



DEM - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INDUÇÃO DE MOVIMENTO PERMANENTE EM UM SISTEMA SUB-ATUADO

*Liana de Barros dos Santos¹,
Hans Ingo Webber².*

¹ *Aluna de Graduação do curso de Engenharia de Controle e Automação da PUC-Rio.*

² *Eng. Mecânico, Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	3
2.OBJETIVO.....	4
3.MOTIVAÇÃO.....	4
4. METODOLOGIA.....	5
5. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS.....	12
REFERÊNCIAS.....	13

1. INTRODUÇÃO

Um sistema sub-atuado é aquele que possui um número maior de graus de liberdade do que atuadores. O número total de juntas de um manipulador e o seu tipo permite conhecer o número de graus de liberdade do sistema.

Um manipulador consistindo de um sistema articulado com um ou mais graus de liberdade, já foi amplamente estudado e seu uso na área de automação e robótica é bem dominado. Dependendo da aplicação, todavia, podem existir aspectos cujo desenvolvimento ainda se encontra em aberto. Quando levamos em consideração um manipulador planar, significa que seu movimento está restrito a um plano horizontal, ou seja, a gravidade não interferirá no seu comportamento dinâmico.

O manipulador planar estudado neste trabalho pode ser comparado a um pêndulo duplo tradicional, apenas alterando sua orientação, passando-a de vertical para horizontal.

Os pêndulos duplos também são bastante estudados, bem como o seu controle, porém seu uso, até o momento, é basicamente didático. Ao se alterar sua orientação transformando-o num manipulador planar com dois graus de liberdade, seu uso e aplicações são diferenciados.

Manipuladores equivalentes ao sistema de pêndulo (com apenas um atuador, e dois graus de liberdade) podem possuir diversas variações estruturais, alterando sensivelmente o comportamento do sistema. Pode-se manter o atuador horizontal e o componente sub-atuado vertical (pêndulo com ponto de suspensão móvel), ou substituir o componente sub-atuado por uma roda atuada, e o componente originalmente atuado transformas-se no eixo guia da roda.

Em nosso estudo procura-se induzir um movimento de rotação com velocidade angular o mais constante possível no elemento sub-atuado a partir de um movimento prescrito no componente atuador. Uma aplicação possível desse estudo poderia ser encontrada na geração de energia elétrica a partir do movimento oscilatório das ondas do mar, quando também se procura obter um movimento contínuo a partir de um movimento irregular de vai e vem..

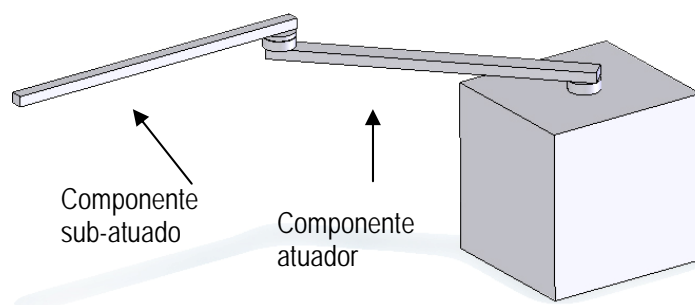


Figura 1

2. OBJETIVOS

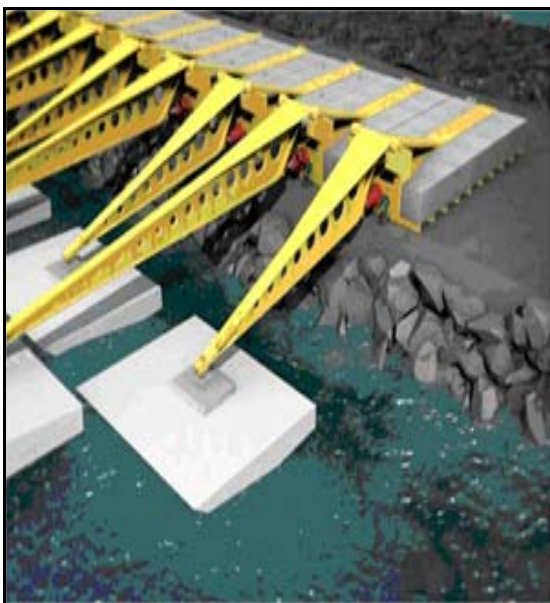
O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento e aplicação de um sistema sub-atuado. O sistema sub-atuado em questão é composto de um manipulador planar com o intuito de induzir uma rotação contínua no elemento sub-atuado..

Este estudo inicia-se com a modelagem e a determinação da dinâmica do sistema, a seguir, determina-se sua dinâmica inversa, de forma a alimentar um possível sistema de controle para o mesmo. Com isto já é possível gerar uma simulação do sistema, bem como comparar seus resultados com a análise experimental, e assim validar o modelo numérico.

3. MOTIVAÇÃO

Sistemas sub-atuados possuem diversas aplicações úteis teóricas, porém suas aplicações práticas ainda não são plenamente visíveis. Com esse tipo de sistema pode-se sobrepor o controle tradicional de sistemas não sub-atuados quando estes apresentarem falha, transformando-se em sistemas sub-atuados com funcionalidade igual ou muito semelhante ao original. Uma aplicação possível ainda não estudada nesta área seria na geração de energia elétrica por ondas marítimas, onde estas que induziriam uma rotação permanente no componente sub-atuado. Esta rotação seria responsável pela geração da energia elétrica, porém tratando-se o mar como um ambiente imprevisível e sujeito a diversas variáveis, esta rotação não se manteria constante, dentro de limites necessários para geração de energia e manutenção do movimento se não houver uma ação de controle adequada.

A busca por alternativas energéticas que causem menos impactos ao meio-ambiente passou a fazer parte do planejamento estratégico das nações e o aproveitamento do comprovado potencial energético dos oceanos configura, atualmente, como uma possibilidade promissora para produzir energia limpa. Marés, ondas e correntes marinhas são recursos renováveis, cujo aproveitamento para a geração de eletricidade registra significativos avanços tecnológicos e apresenta vantagens, em termos de acessibilidade, disponibilidade e aceitabilidade.



a)



b)

Figura 2 Exemplos de tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir dos movimentos oscilatórios das ondas do mar . a) Detalhes dos flutuadores e bombas hidráulicas; b) Flutuadores.

4. METODOLOGIA

Modelagem Matemática

A modelagem matemática do manipulador planar é fundamental para qualquer tipo de estudo que envolva seu comportamento dinâmico; o manipulador utilizado possui uma dinâmica simples e com equacionamento encontrado na literatura, porém, por questões didáticas e de aprendizado, resolveu-se modelar o sistema desde o princípio, partindo das equações de movimento.

A determinação da dinâmica foi realizada tanto a partir das equações de Newton-Euler quanto pelas equações de Lagrange. A utilização das duas abordagens distintas foi realizada de forma a verificar qual modelagem seria de mais fácil implementação computacional.

A abordagem que se mostrou mais simples foi por Newton-Euler, de onde foram obtidas as equações a seguir:

$$(a + \cos \beta) \cdot \ddot{\alpha} + \cos \beta \cdot \ddot{\beta} - (\dot{\alpha} + \dot{\beta})^2 \sin \beta = \frac{M}{m_2 l l_1}$$

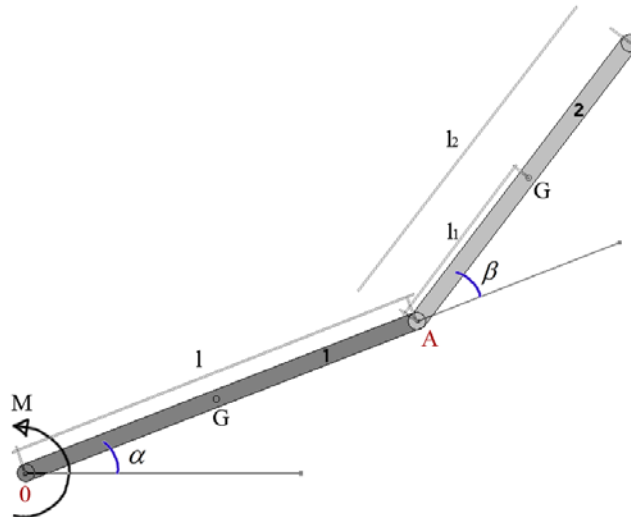
$$(c + \cos \beta) \cdot \ddot{\alpha} + c \cdot \ddot{\beta} + \dot{\alpha}^2 \sin \beta = 0$$

Os termos a e c da equação acima são:

$$a = \frac{I_0^{(1)} + m_2 l^2}{m_2 l l_1}; c = \frac{I_A^{(2)}}{m_2 l l_1}$$

$I_0^{(1)}$ = momento de inércia da barra 1 em relação ao ponto 0

$I_A^{(2)}$ = momento de inércia da barra 2 em relação ao ponto A



Barra 1 - componente atuador
Barra 2 - componente sub-atuado

Modelagem da Dinâmica Inversa

Numa segunda fase do projeto, faz-se necessária a determinação da dinâmica inversa do sistema, de forma a obter o comportamento do elemento atuador para induzir ao componente sub-atuado um movimento contínuo.

A modelagem teórica permite verificar se existe a possibilidade de uma velocidade angular constante do elemento sub-atuado: esta condição corresponde a estabelecer que $\dot{\beta} = \omega = cte$ e, conseqüentemente, a aceleração $\ddot{\beta} = 0$. As equações permitem obter as condições para viabilizar este movimento:

$$\ddot{\alpha} = -\frac{\sin \omega t \cdot \dot{\alpha}^2}{c + \cos \omega t}$$

Para obter a dinâmica inversa integra-se, obtendo:

$$\dot{\alpha} = \frac{1}{C - \ln |c + \cos \omega t|}$$

Esta equação define as velocidades angulares necessárias para manter o componente sub-atuado em movimento permanente. C é uma constante de integração, com as considerações já feitas a respeito dos parâmetros e trabalhando os termos da equação obtida, chega-se a conclusão que C é um termo ligado diretamente a $\dot{\alpha}_0$ (velocidade inicial de rotação do elemento atuado).

Tendo ambas as equações é possível fazer uma substituição na equação da dinâmica do elemento (em sua parte atuada), com isso chegamos a:

$$\bar{M} = -(a + \cos \omega t) \frac{\sin \omega t}{c + \cos \omega t} \cdot \left[\frac{1}{C - \ln |c + \cos \omega t|} \right]^2 - \left(\left[\frac{1}{C - \ln |c + \cos \omega t|} \right] + \omega^2 \right) \sin \omega t$$

que deve ser interpretado como o momento necessário para realizar o movimento com ωt constante para um valor de $\dot{\alpha}_0$, definido.

Simulações

Com as equações de movimento foi possível realizar simulações numéricas, utilizando a plataforma MatLab. Estas simulações não englobam a malha de controle, com o objetivo apenas de melhor entender o fenômeno físico.

A seguir, alguns gráficos obtidos em situações específicas:

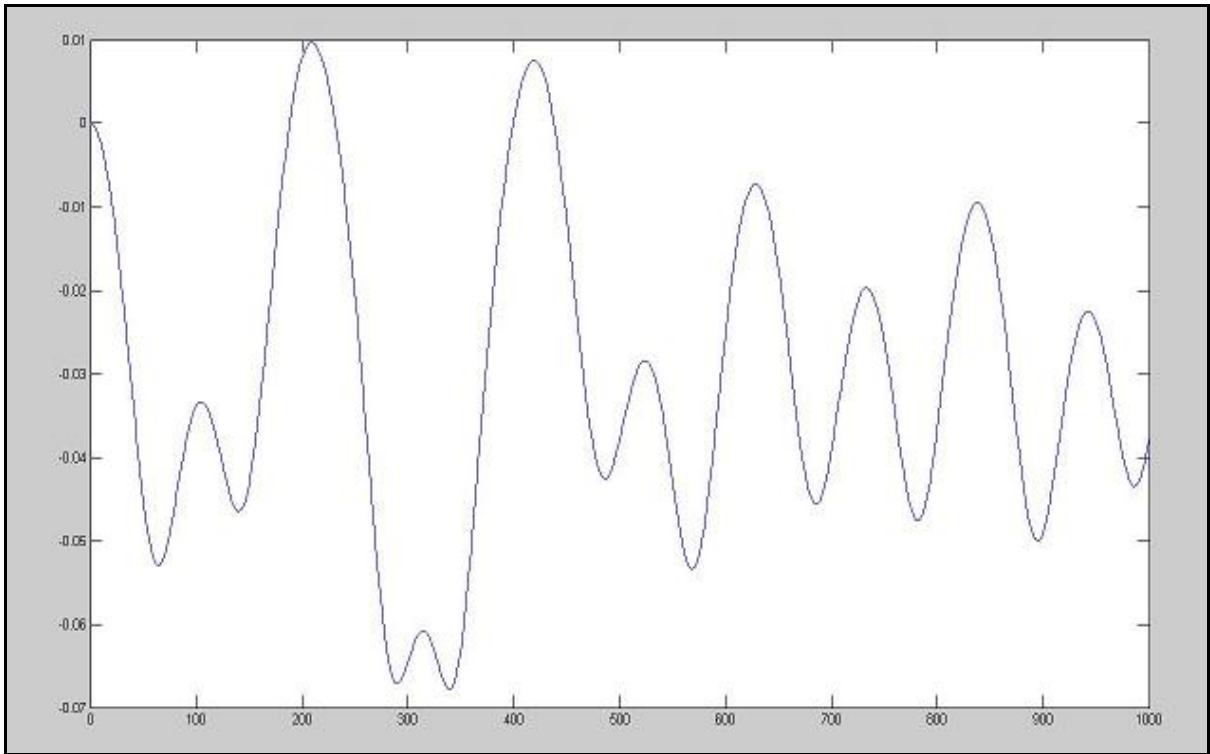


Figura 3 Velocidade angular do componente atuado x tempo

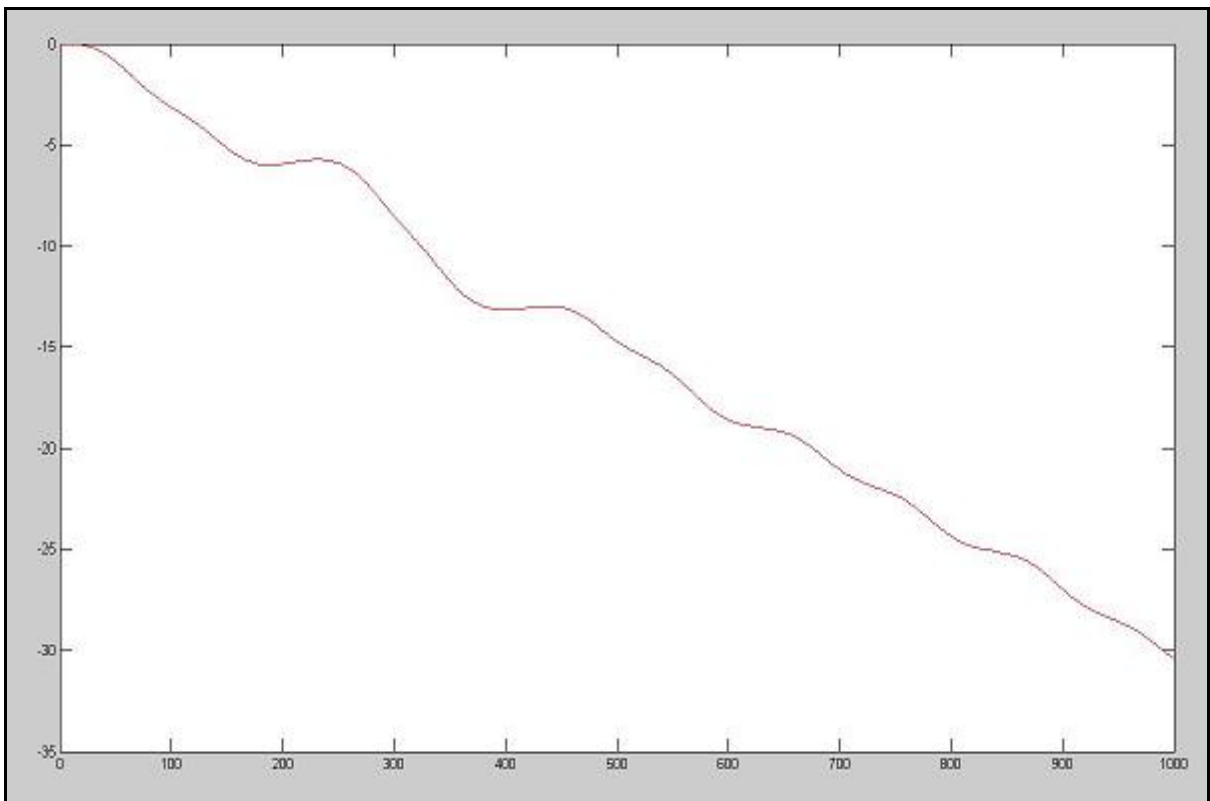


Figura 4 Velocidade angular do componente sub-atuado x tempo

Uma vez finalizada a dinâmica inversa, simula-se numericamente o sistema (plataforma MatLab). A partir desta simulação foi possível determinar o movimento prescrito do atuador de forma a induzir o movimento de rotação contínua no componente sub-atuado:

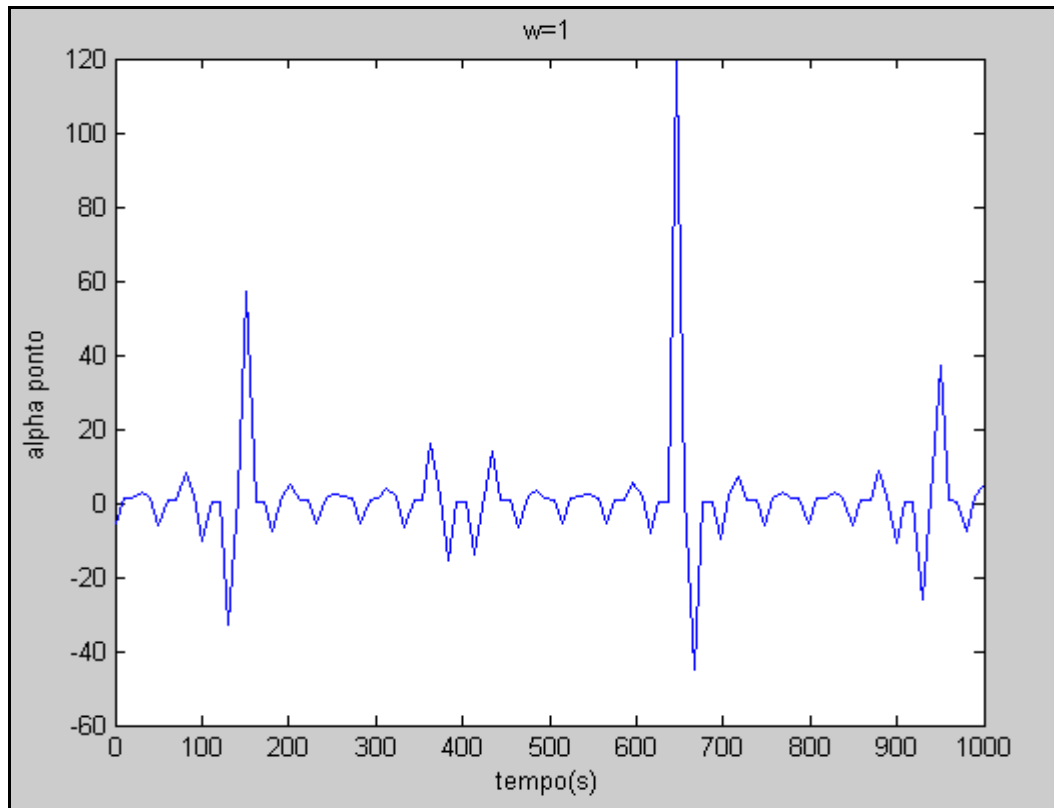


Figura 5 Alpha ponto ($\dot{\alpha}$) possui comportamento quase periódico, com imperfeições durante a simulação, porém testes e simulações com ondas senoidais e quadráticas como entrada deram resultados muito satisfatórios.

Protótipo

Construção Inicial

Simultaneamente com todo o desenvolvimento matemático, uma bancada experimental foi concebida e construída, de forma a validar o modelo numérico.

Uma vez que a dinâmica desenvolvida não leva em consideração efeitos de atrito, a bancada foi concebida de forma a minimizar tais efeitos (por exemplo, uso de materiais leves e rolamentos de excelente qualidade).

Com a bancada experimental finalizada, foi acoplado ao componente atuador um motor PWM (pulse width modulation ou modulação por largura de pulso) com um módulo de controle por tensão, e a transmissão de movimento é realizada por um sistema de engrenagens.

No eixo ligado diretamente ao componente atuador, foi fixado um *encoder*, este dispositivo fornecerá informações de posição e velocidade ao sistema de controle.

Algumas alterações foram necessárias na construção da bancada, como mudança na redução no sistema de engrenagens, colocação de dispositivos para nivelamento da bancada, ajustes nas hastes e engate com o motor com o mínimo de folga.

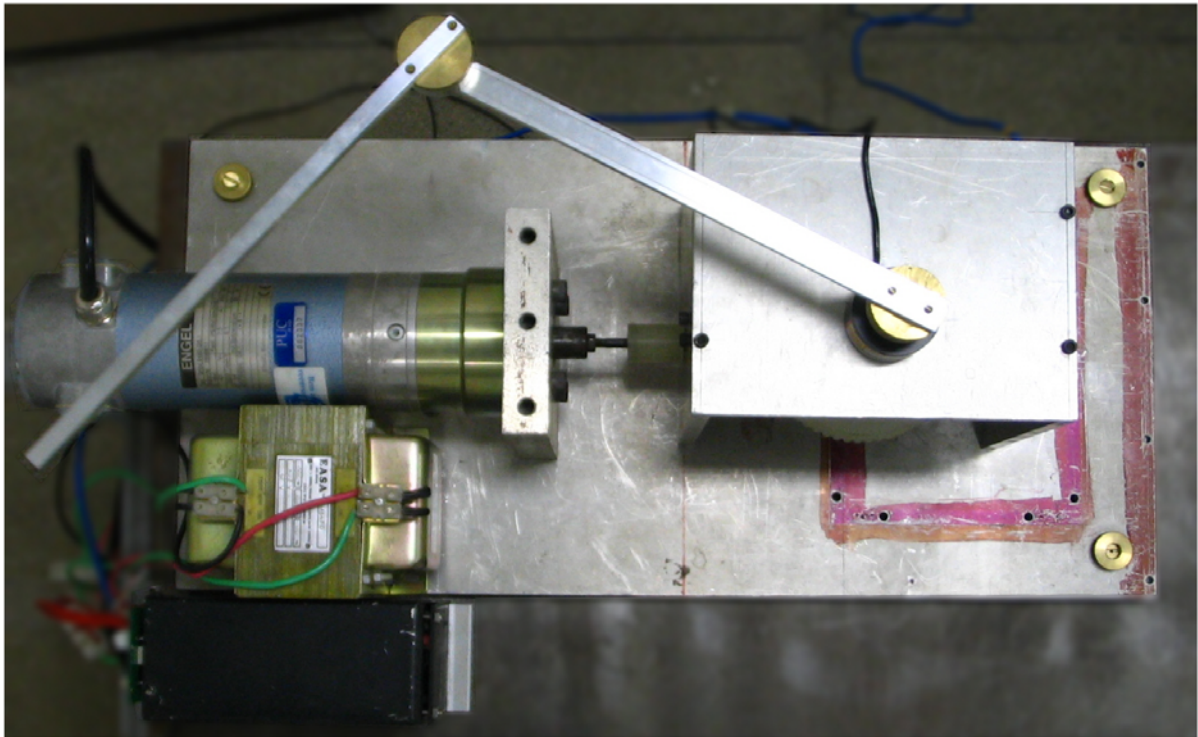


Figura 6 Vista superior do protótipo em sua versão atual

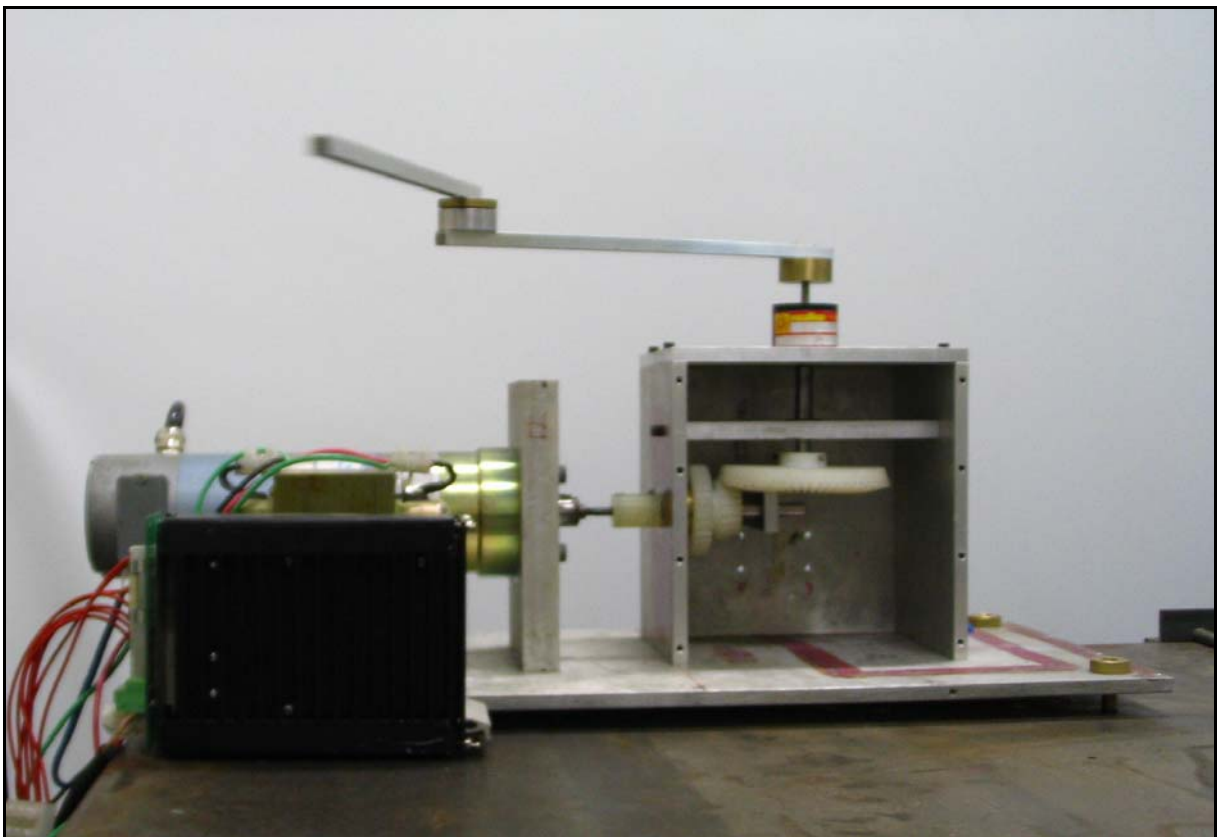


Figura 7 Vista frontal do protótipo em sua versão atual.

Início do Movimento Permanente

Sabendo-se, pelas simulações numéricas, que para induzir o movimento contínuo do componente sub-atuado, o movimento do componente atuador deve ser periódico, foram realizados testes preliminares na bancada experimental. Estes testes consistem na aplicação, através de um gerador de sinais, de ondas quadradas e senoidais ao módulo de controle do motor, de forma que o componente atuador descreva um movimento periódico, e assim observar o comportamento do componente sub-atuado. A observação do movimento do componente sub-atuado foi utilizada para validar o modelo numérico, pois o comportamento foi muito próximo do esperado.

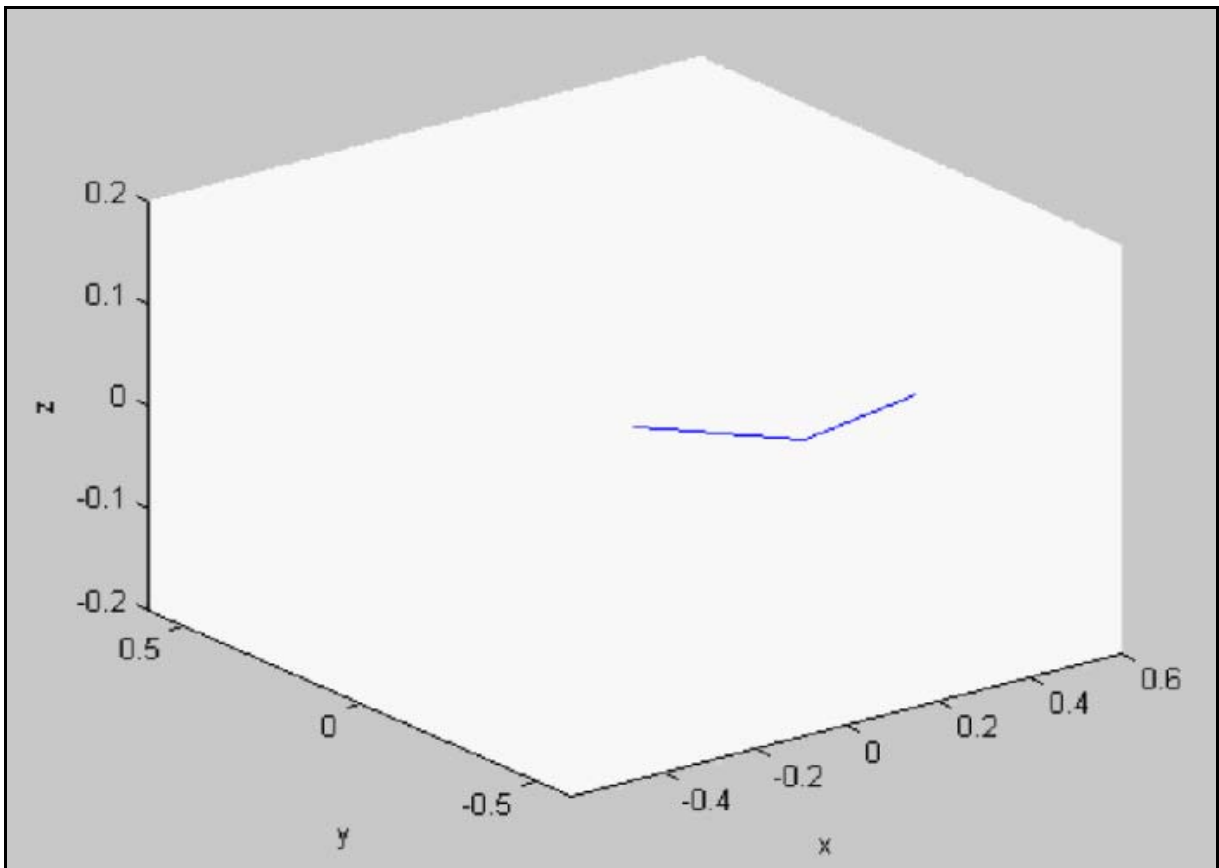


Figura 8 Simulação via MatLab do movimento permanente

Controle

Para que o sistema funcione corretamente, com a movimentação desejada obtida na simulação da dinâmica inversa no MatLAB, devemos aplicar uma malha de controle; inicialmente esta malha seguirá um padrão simples, partindo depois para sistemas PID ou mais eficientes para a situação

O controle proposto foi montado em LabVIEW, utilizando como única entrada de realimentação o *encoder* localizado no elemento atuador,

Sem o controle, o sinal de entrada desejado poderia ser enviado ao motor, porém não haveria garantias de que ele estaria realizando o movimento desejado, pois o sinal deve ser corrigido para o motor em cada instante do movimento.

De forma a eliminar o problema da aplicação de condições iniciais não nulas ao sistema, faz-se necessário projetar o sistema de controle em duas fases: uma para gerar estas condições iniciais e outra para prescrever o movimento periódico do atuador, de forma a manter o componente sub-atuado com movimento permanente.

A conexão física utilizada entre o computador e o motor *PWM*, é uma interface de entrada e saída de dados da *National Instruments*, esse sistema pode ser utilizado diretamente com o software *LabVIEW*.

Uma importante observação a ser feita no sistema, é que por não existir *encoder* no elemento sub-atuado, não há informação de sua posição, logo ao iniciar o movimento precisamos garantir que o elemento esteja em uma posição conhecida, por isso o controle ao ser ativado, inicia-se em um modo de rotação constante do elemento atuador, manter uma rotação constante por um período considerável de tempo garante que o elemento sub-atuado acompanha o mesmo movimento que o elemento atuador.

Após os dois elementos possuírem rotação constante e igual, inicia-se a primeira etapa do controle, onde uma rotação deve ser aplicada ao elemento sub-atuado, após a aplicação desta rotação uma segunda etapa do controle entra em operação iniciando então a indução do movimento rotacional permanente no componente sub-atuado.

Com o funcionamento do sistema, foi possível validar o equacionamento da dinâmica inversa com as considerações de linearização utilizadas.

Para adquirir estes dados, serão usadas placas com entradas de sinal analógico (UMI-7764), uma vez que a posição da haste é uma variável contínua. Serão 32 canais independentes ou 16 diferenciais, 16 bits de resolução, com tensões de ± 5 V (valores máximo e mínimo, podendo-se trabalhar dentro desta faixa).

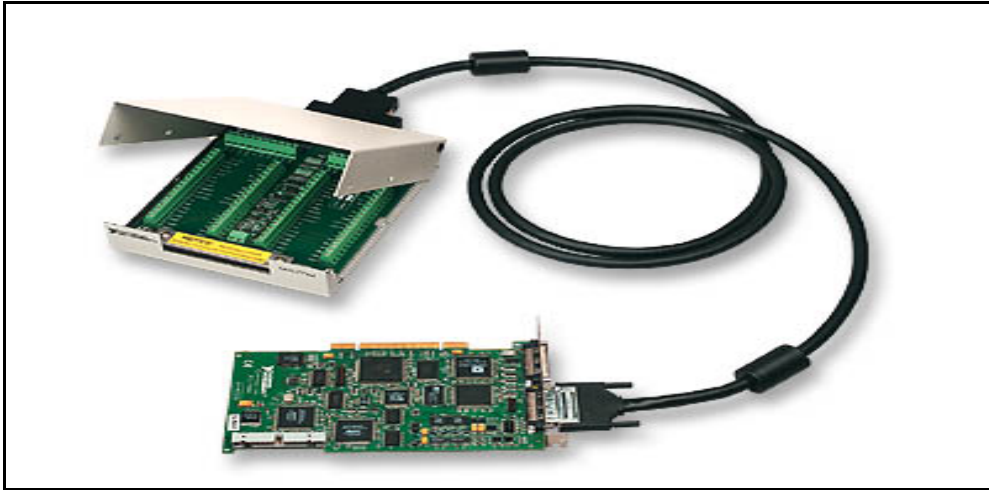


Figura 9 Placa NI adquirida para o controle da plataforma (UMI-7764)



Figura 10 Incremental Encoder

5. CONCLUSÕES / TRABALHOS FUTUROS

A validação do modelo numérico com os testes experimentais permitiu uma melhor compreensão do comportamento dinâmico do manipulador. Esta melhor compreensão permitirá experimentar outras modelagens do sistema, tal como linearizar as equações de movimento na condição de regime permanente e buscar soluções alternativas ao problema.

Mesmo com a utilização de um gerador de sinais sem qualquer tipo de realimentação foi possível obter resultados bastante estáveis, porém dentro de certas limitações de parâmetros, como tensão, forma de onda utilizada e frequência, o que nos ajuda a escolher uma entrada simplificada ao sistema, sem necessidade de geração de sinais complexos.

A indução do movimento contínuo no componente sub-atuado a partir de um movimento prescrito no componente atuador revelou-se satisfatória numa certa faixa de velocidade angular, não se aplicando para grandes velocidades, pois quanto maior a velocidade angular, maiores serão os atritos do sistema com rolamentos e ar, sendo necessário um ajuste no controle para que seja possível o movimentos nessas situações.

Estudos detalhados ajudarão a estabelecer a faixa de frequência de rotação em que será possível manter o movimento permanente no componente sub-atuado.

Uma outra possibilidade de estudo seria um impulso inicial no componente sub-atuado e estudar o comportamento do sistema a partir desse impulso, com as mesmos sinais aplicados.

REFERÊNCIAS

- 1 - I. FANTONI, R. LOZANO. **Non linear control for underactuated mechanical systems**, Springer-Verlag London, Communications and Control Engineering Series, 2002, Book review in *Automatica* 38, 2002, pp 2030-2031.
- 2 - N. SHIROMA, H. ARAI AND K. TANIE. **Nonlinear Control of a Planar Free Link Under a Nonholonomic Constraint**, Proc. 8th International Conference on Advanced Robotics (ICAR'97), pp.103-109, 1997.
- 3 - E. DOMBRE, W. KHALIL. **Modélisation et commandes des robots**, Paris, Traite des Nouvelles Technologies, série Robotique, Editions Hermès, 1988.
- 4- PAZOS, Fernando . **Automação de sistemas & robótica**, v.1, p. 261, 2002.