que as 6 primeiras frequências naturais tanto para o Python quanto para o ANSYS APDL possuem valores muito próximos. Fato esse pode ser justificado por conta de ambos os programas analisarem os mesmos modos de vibrar, validando assim o modelo 3D utilizado em Python. As diferenças numéricas encontradas entre os resultados obtidos ocorrem pela mesma justificativa encontrada para a modelagem do projeto em 2D.

A comparação dos resultados da primeira frequência entre os modelos 2D Python e ANSYS APDL indicam uma divergência de resultados nesta frequência natural. O ANSYS APDL apresentou um resultado de frequência menor em relação ao Python, este efeito pode ser proveniente de rigidez (geometria) ou massa, já que ambos foram modelados com o mesmo material. Ainda com relação ao modelo 2D, algumas frequências naturais calculadas pelo ANSYS APDL não foram encontradas pelo modelo Python e isto está sendo investigado para o relatório final.

BIBLIOGRAFIA

CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. **Fundamentals of Structural Dynamics**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2006.

MATWEB. **Aluminum 6061-O**.

<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=626ec8cdca604f1994be4fc2bc6f7f63&ckck=1>>. Acesso em: 07 Jul. 2021.

SPAULONCI, P. B. **Aplicação de Robôs Paralelos Híbridos Acionados por Cabos na Impressão 3D**, 2021. Relatório Parcial de Atividades (bacharelado) - Engenharia de Manufatura, Programa de Bolsas de Iniciação Científica Unicamp, Limeira, 2021.

TREVISANI, A.; GALLINA, P.; WILLIAMS II, R. L. Cable-Direct-Driven Robot (CDDR) with Passive SCARA Support: Theory and Simulation. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, Julho 2006. n. 46, p. 73-94.